

Akustik von E-Bikes

Stefan Becker, Benedikt Berchtenbreiter, Florian Krömer, Alexander Lodermeier, Jörg Riedel, Andreas Renz

Ziel der vorliegenden Studie ist es, einen Einblick in die Schallabstrahlung von elektrisch unterstützten Fahrrädern zu erlangen. Dazu wurden in die Untersuchungen eine Vielzahl unterschiedlicher elektrischer Antriebe verschiedener Hersteller einbezogen. Es konnte ein spezieller Versuchsaufbau in einem reflexionsarmen Akustikraum installiert werden, der es ermöglichte unter reproduzierbaren Randbedingungen die Schallabstrahlung der verschiedenen E-Bikes zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich der ermittelte Schalleistungspegel im Vergleich zum Betrieb ohne E-Motorunterstützung um ca. 5 dB erhöht. Deutlicher sind die Zunahmen in den hohen Leistungsklassen der Mountainbikes. Hier kann es zu Erhöhungen von ca. 15 dB kommen. Die Gesamtschalleistungspegel liegen im Bereich von 60–75 dB(A). Sie sind abhängig von der Leistungsklasse der Fahrräder, aber auch vom Hersteller. In gleichen Leistungsklassen weichen die Schalleistungspegel bei unterschiedlichen Betriebspunkten in einem Bereich von 3 dB voneinander ab. Die Untersuchungsergebnisse werden durch verschiedene Messpunkte im Umfeld des Fahrrades ermittelt. Dazu gehört die Richtcharakteristik der Schallabstrahlung, die Schallimmission an einem Passanten-Modell und die Schallwahrnehmung am Ohr des Fahrradfahrers selbst. Abschließend erfolgte eine Analyse von psychoakustischen Parametern. Im Fokus stehen die Lautheit und die Schärfe des Signals. In der Lautheit konnten die Aussagen der Versuchsergebnisse bestätigt werden. Dieser Trend lässt sich für alle untersuchten Fahrräder bestätigen.

Einführung

Elektrisch unterstützte Fahrräder gewinnen eine immer größere Bedeutung in unserem Straßenverkehr. Aber auch im Freizeitbereich haben E-Bikes eine weite Verbreitung. Gerade im Bereich der Mountainbikes gab es sehr starken Entwicklungsfortschritt. So wurden im Jahre 2019 laut Bericht des Zweirad-Industrieverbandes [1] 1,4 Millionen E-Bikes verkauft. Das bedeutet, dass jedes dritte verkaufte Fahrrad mit einem Elektromotor ausgestattet ist. Dabei haben E-Trekkingbikes mit 36 % den größten Marktanteil gefolgt von E-Citybikes mit 31 % und den E-Mountainbikes mit ca. 26,5 %. Die Tendenz der letzten Jahre zeigt, dass der Anteil stetig zunimmt. Mit dieser Zunahme kommt es auch zu einer erhöhten Lärmbelastung durch E-Bikes. Dies betrifft sowohl

Acoustics of E-Bikes

The aim of the present study is to provide an understanding of the sound radiation of electrically supported bicycles. For this purpose, a large number of different electric drives from different manufacturers were included in the investigations. A special test setup was applied within an anechoic room, which allowed us to investigate the sound radiation of the different e-bikes under reproducible boundary conditions. The results show that the measured sound power level increases by 5 dB when compared to a configuration without electric motor support. The increase is more significant in the high power classes of mountain bikes. In this case, a higher level of up to 15 dB occurs. The total sound power level is in the range of 60–75 dB(A). It depends on the performance class of the bikes but also on the manufacturer. Within the same power classifications, the sound power levels at different operating points differ from each other within a range of 3 dB. The test results are determined by different measuring points in the vicinity of the bicycle. These include the directivity of the sound radiation, the sound immission on a pedestrian model and the sound perception at the ear of the cyclist himself. Finally, an analysis of psychoacoustic parameters has been performed. The focus was set on the loudness and sharpness of the signal. Thereby, the statements of the test results were substantiated by the loudness parameter. This trend has been verified for all bicycles investigated.

die Nutzung der Fahrräder im städtischen Bereich als auch in der Natur und in großen Produktionsräumen von Industriebetrieben. Wichtige Geräuschquellen eines konventionellen Fahrrades sind das Reifengeräusch, Kettengeräusche und die induzierten Windgeräusche des Fahrradfahrers. Bei E-Bikes kommt die Komponente des Elektromotors dazu.

In der vorliegenden Studie galt es, diesen zusätzlichen Anteil der Geräuschemission durch den Elektromotor zu erfassen und zu analysieren. Neben der Bewertung auf der Basis des Schalldruckpegels wurde die Richtcharakteristik der Schallabstrahlung und eine Bewertung psychoakustischer Kenngrößen in die Untersuchungen miteinbezogen. Es war nicht das Ziel und der Zweck der Untersuchungen, einen Vergleich von verschiedenen Konkurrenzproduk-

