

Gestaltung von Warntönen für die Motorradfahrenden

M. Ercan Altinsoy, Serkan Atamer, Robert Rosenkranz, Colin Ballantyne, Alina Kuttler

Motorräder spielen als Verkehrsmittel besonders im Sommer eine wichtige Rolle. Einerseits sind sie ein Verkehrsmittel für die Freizeit, andererseits sind sie im alltäglichen Einsatz insbesondere in Großstädten flexibler als ein PKW. Die oft damit verbundene dynamische Fahrweise bedeutet für zwei Seiten ein erhöhtes Gefahrenpotenzial: für die Motorradfahrenden wie für alle anderen Verkehrsteilnehmer, die sich mit ihnen den Verkehrsraum teilen. Anders als bei PKW, bei denen zunehmend Assistenzsysteme zur Unfallvermeidung zum Standard gehören, werden solche Techniken bei Motorrädern bisher vermisst. Im vorliegenden Beitrag werden grundlegende Überlegungen zu einem Assistenzsystem bei einem Motorrad beschrieben, das eine Unfallgefahr mindern kann.

Geräusch und Sicherheit von Motorradfahrenden

Motorradfahrende haben ein erhöhtes Unfallrisiko und sind im Vergleich zu PKW-Fahrenden besonders gefährdet [1]. Die Unfallursachen sind vielfältig, u. a. schnelles Fahren, mangelnder Sicherheitsabstand, riskante Überholmanöver, Kollidieren der Motorradfahrenden mit anderen Verkehrsteilnehmern, z. B. mit größeren Fahrzeugen, welche die Spur wechseln (toter Winkelbereich von Autos und LKWs), Türunfälle, Spurteilung usw.

In den Autos stehen fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme zur Verfügung, die den Fahrer warnen oder verschiedene Informationen liefern. Akustische Warnungen werden verwendet, um den Fahrer auf offene Türen, nicht angelegte Sicherheitsgurte, Fahrzeuge in unmittelbarer Nähe beim Parken, versehentliches Verlassen der Fahrspur wie bei Spurassistentensystemen und sogar auf mögliche Kollisionen (z. B. für eine Notbremsung) aufmerksam zu machen.

Aufgrund einer Reihe von Herausforderungen konnten Motorradfahrer bisher nicht von solchen akustischen Warnsignalen profitieren. Daher wurde versucht, einige dieser Herausforderungen zu analysieren, die Grenzen möglicher akustischer Rückmeldungen zu quantifizieren und die Machbarkeit einer optimalen akustischen Warnung für Motorradfahrer in einer Wahrnehmungsstudie zu demonstrieren.

Warnsignale für Motorradfahrende

Die grundlegendste Anforderung an jeden Warnton

Design of Warning Sounds for Motorcyclists

Motorcycles play an important role for transportation, especially in summer. On one hand, they are a means of transportation for leisure time, on the other hand they are more flexible than a car in everyday life, especially in large cities. The dynamic driving style often associated with this let increase the risk potential for two sides: for motorcyclists self and for all other road users who share the traffic space with them. In contrast to cars, where assistance systems for accident avoidance are increasingly becoming standard, such technologies are still lacking on motorcycles. This article describes basic considerations for an assistance system on motorcycles that can reduce the risk of accidents.

(akustisches Warnsignal) ist, dass er in den geplanten Nutzungskontexten wahrnehmbar ist. Daher bestand der erste Schritt darin, die Eigenschaften der akustischen Wahrnehmungsschwellen und die akustische Kommunikation in Motorradfahrsituationen zu untersuchen [2].