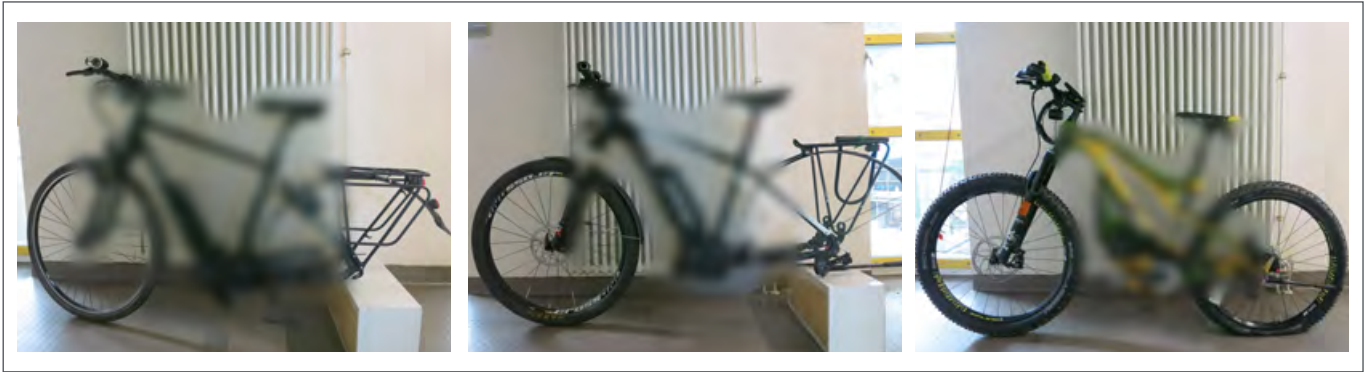


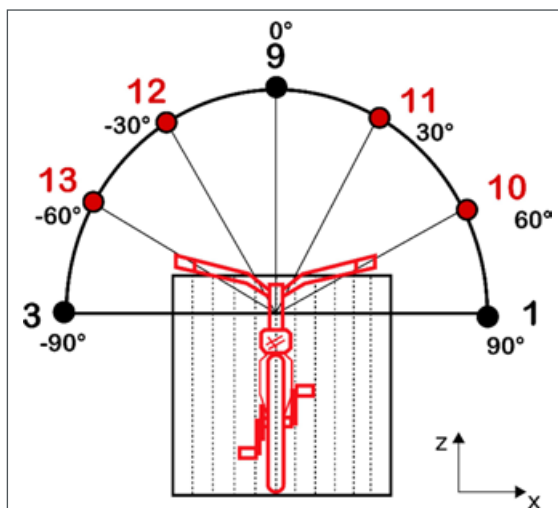
Abb. 1: Beispiele der untersuchten Fahrrädertypen

ten durchzuführen. Wichtig war es, erste Aussagen über die Schallabstrahlung von E-Bikes zu erhalten. Es galt, einen Versuchsstand aufzubauen, der unter reproduzierbaren Randbedingungen den zusätzlichen Einfluss des Elektromotors auf die Schallabstrahlung erfassen kann. Bisher gibt es in der Literatur sehr wenige Informationen hierzu. Die meisten Informationen basieren auf Herstellerangaben, bei denen die Untersuchungsbedingungen unbekannt sind. Gesetzliche Vorgaben zu Schallemissionen von E-Bikes gibt es bisher nicht. Die durchgeführten Untersuchungen der Messmethoden sind daher als ein erster Schritt zu betrachten, die Akustik von E-Bikes zu erfassen und zu analysieren.

Versuchsaufbau und Messtechnik

In den Untersuchungen galt es, den Einfluss der Reifengeräusche zu unterdrücken. Daher wurde eine Versuchsanordnung gewählt, bei dem das Hinterrad des Fahrrades entfernt und in ein Hometrainer-Modul integriert wurde. Die Funktionsweise des Hometrainers basiert auf der einer elektrischen Motorbremse und hat eine geringere akustische Schallabstrahlung als bei Hometrainern, bei denen das Hinterrad me-

Abb. 2: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Richtcharakteristik



chanisch an der Lauffläche des Rades gebremst wird. Die Untersuchungen erfolgten im reflexionsarmen Raum der Universität Erlangen-Nürnberg. Der Raum hatte die Abmessungen von 4,6 m x 5,0 m in der Grundfläche bei einer Höhe von 3 m. Er ist in seinen akustischen Eigenschaften mit DIN EN ISO 3744 [2] und DIN EN ISO 3740 [3] spezifiziert. Die untere Grenzfrequenz des Raumes liegt bei ca. 200 Hz bei einer Nachhallzeit von unter 0,1 s. Alle terzbandbasierten Werte sind in [4] dokumentiert.

Abbildung 1 zeigt beispielhaft die in die Untersuchung einbezogenen Fahrradtypen. Für die Messungen wurden verschiedene kommerziell erhältliche City-E-Bikes, Trekking-E-Bikes und ein Mountain-E-Bike genutzt. Es handelt sich um E-Bikes mit ausschließlich zentral montiertem Hilfsmotor. Die Darstellung in der Veröffentlichung konzentriert sich auf repräsentative Testbeispiele. Aus den Ergebnissen werden allgemeine Aussagen der Schallabstrahlung und Schallanalyse abgeleitet. Es wird vermieden, Konkurrenzprodukte untereinander zu vergleichen. Daher sind Ähnlichkeiten der Messergebnisse mit den dargestellten Beispielen in Abbildung 1 zufällig. Für die Untersuchungen der Schallabstrahlung wurden verschiedene Mikrofonpositionen gewählt. Entsprechend der DIN EN ISO 3744:2011 [2] wurden 9 Hauptmikrofone (1–9) auf der Oberfläche eines Würfels mit einer Kantenlänge von 2 m um das Fahrrad platziert. Mit Hilfe von vier weiteren Mikrofonen (10–13) wurde ein Halbkreis aus 7 Mikrofonen zur Bestimmung der Richtcharakteristik gebildet. Die Abbildung 2 gibt einen schematischen Überblick über die diesbezügliche Versuchsanordnung.

Der Messaufbau wurde durch die Erfassung des Schalls am Fahrerohr und eines festen Beobachters außerhalb des Fahrrades ergänzt. Für die Akustik am Fahrerohr erfolgten Messungen mit dem System HEAD acoustics SQuadriga II. Als Messpunkt für den festen Beobachter kam der Kunstkopf KEMAR 45 BB (G.R.A.S.) zum Einsatz.

Die Abbildung 3 gibt einen Gesamtüberblick des Messaufbaus im Akustikraum des IPAT der Univer-

sität Erlangen-Nürnberg.

Die Messungen erfolgten in einem festen Versuchsablauf. Es wurden 3 Betriebspunkte bei gleichen Lastzuständen bei einer simulierten Fahrgeschwindigkeit von 15 km/h für den Elektromotor untersucht. Verschiedene Lastzustände konnten über das benutzte Modul Tacx Neo Smart Indoor-Trainer als Ersatz am Hinterrad eingestellt werden. Für die Einstellung und Einhaltung der Betriebsparameter wurde ein Testfahrer für die Fahrräder benutzt. Für die Erfassung der Trittfrequenz kam ein optischer Drehzahlsensor am Kettenrad zum Einsatz. Die Daten wurden automatisch in den Messablauf protokolliert und dienten dem Fahrer als direkte Drehzahlkontrolle.

Die Auswahl der Betriebspunkte erfolgte nach den Gesichtspunkten unterschiedlicher Lastfälle und einer dazugehörigen Trittfrequenz, die es dem Testfahrer gestattet konstante Betriebsbedingungen einzuhalten. Die Betriebspunkte waren:

- 40 min⁻¹ (Trittfrequenz) / 100 Watt (Bremsleistung),
- 60 min⁻¹ (Trittfrequenz) / 200 Watt (Bremsleistung),
- 80 min⁻¹ (Trittfrequenz) / 250 Watt (Bremsleistung).