Im Gegensatz zu Autos, die dem Fahrer in der Kabine eine hohe Dämpfung von Außengeräuschen wie Windgeräuschen bieten, sind Motorradfahrer einem viel höheren Umgebungsgeräusch ausgesetzt, da der Helm nur eine vergleichsweise geringere Dämpfung bietet. Um den Umgebungsgeräuschpegel am Ohr des Motorradfahrers zu bestimmen und zu analysieren, wurden reale Fahrmessungen und Windkanalmessungen mit einem omnidirektionalen Miniaturmikrofon (DPA SC4060) durchgeführt, das im Helm an der Position der Ohren befestigt war. Gleichzeitig wurden Geschwindigkeitsinformationen über den CAN (Controller Area Network) erfasst. Im Windkanal saßen die Probanden bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten, Körperhaltungen, Helmen und Kopfausrichtungen vor dem Luftstrom. Um die Wahrnehmbarkeit der Warntöne zu gewährleisten, wurde ein Worst-Case der Umgebungslärmbelastung angenommen, d. h. Hochgeschwindigkeitsfahrszenarien mit der in den meisten Ländern allgegenwärtigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h. Abb. 1 zeigt die Spektrogramme verschiedener Messungen (Schwarz: reale Fahrmessungen, gelb: Windkanalmessungen). In den Fahrszenarien lag die Höchstgeschwindigkeit bei etwa 120 bis 130 km/h und daher

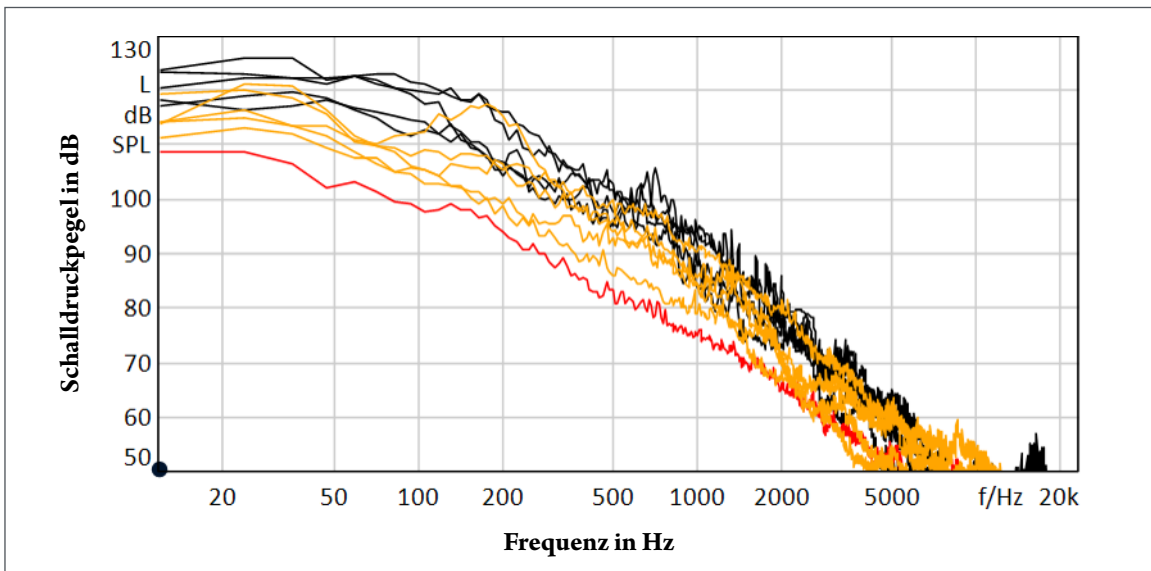


Abb. 1: FFT-Spektren der Hintergrundgeräusche für reale (schwarz) und Windkanalmessungen (gelb) bei 120 km/h und 90 km/h (rot); Fenster = Hanning, Fensterlänge = 4096, Frequenzauflösung ΔF : 10,7 Hz

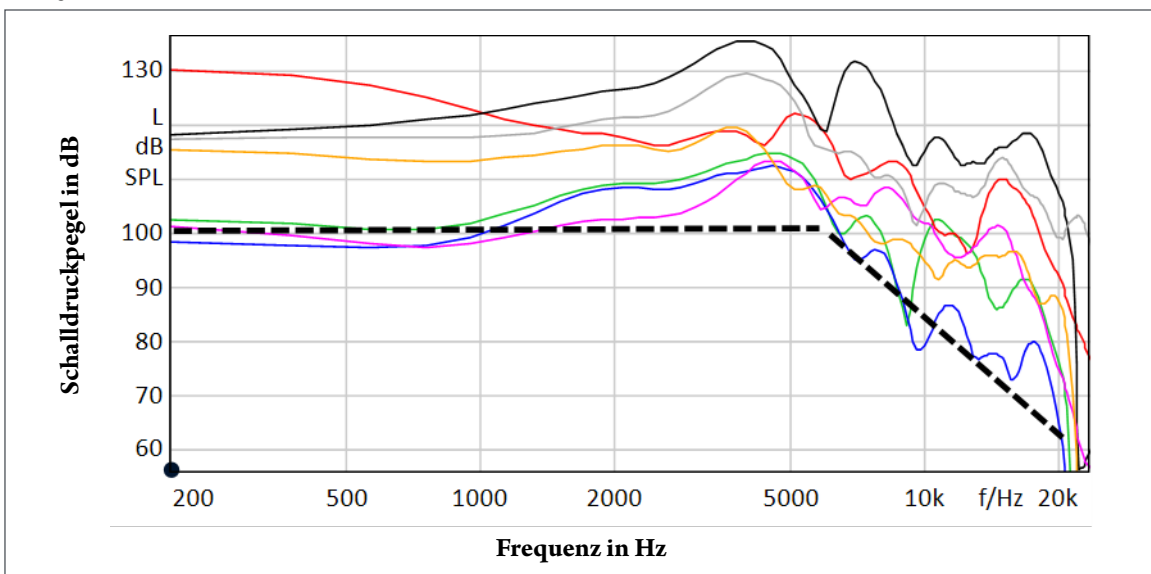
wurden Windkanalmessungen mit einer äquivalenten Luftströmungsgeschwindigkeit von 120 km/h durchgeführt. Zum Vergleich ist auch eine 90 km/h-Messung in Rot dargestellt. Die erhaltenen Daten geben Aufschluss über den frequenzabhängigen Mindestpegel, der erforderlich ist, damit die Warntöne nicht durch Umgebungsgeräusche überdeckt werden.

Die zuvor festgestellten hohen Umgebungsgeräuschpegel legen nahe, dass jedes Audiowiedergabesystem, das zur Erzeugung des Warntons verwendet wird, einen ausreichend hohen Schalldruckpegel erzeugen muss. Im Gegensatz zu Autos, die Platz für größere Lautsprechertreiber bieten, beschränken bei Motorradfahrenden Helmaabmessungen und Schutz-

anforderungen auf schlanke Kopfhörer, die potenziell geringere Ausgangspegel erzeugen. Darüber hinaus sind Motorrad-Bluetooth-Helmkommunikationssysteme ein optionales Zubehör für den Helm und der effektive Schallausgangspegel kann daher bei demselben vom Motorrad bereitgestellten Eingangssignal erheblich variieren.

Daher wurde ein repräsentativer Satz von sieben Headsets verschiedener Marken mit allen typisch vorkommenden Treibergrößen verwendet. Für jedes Headset wurde die frequenzabhängige maximale Lautstärke, d.h. der am Ohr abgegebene Schalldruckpegel gemessen (siehe Abb. 2). Auch hier geben die erhaltenen Daten Aufschluss über den

Abb. 2: Maximaler Schalldruckpegel, der frequenzabhängig von verschiedenen Helm-Headsets erzeugt werden kann. Gestrichelte schwarze Linie: Frequenzabhängiger Maximalpegel, der mindestens von den untersuchten Helm-Headsets erzeugt werden kann