Insgesamt erfolgten bei den drei Betriebspunkten jeweils zwei Messungen ohne E-Motor-Unterstützung und mit maximaler Motorunterstützung um eine gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu erzielen. Insgesamt wurden 10 unterschiedliche Fahrräder verschiedener Anbieter, mit unterschiedlichen Motorausstattungen in verschiedenen Leistungsklassen untersucht.

Für die folgende Darstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse wurden fünf repräsentative Fahrräder ausgewählt. Diese sind:

1. Fahrrad 1: Trekking-E-Bike (Kettenantrieb)
2. Fahrrad 2: Trekking-E-Bike (Riemenantrieb)
3. Fahrrad 3: City-E-Bike (Kettenantrieb)
4. Fahrrad 4: Mountain-E-Bike (Kettenantrieb)
5. Fahrrad 5: Trekking-E-Bike (Kettenantrieb) –

Fahrleistung > 10.000 km

Es sind kommerziell erhältliche Fahrräder unterschiedlicher Anbieter und Motorausstattung. Bei der Auswahl des Fahrrades 5 galt es, in den Untersuchungen, den Einfluss und die Veränderungen hoher Fahrradlaufzeiten auf die Schallabstrahlung zu berücksichtigen.

Schallabstrahlung

Die Schallabstrahlung eines E-Bikes setzt sich aus einer Vielzahl von Schallquellen zusammen. Das sind:

- Reifengeräusche in Abhängigkeit u. a. von der Fahrgeschwindigkeit, dem Fahrbahnbelag, dem Reifenmaterial und dem Reifendruck,

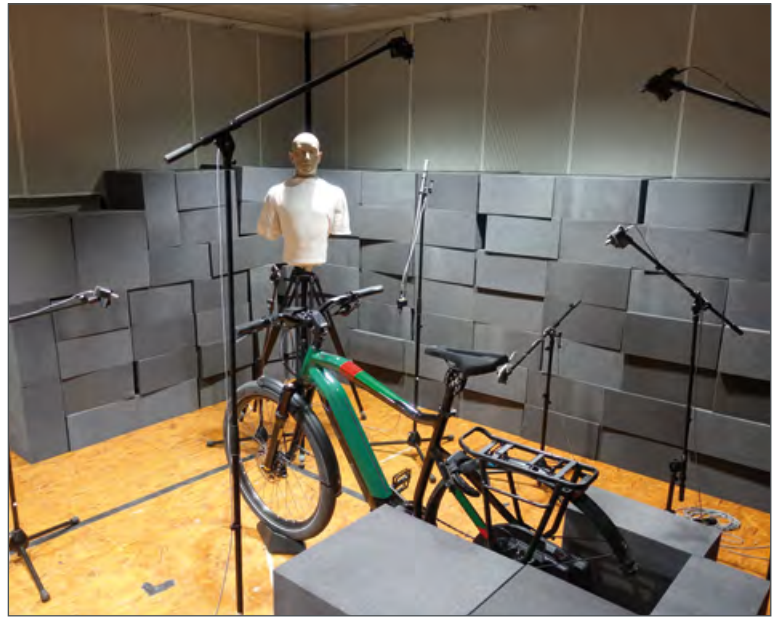


Abb. 3: Versuchsaufbau im reflexionsarmen Raum

- Windgeräusche beeinflusst u. a. von der Fahrgeschwindigkeit, der angeströmten Fläche, des Strömungswiderstandes, des aktuellen Windprofils, der Rahmenkonstruktion und des Aufbaus der drehenden Räder,
- Ketten- und Lagergeräusche, die u. a. von der Schaltung, dem Kettenmaterial, der gewählten Übersetzung und dem Betriebsverschleiß abhängig sind, sowie
- Elektromotorgeräusche, die u. a. von der Bauart des Motors, der Leistungsklasse, den Betriebsbedingungen, den Getriebearten und dem Einbau in die Rahmenkonstruktion des Fahrzeuges abhängig sind.

Diese Aufstellung verdeutlicht, wie komplex die Erfassung des Gesamtgeräuschs um ein rollendes Fahrrad ist. Viele der Geräuschquellen stehen im engen Zusammenhang zueinander und beeinflussen sich wechselseitig. Mit der Versuchsanordnung konnten Reifen- und Fahrgeräusche eliminiert werden. Es standen der Beitrag des Elektromotors in Zusammenspiel mit dem Kettenantriebssystem im Fokus. Diese Studie gibt daher einen ersten Einblick in ein Grundverständnis der Schallabstrahlung von E-Bikes, welches es durch weiterführende Untersuchungen in der Breite der Datenbasis und im physikalischen Verständnis kontinuierlich zu erweitern gilt.

Das Hauptaugenmerk der durchgeführten Untersuchungen galt dem zusätzlichen Beitrag des Elektromotors auf das abgestrahlte Schallfeld des Fahrrades. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die ermittelten Schalleistungspegel mit und ohne Motorunterstützung bei den drei ausgewählten Betriebspunkten. Mit der Darstellung der ausgewählten Fallbeispiele werden verschiedene Aspekte der Schallabstrahlung

Tab. 1: Gesamtschallleistungspegel mit und ohne E-Motorunterstützung bei unterschiedlichen Betriebspunkten

Schallleistungspegel L_w in dB(A)	100W / 40rpm		200W / 60rpm		250W / 80rpm	
	Fahrrad	E-Motor	Fahrrad	E-Motor	Fahrrad	E-Motor
Fahrrad 1	54,5	61,4	57,9	66,4	61,0	71,0
Fahrrad 2	56,9	58,1	60,2	62,5	62,4	66,7
Fahrrad 3	61,2	61,5	67,7	66,8	69,7	71,5
Fahrrad 4	54,0	67,5	56,6	72,2	59,5	76,8
Fahrrad 5	57,5	62,0	61,6	65,7	65,0	68,0

dargestellt. Der Schwerpunkt liegt entsprechend der einleitenden Statistik mit dem größten Verkaufsanteil auf Trekking-E-Bikes. Daher wurden für die Auswertung drei Fahrräder ausgewählt, ein Trekking-E-Bike


mit Kettenantrieb (Fahrrad 1), ein Trekking-E-Bike mit Riemenantrieb (Fahrrad 2) und ein Trekking-E-Bike mit einer hohen Laufleistung (Fahrrad 5), um hier Unterschiede bei hoher Nutzungsdauer aufzuzeigen. Weiterhin beinhaltet die Darstellung ein City-E-Bike (Fahrrad 3), welches akustische Auffälligkeiten im Antriebsmechanismus hatte. Die Ursache dafür lag in einem Defekt des Kettenantriebes. Das Fahrrad wurde in die Auswertung mit einbezogen, da es hier galt, herausfinden, ob bei Motorunterstützung derartige Geräuschquellen maskiert werden. Als Vertreter der höchsten Leistungsklasse konnte ein Mountain-E-Bike (Fahrrad 4) in die Auswertung aufgenommen werden.