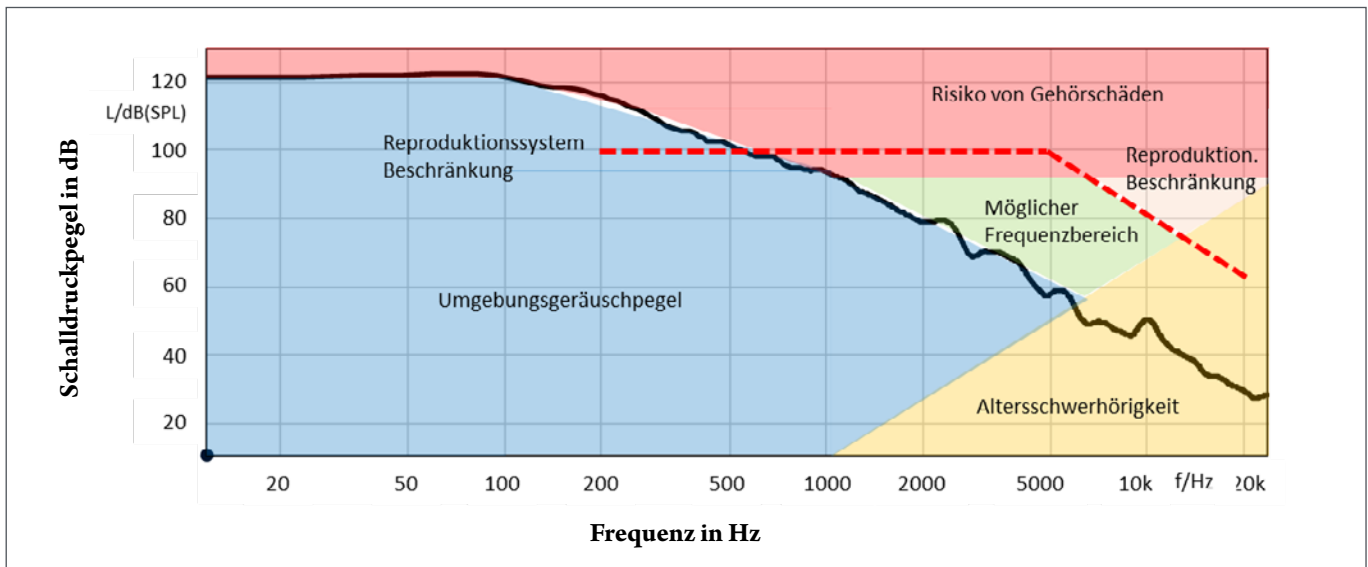


Abb. 3: Gestaltungsraum für Warntöne bei Motorradanwendungen

frequenzabhängigen Maximalpegel, den diese Reproduktionssysteme voraussichtlich zumindest bei sinusförmiger Anregung erzeugen können (siehe gestrichelte Linie in Abb. 2).

Schließlich mussten psychoakustische Faktoren bei der Gestaltung berücksichtigt werden [3]. Die Hörschwelle definiert einen offensichtlich minimalen Warnschallpegel. Auch wenn der Umgebungsgeräuschpegel bei gesunden Probanden in der Regel die Hörschwelle überschreiten sollte, haben ältere Probanden bei höheren Frequenzen meist eine erhöhte Hörschwelle [3]. Geht man wiederum von einem Worst-Case-Szenario aus, müssen die Warntöne die Hörschwelle eines 70-jährigen Mannes überschreiten (siehe Abb. 3). Ein weiterer Faktor, der berücksichtigt werden muss, ist das Risiko einer Gehörschädigung bei hohen Schalldruckpegeln über 90 dB (siehe Abb. 3), die einen oberen Grenzwert festlegen. Mag dieser Grenzwert noch von einer Mittelungszeit abhängen, praktisch würde ein zu hoher Schalldruckpegel nicht akzeptiert werden.

Durch die Zusammenfassung aller unterschiedlichen Anforderungen lässt sich ein Gestaltungsraum für Warntöne in Motorradanwendungen ableiten (siehe Abb. 3). Es ist offensichtlich, dass nur ein begrenzter Frequenzbereich von etwa 1 000 Hz bis 8 000 Hz und ein Pegel von etwa 50 dB bis 90 dB für die Übermittlung akustischer Warnungen an den Motorradfahrer genutzt werden können.