Aus den Ergebnissen der Schallleistungsmessungen lassen sich folgende Erkenntnisse gewinnen. Diese Schlussfolgerungen basieren auf einer begrenzten Datenbasis und lassen sich anhand der beschriebenen Komplexität des akustischen Problems nur in Richt- und Anhaltswerten formulieren. Es sind vor allem Erkenntnisse, die sich nicht in quantitativen Messwerten für eine komplette Produktpalette definieren lassen, sondern es sind Informationen, die Abschätzungen liefern und einen ersten Einblick in die Akustik von E-Bikes zulassen.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass der Gesamtschallleistungspegel (A-bewertet) ohne Windgeräusche und Reifengeräusche eines Fahrrades ohne Motorunterstützung im Bereich von ca. 55–60 dB liegt. Mit Motorunterstützung erhöht sich der Leistungspegel um 2–10 dB in Abhängigkeit von der Art der Kraftübertragung und des Fahrradtyps. Als Mittelwert aller untersuchten Trekking-E-Bikes konnte eine Erhöhung von ca. 5 dB ermittelt werden. Die Laufleistung des Fahrrades hat keinen signifikanten Einfluss auf den Schallleistungspegel. Defekte im Kettenantrieb können die Schallabstrahlung maßgeblich beeinflussen. Jedoch beeinflusst das Zuschal-

Solution Partner

Digital Industries Software



NOVICOS

FROM SCIENCE TO ENGINEERING.

MESSTECHNIK

Flexibilität, Leistung und Präzision: Unsere skalierbaren Messsysteme kombinieren hochwertige Hardware mit einer modernen, anwenderfreundlichen Analysesoftware – für Prüfstände, EoL und Entwicklung.

CAE-TOOLS

Komplexe Zusammenhänge effizient berechnen: Mit unseren 1D- und 3D-Simulationslösungen beantworten Sie Fragestellungen zu Schall, seiner Anregung und vielem mehr schneller und einfacher.

DIENSTLEISTUNG

Unsere Experten unterstützen Ihr Projekt in allen Punkten rund um Akustik und Anregungsmechanismen durch gezielte Messungen, multiphysikalische Simulationen und individuelle Prüfstände.

Jetzt mehr erfahren auf novicos.de

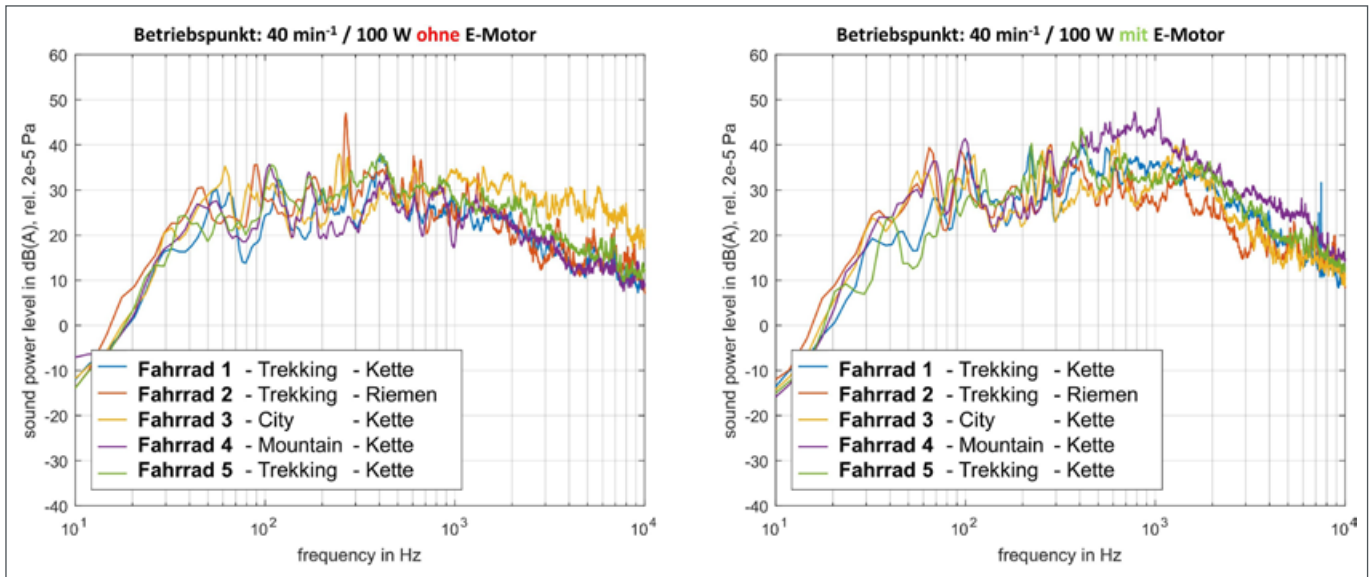


Abb. 4: Schallleistungsspektrum mit und ohne Motorunterstützung bei Betriebspunkt 40 min⁻¹ (Trittfrequenz) / 100 Watt (Bremsleistung).