Nach der Definition des Designraums müssen Warntöne spezifiziert werden, die diese Randbedingungen erfüllen. Das Ziel der Warntöne besteht darin, die beabsichtigte Rückmeldung für eine Bedrohung (z.B. ein Hindernis in der Bewegungsbahn) intuitiv zu übermitteln, anstatt langes Training zum Erlernen ihrer Bedeutung zu erfordern. Vorzugsweise sollte die

Meldung so schnell wie möglich übermittelt werden, um den Motorradfahrenden genügend Zeit zu geben, auf die Gefahr zu reagieren. Im Allgemeinen erleichtert eine geringere Anzahl kurzer Feedback-Nachrichten ein intuitives Verständnis und eine schnelle Erkennung/ Reaktion, während eine höhere Anzahl komplexer strukturierter Nachrichten ein differenzierteres Feedback ermöglicht [4]. Angesichts der Prioritäten für ein akustisches Warnsystem wurden potenzielle Bedrohungen in fünf räumliche Kategorien (vorne, Armaturenbrett, links, rechts, hinten) und zwei Kritikalitätsstufen (niedrig und hoch) gruppiert, was zu insgesamt 10 Rückmeldungen führte.

Aufgrund der Erkenntnisse aus früheren Studien zu Warntönen sind pulsierende, tonale Geräusche zu bevorzugen [4]. Die Dauer der Einzelimpulse sollte oberhalb der Zeitkonstanten für die zeitliche Integration von 200 ms liegen [3], da die Maskierungsschwelle bei Impulsen von 20 ms Dauer auf bis zu 10 dB angehoben wird. Die Gesamtdauer des Warntons bestimmt jedoch die Dauer, die der Motorradfahrer benötigt, um die Rückmeldung zu verarbeiten, und sollte daher so kurz wie möglich sein. Da die Warntöne den Fahrer vor Überraschungsereignissen warnen sollen, sollte die Warntondauer deutlich unter der für Überraschungsereignisse angegebenen Reaktionszeit von 1,5 s liegen [5]. Aufgrund der Designvorgaben wurde die Grundfrequenz auf 1 500 Hz eingestellt. Zwei zusätzliche Frequenzkomponenten wurden hinzugefügt, um eine größere Robustheit gegenüber einer Maskierung durch Umgebungsgeräusche zu gewährleisten. Da die Addition von Frequenzen mit ganzen oder halben Vielfachen der Grundfrequenz einen für Warntöne ungeeigneten harmonischen Eindruck vermittelt, wurden die Frequenzverhältnisse auf 1:1,625 und 2,25 eingestellt. Betrachtet man diese drei