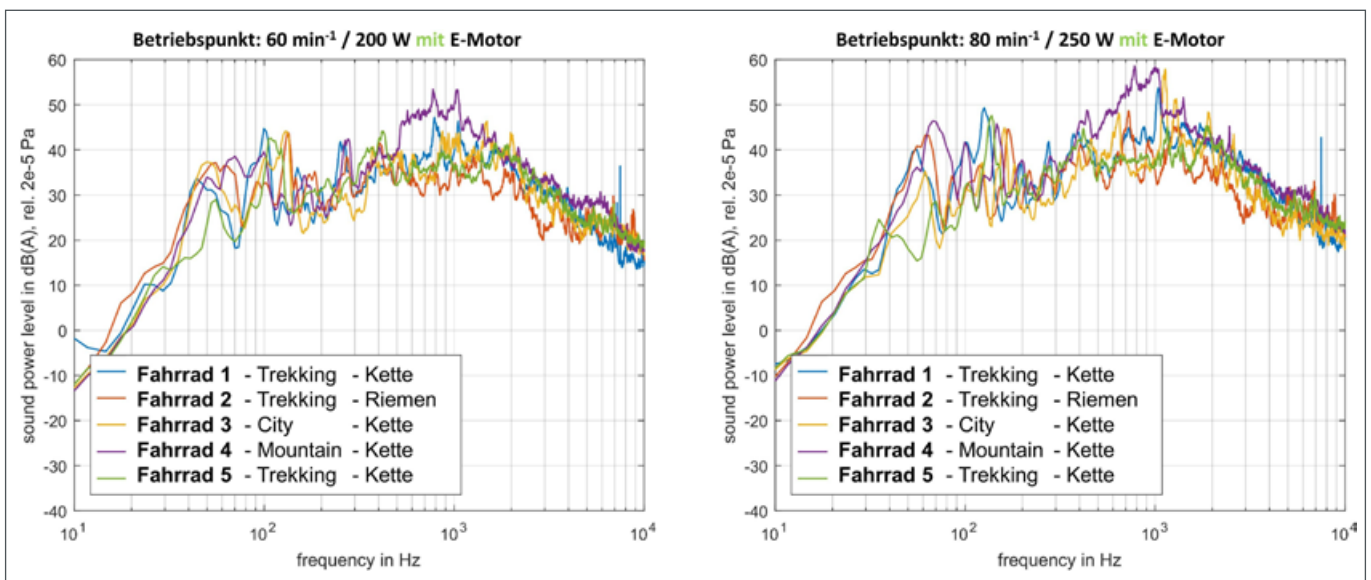


Abb. 5: Schallleistungsspektrum mit Motorunterstützung bei unterschiedlichen Betriebspunkten, links 60 min⁻¹ (Trittfrequenz) / 200 Watt (Bremsleistung) und rechts 80 min⁻¹ (Trittfrequenz) / 250 Watt (Bremsleistung).

ten des Elektromotors diesen Effekt auf den Schallleistungspegel.

Abbildungen 4 und 5 zeigen die Schallleistungsspektren mit und ohne Elektromotor und bei verschiedenen Betriebsbereichen. Auffällig ist, dass bei zugeschalteter Motorunterstützung in Abbildung 4 der Motor vor allem eine Schallleistungserhöhung im höherfrequenten Bereich von 1.000–6.000 Hz erzeugt. Besonders stark ist dieser Beitrag bei dem Mountain-E-Bike ausgeprägt. Auffällig ist ebenfalls eine sehr starke tonale Komponente für das Trekking-Rad mit Riemenantrieb. Hierfür verantwortlich ist eine angeregte Eigenschwingung des Riemens, die bei Motorzuschaltung unterdrückt wird. Der in der Beschreibung des Gesamtschalldruckpegels (siehe Tabelle 1) bei Fahrrad 3 ohne Motor erhöhte Pe-

gelwert ist ebenfalls deutlich in den Schallspektren ersichtlich. Er führt zu einer erhöhten Anregung des Breitbandschalls im gesamten höherfrequenten Bereich ab 1 kHz. Wahrgenommen wird der Defekt im Kurbelbereich als Quietschton.

Insgesamt zeigen die Schallleistungsspektren ohne Motorunterstützung einen ähnlichen Verlauf. Es ergibt sich im Schallleistungsspektrum ein sehr breitbandiges Spektrum mit einem Maximum im Frequenzbereich bei ca. 400–500 Hz. Der dominante Frequenzbereich verschiebt sich mit Motorunterstützung in den Bereich von 800–1.000 Hz. Es treten verstärkt zusätzliche tonale Komponenten in Abhängigkeit vom Fahrradtyp und den Betriebsparametern auf. Nicht betrachtet in der Analyse wird der niederfrequente Bereich unterhalb 200 Hz, da er in den

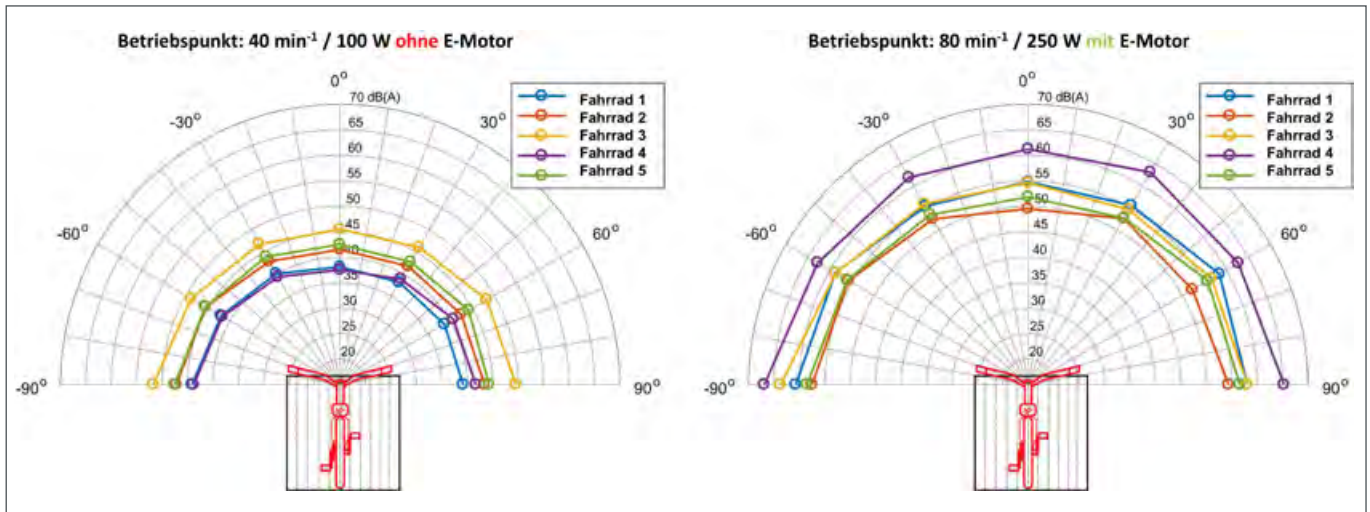


Abb. 6: Richtcharakteristik des Schalldruckpegels ohne und mit Motorunterstützung bei unterschiedlichen Betriebspunkten, links 40 min^{-1} (Trittfrequenz) / 100 Watt (Bremsleistung) – ohne Motorunterstützung und rechts 80 min^{-1} (Trittfrequenz) / 250 Watt (Bremsleistung) mit Motorunterstützung.

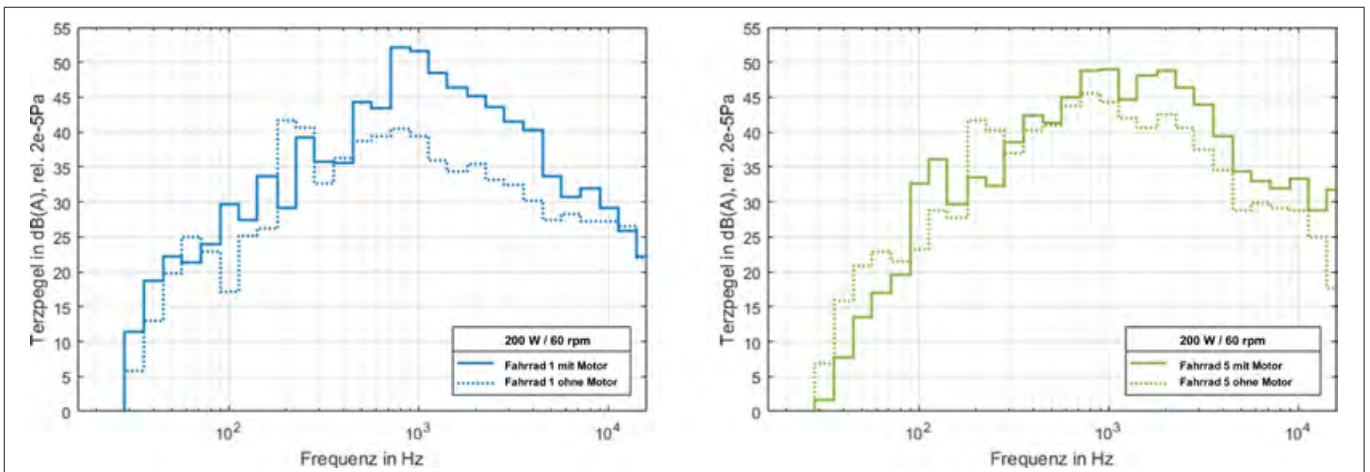
Grenzbereich der Raumeigenschaften des benutzten reflexionsarmen Raumes fällt.

Die Darstellungen in Abbildung 6 geben einen Einblick in die Richtcharakteristik der Schallabstrahlung. Das linke Bild zeigt die Schallabstrahlung bei der geringsten Trittfrequenz ohne Motorunterstützung. Die Schalldruckpegel zwischen 35 und 45 dB(A) können als gering eingestuft werden. Auffallend ist, dass höhere Schalldruckpegel auf der Kettenseite auftreten. Deutlich höher sind die Schalldruckpegel mit Motorunterstützung. Sie liegen hier im Bereich von ca. 50–65 dB(A). Hierbei treten nur geringe Unterschiede im Schalldruckpegel zwischen Kettenseite und der gegenüberliegenden Seite auf.

Aus den Schalldruckverteilungen mit und ohne Motorunterstützung am Ort des Fahrradfahrerkopfes in Abbildung 7 lässt sich schlussfolgern, dass auch hier in den Schalldruckspektren eine starke Erhöhung des Breitbandschalls zwischen 700–8.000 Hz erfolgt. Für

die Darstellung wurden die zwei Trekking-E-Bikes (Fahrrad 1 und 5) ausgewählt. Sie sind hier im Terzbandspektrum dargestellt. Bei der rechten Darstellung in Abbildung 7 für das Trekking-E-Bike Fahrrad 5 im Vergleich zum Fahrrad 1 links mit der sehr hohen Laufleistung fällt auf, dass der Schalldruck ohne Motorunterstützung deutlich höher ist, was u. a. auf einen höheren Nutzungsgrad des Kurbelmechanismus und des Kettenantriebs hindeutet, der sich in dem höheren Kettengeräusch niederschlägt. Mit Motorunterstützung ergeben sich ähnliche Verläufe. Die Maximalwerte werden im Bereich bei 700–2.000 Hz erreicht. Die Schalldruckpegel liegen in diesem Bereich am Fahrradfahrerkopf bei ca. 50 dB(A). Insgesamt bestätigen die Untersuchungen am Fahrradfahrerohr die Schlussfolgerungen, die schon aus den Schallleistungsmessungen abgeleitet werden konnten. Eine abschließende Betrachtung der Schallmessungen erfolgte am Passantenort. Als repräsentative Darstellung

Abb. 7: Schallleistungsspektrum mit und ohne Motorunterstützung bei 60 min^{-1} (Trittfrequenz) / 200 Watt (Bremsleistung) an der Position des Fahrradfahrerkopfes für Trekking-E-Bike-Kette 1 und 5 in Abhängigkeit von der Laufleistung des Fahrrades.



lung wurde der Betriebspunkt mit Motorunterstützung bei der mittleren Trittfrequenz ausgewählt, siehe Abbildung 8. Hier handelt es sich um eine stationäre Messung im Abstand von 2 m im vorderen Bereich des Fahrrades (siehe Abbildung 3). Diese Untersuchung entspricht nicht einer Vorbeifahrt, da sich der Ort zwischen Passant und Fahrradfahrer nicht ändert. Auch in dieser Darstellung des Schalldruckpegels ergeben sich ähnliche qualitative Verläufe der ausgewählten Testfahrräder. Auffallend sind wiederum die sehr hohen Schalldruckpegel für das Mountain-E-Bike von 65 dB(A) mit einer sehr tonalen Überhöhung im Bereich von 1 kHz. Das Fahrrad mit der geringsten Geräuschentwicklung war das Trekking-E-Bike mit Riemenantrieb bei 57,4 dB(A). Insgesamt konnte damit ein mittlerer Schalldruckpegel für die Trekkingbikes von ca. 60 dB(A) ermittelt werden.