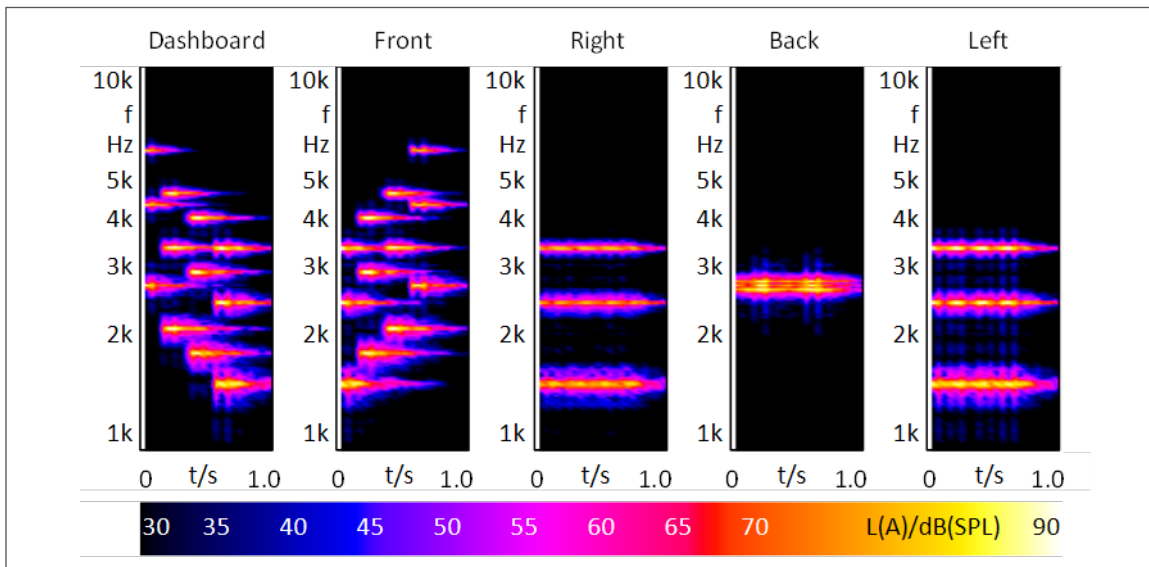


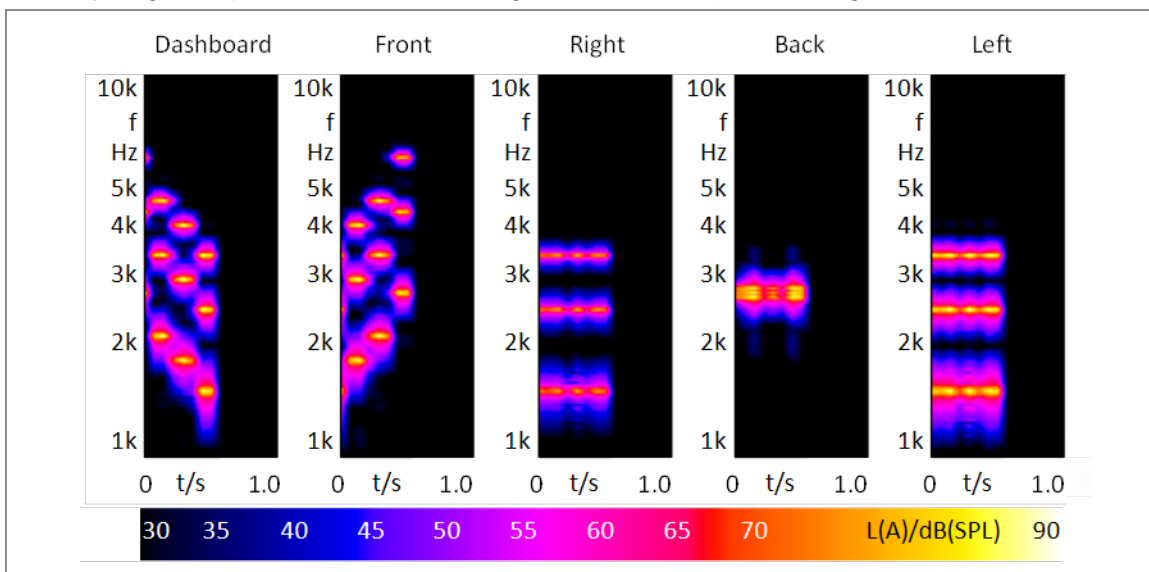
Abb. 4: Spektrogramme für verschiedene Positionen; gestaltete Warntöne für niedrige Dringlichkeit – nur linker Kanal

Frequenzkomponenten aus musiktheoretischer Sicht, nähert es sich einem D#-verminderten Dreiklang an und vermittelt den Eindruck, „unvollendet“, also alarmierend, zu sein. Dieser kompakte Abstand zwischen den Komponenten hat auch den Vorteil, dass er zu einer vergleichsweise schmalen Bandbreite führt, die Verschiebungen der Grundfrequenz zum Kodieren von Informationen ermöglicht und gleichzeitig den begrenzten Designraum einhält.

Aufgrund der individuellen Abweichungen von einer durchschnittlichen kopfbezogenen Übertragungsfunktion ist eine binaurale Wiedergabe von Richtungshinweisen nicht zuverlässig möglich. Stattdessen wurden für die Front- und Armaturenbrettrichtung sukzessive Grundfrequenzverschiebungen nach oben und unten definiert, da sie intuitiv mit der Bewegung nach oben und unten verbunden sind und Fahrenden

so mitteilen, dass sie nach oben oder unten schauen sollen. Für das resultierende Arpeggio (versetztes Einsetzen der Komponenten bei einem Akkord) nach oben oder unten wurden die Grundtonfrequenzen so gewählt, dass die Komponenten unharmonisch klingen. Aus musiktheoretischer Sicht stellt die Abfolge der Grundfrequenzen einen fis-Moll-Sieben- und einen B-Fünf-Akkord dar, einen halbverminderten Akkord, der Spannung vermittelt, die für Warntöne geeignet ist. Da es sich bei den Headsets immer um Stereo-Headsets handelt, können beide Kanäle genutzt werden, um durch Pegelunterschiede zwischen beiden Kanälen die linke und rechte Richtung zu kommunizieren. Um die Rückrichtung von der Vorderrichtung zu unterscheiden, wäre eine qualitativ hochwertige Audiowiedergabe notwendig, die die Unterschiede in den Richtungsfrequenzbändern der

Abb. 5: Spektrogramme für verschiedene Positionen; gestaltete Warntöne für hohe Dringlichkeit – nur linker Kanal



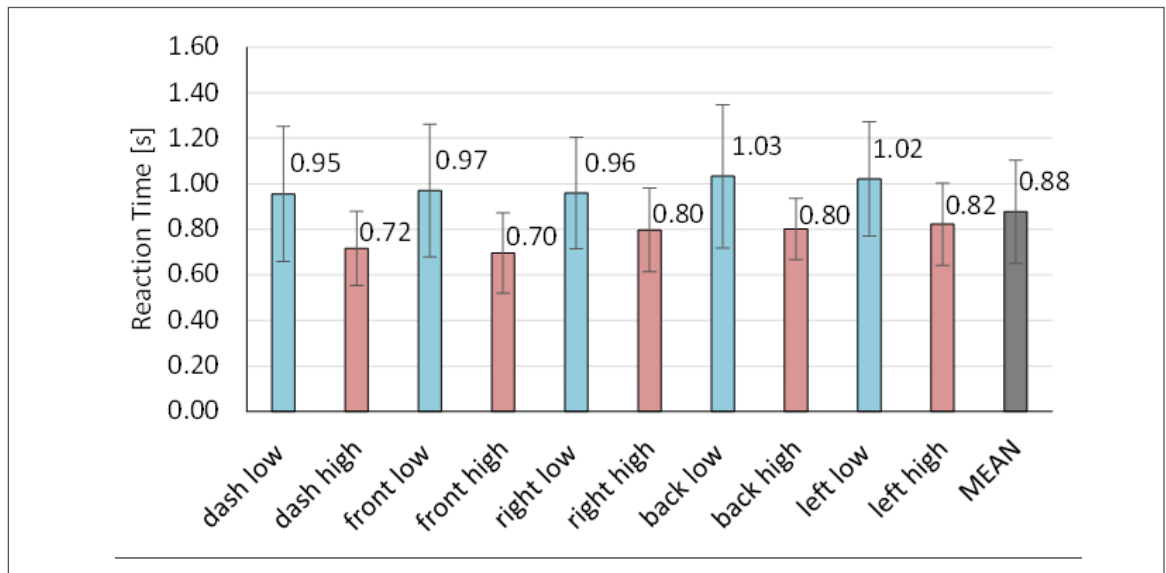


Abb. 6: Reaktionszeiten – gemittelt über 6 Wiederholungen

Ohrübertragungsfunktionen auflöst. Dieses Problem ist aus der Kopfhörertechnik bekannt. Aber vielleicht kann wie dort ein Headtracker-unterstütztes System weiterhelfen. Daher wurde beschlossen, stattdessen auf einen Klang zurückzugreifen, der zwischen dem linken und dem rechten Kanal wechselt. Die Kritikalitätsinformation wurde in der Pulsfrequenz kodiert. Ist die Gefahr dringender, ist die Pulsfrequenz höher, ist die Gefahr weniger dringend, weist das Signal eine niedrigere Pulsfrequenz auf. Um den Eindruck einer größeren Entfernung der Bedrohung zu vermitteln, wurde ein zusätzlicher Hall hinzugefügt. Abbildung 4 und Abbildung 5 (siehe auf der vorherigen Seite) zeigen die Warntöne für die zehn Rückmeldungen. Die Geräusche liegen alle in einem Frequenzbereich von 1 500 Hz bis 6 500 Hz.