Psychoakustische Bewertung

Für eine erweiterte Analyse der Schallmessungen nach psychoakustischen Parametern wurde die Lautheit und die Schärfe verwendet. Beide Kenngrößen wurden ausgewählt, da sie durch die DIN 45631 [5] und die DIN 45692 [7] definiert sind.

Die Lautheit wird als Messgröße für die subjektive empfundene Lautstärke unter Berücksichtigung der Frequenzaufteilung im Gehör genutzt. Sie verwendet stationäre Signale und entspricht dem Verfahren nach Zwicker [8]. In dem Verfahren werden die Kernlautheiten oberhalb 300 Hz aus dem Terzpegeln (siehe Abbildung 7) gemäß der DIN 45631 ermittelt. Daraus werden die spezifischen Lautheiten und die Gesamtlautheit N in sone berechnet. Ausführliche Informationen der Berechnungen sind in [8] und [9] zu finden. Die aktuelle Norm wurde in der DIN 45631/A1 [6] erweitert, die die Berechnung der Lautheit von zeitvarianten Schallen ermöglicht. Die grundlegende Berechnung der Terzfilter ist zur DIN 45631 identisch. Berücksichtigung finden in der DIN 45631/A1 gehörspezifische Eigenschaften, wie ein nichtlineares Abklingverhalten.

Die Schärfe ist eine unabhängige wahrnehmbare Hörempfindung, die vorherrschend durch die spektrale Hüllkurve des jeweiligen Signals bestimmt wird. Die spektrale Feinstruktur ist von untergeordneter Bedeutung [10]. Es wird entsprechend der DIN 45692 das Lautheits-Tonheits-Muster mit einer Gewichtungsfunktion analysiert. Darauf erfolgt die Bestimmung eines Schwerpunkt Moments, das eine Gewichtung von hohen und tiefen Frequenzanteilen im Schallspektrum durchführt. Das Schwerpunktmoment ergibt damit einen direkten proportionalen Zusammenhang zur Größe der Schärfe S [7] in acum. Die Wahrnehmung von Schärfe wird oft in Adjektiven wie „schrill“ oder „hell“ beschrieben [9].

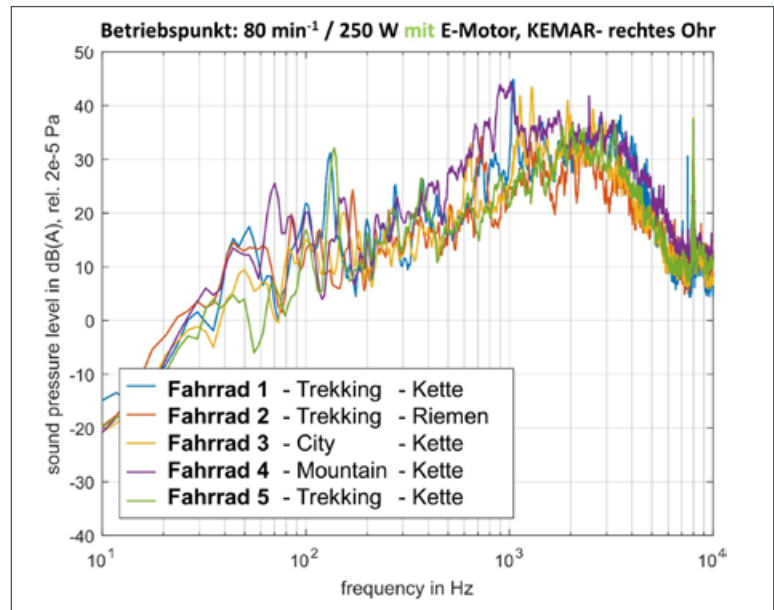


Abb. 8: Schalldruckspektrum mit Motorunterstützung bei 80 min^{-1} (Trittfrequenz) / 250 Watt (Bremsleistung) am Passanten – Kunstkopf. Gesamtschalldruckpegel: Fahrrad 1 – 62,5 dB(A), Fahrrad 2 – 57,4 dB(A), Fahrrad 3 – 61,3 dB(A), Fahrrad 4 – 65 dB(A), Fahrrad 5 – 59,7 dB(A).

Bestimmt wurden die Kenngrößen über ein hauseigenes Psychoakustikprogramm des IPAT [11].

Für die Auswertung dieser psychoakustischen Parameter wurden die Messungen am Fahrradfahrerkopf ausgewählt. Der Fahrer ist im realen Fahrmodus der E-Bikes im Gegensatz zum Ort des Passanten kontinuierlich von den Geräuschen des E-Bikes beeinflusst. Dazu kommt, dass über seine Wahrnehmung der Geräusche das Kaufverhalten für das Fahrrad beeinflusst werden kann.

In den Ergebnissen der Tabelle 2 (siehe folgende Seite) sind die Schallleistungspegel, die Lautheit und die Schärfe für die mittlere Trittfrequenz für die untersuchten E-Bikes zusammengefasst. Auf der Basis der Schärfe konnten keine eindeutigen psychoakustischen Zusammenhänge gefunden werden. Alle Werte lagen im eng begrenzten Bereich von $1,4 \pm 0,1$ acum. In der Größe der Lautheit bestätigen sich die Tendenzen aus den Schallleistungspegeln. Es ergibt sich für die Trekkingbikes ohne Motorunterstützung ein Lautheitswert N , der im Mittel bei 8 sone liegt. Er erhöht sich mit Motorunterstützung um 2,5 sone auf 10,5 sone. Festzustellen ist, dass in der Lautheitsbewertung der Einfluss der Art des Kettenantriebes und Störgeräusche untergeordnet bewertet werden. Auffällig ist auch hier der sehr hohe Beitrag in der Lautheit des Mountain-E-Bikes. Hier liegt die Lautheit mit Motorunterstützung bei 10 sone über dem Wert bei ohne Motorunterstützung.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Lautheit ein wichtiger Parameter ist, der in der akustischen Bewertung von E-Bikes herangezogen werden kann. Hier-

Tab. 2: Gesamtschallleistungspegel, Lautheit und Schärfe mit und ohne E-Motorunterstützung bei 60 min^{-1} (Trittfrequenz) / 200 Watt (Bremsleistung) an der Position des Fahrradfahrerohrs

200W / 60rpm	Schallleistungspegel L_w in dB(A)			Lautheit N in sone (DIN 45631)		Schärfe S in acum (DIN 45692)	
	Fahrrad	E-Motor	ΔL	Fahrrad	E-Motor	Fahrrad	E-Motor
Fahrrad 1	57,9	66,4	8,5	6,4	10,7	1,4	1,4
Fahrrad 2	60,2	62,5	2,3	8,6	9,6	1,4	1,5
Fahrrad 3	67,7	66,8	-0,9	9,9	11,7	1,5	1,3
Fahrrad 4	56,6	72,2	15,6	6,6	16,7	1,5	1,4
Fahrrad 5	61,6	65,7	4,1	8,7	11,0	1,4	1,5

für ist aber noch eine Vielzahl von weiterführenden Untersuchungen notwendig. Unbeachtet blieb das subjektive Hörempfinden von Probanden. Gerade im Kaufverhalten spielt die Geräuschqualität oft eine wichtige Rolle. So bleiben Fragen, inwieweit der Fahrer das Geräusch einer „kraftvollen Motorunterstützung“ hören möchte oder nicht, unbeantwortet.

Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen zur Akustik geben einen ersten Einblick in das Geräuschverhalten von E-Bikes. Dafür wurde ein spezieller Versuchsaufbau aufgebaut, der es ermöglicht, unter definierten akustischen Randbedingungen in einem Akustikraum die zusätzlichen Schallbeiträge des Elektromotors zu erfassen. Eliminiert werden konnten Reifen- und Fahrtwindgeräusche. Die Analyse basierte auf Basis von Schallleistungs- und Schalldruckpe-

geln. Bestimmt wurde die Richtcharakteristik der Schallabstrahlung und psychoakustische Parameter der Lautheit und Schärfe nach den entsprechenden DIN-Normen. Zusammenfassend festzustellen ist, dass die E-Motor-Unterstützung einen signifikanten Beitrag im abgestrahlten Schallfeld im Mittel um 5 dB liefert. Sie führt zu einer Erhöhung des Breitbandschalls im höherfrequenten Bereich des Schallspektrums. Die Bewertung der psychoakustischen Parameter ergab, dass die Schärfe in der Analyse der unterschiedlichen Betriebsparameter keinen Einfluss hat, jedoch die Lautheit als eine zusätzliche Messgröße in die Auswertungen hinzugezogen werden kann.

Ausblick

Für den Schallleistungs- und Schalldruckpegel in realen Fahrsituationen sind Reifen- und Windgeräusche weitere wichtige Einflussgrößen. Für das Geräuschempfinden von Passanten bildet die Vorbeifahrt des Fahrrades die prägende akustische Wahrnehmung. Hierfür können für E-Bikes analoge Untersuchungen durchgeführt werden, die vom Gesetzgeber bei der Vorbeifahrt von Autos vorgeschrieben werden (siehe [12]). Damit wäre es möglich, eine bessere Analyse über die Höhe der zusätzlichen Gesamtgeräuschbelastung auf die Umgebung zu treffen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bildet der Einfluss der Elektromotoraufhängung, sowie deren Verbindung zum Rahmen und Modell des Fahrrades. In der Vorentwicklung von E-Bike-Motoren sind diese Randbedingungen unbekannt. Aber gerade in der Entwicklung gilt es, die entscheidenden konstruktiven Parameter für die Akustik des Elektroantriebes festzulegen. Das Konzept eines derartigen Versuchsaufbaus sieht vor, den Antrieb vom Fahrrad komplett zu entkoppeln. Der Antrieb kann dabei über einen

Abb. 9: Prüfstand zur Luft- und Körperschallmessung von separierten E-Bike-Antrieben.



drehzahlgesteuerten Motor erfolgen, der das Trittsverhalten des Fahrradfahrers mit einem entsprechend modulierten Drehmoment berücksichtigt. Das Last- bzw. Bremsverhalten wird dabei durch eine Hysteresebremse realisiert. Ein derartiger Versuchsaufbau (siehe Abbildung 9) ermöglicht es, neben der akustischen Abstrahlcharakteristik auch Strukturschwingungen zu erfassen. Er liefert damit Parameter, die in der Anbindung zum Rahmen des Fahrrades für die Vibroakustik eine wichtige Schnittstelle ergeben.

Literatur

- [1] Zweirad-Industrie-Verband (ZIV) Wirtschaftspressekonferenz am 11. März 2020 in Berlin: Zahlen – Daten – Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland 2019.
- [2] DIN EN ISO 3744:2011-02: Akustik – Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene (ISO 3744:2010). Deutsche Fassung EN ISO 3744:2010.
- [3] DIN EN ISO 3740:2001-03: Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen – Leitlinien zur Anwendung der Grundnormen (ISO 3740:2000). Deutsche Fassung EN ISO 3740:2000.
- [4] Renz, A.: Experimentelle Bestimmung raumakustischer Parameter. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Projektarbeit, 2014.
- [5] Deutsches Institut für Normung: DIN45631 – Berechnung des Laustärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum. Beuth Verlag, März 1991.
- [6] Deutsches Institut für Normung: DIN45631/A1 – Berechnung des Laustärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum. Beuth Verlag, März 2010.
- [7] Deutsches Institut für Normung: DIN45692 – Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe. Beuth Verlag, August 2009.
- [8] Zwicker, E.: Psychoakustik. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, 1982.
- [9] Genuit, K.: Sound-Engineering im Automobilbereich – Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. Springer. Berlin, Heidelberg, 2010.
- [10] Zwicker, E. und Fastl, H.: Psychoacoustics – Facts and Models. Springer. Berlin, Heidelberg, 2007.
- [11] Hohls, S.: Akustik des Fahrzeugklimatisierungssystems und deren Modellierung bei definierten Randbedingungen. Dissertation. Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [12] Bock, F.: Multiphysikalisches Simulationsmodell zur Außengeräuschprognose in der frühen Entwicklungsphase eines Automobils. Dissertation. Universität Erlangen-Nürnberg, 2019. ■

Prof. Dr.-Ing. Stefan Becker, Benedikt Berchtenbreiter, Dr.-Ing. Florian Krömer, Dr.-Ing. Alexander Lodermeier, Jörg Riedel, Andreas Renz
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Prozessmaschinen und Anlagentechnik.