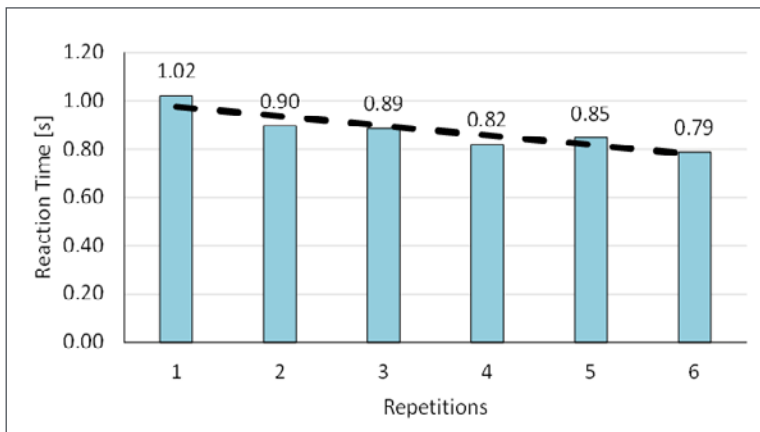
Nach dem Entwurf der Gruppe von zehn Warnsignalen wurde deren Effizienz in zwei Hörexperimenten untersucht. Das erste Experiment war ein Likert-Skalierungsexperiment, das die Wahrnehmbarkeit, Dringlichkeit und Lästigkeit der Signale untersuchte.

Dies bot auch eine Vorbereitung für das zweite Experiment, erklärte jedoch nicht die beabsichtigte Bedeutung der einzelnen Warntöne.

Im zweiten Experiment wurden die Reaktionszeiten der Teilnehmenden gleichzeitig mit der Fehlerquote der Erkennungen der Warntöne gemessen, die den auf realen Motorrädern aufgezeichneten Umgebungsgereuschen überlagert wurden, um die Entscheidung unter Zeitdruck im realen Anwendungsszenario widerzuspiegeln. 28 Teilnehmer (9 Motorradfahrer, 19 Nicht-Motorradfahrer) mit einem Durchschnittsalter von 31 Jahren wurden angewiesen, auf die zufällig dargestellten Szenarien zu reagieren, sobald sie „die durch den Warnton vermittelten Informationen hören und verstehen“. Ihre Reaktion unterbrach sofort die Wiedergabe des Tons, sparte Reaktionszeit und sie waren gezwungen, einen der zehn Feedback-Sounds auszuwählen. Die Reaktionszeiten (siehe Abb. 6) der Hochbedrohungsszenarien liegen bei etwa 0,7 Sekunden bei vollaufmerksamen Fahrern [6]. Darüber hinaus waren die Reaktionszeiten bei jedem weiteren Versuch tendenziell kürzer, wie aus Abbildung 7 hervorgeht.

Die Konfusionsmatrix mit den Raten korrekter Erkennungen für die fünf Richtungshinweise ist in Abbildung 8 dargestellt. Für rechte und linke Warntöne war sie erwartungsgemäß hoch, da die Hinweise offensichtlich waren. Für vorne, hinten und das Armaturenbrett konnten die Teilnehmer jedoch immer noch die richtige Richtung mit einer Genauigkeit von bis zu 60 % bestimmen. Bei einer Ratewahrscheinlichkeit von 20 % rein zufällig richtiger Entscheidungen handelt es sich um eine relativ hohe Genauigkeit. Allerdings waren die Ergebnisse für die Dringlichkeit nicht so aussagekräftig. Unabhängig davon, ob es sich um Geräusche mit geringer oder hoher Dringlichkeit han-

Abb. 7: Änderung in der Reaktionszeit – gemittelt über 6 Wiederholungen



	Entscheidung				
Stimuli	Dashboard	Front	Right	Back	Left
Dashboard	41.7	32.6	8.0	15.9	1.9
Front	23.5	60.6	7.6	6.1	2.3
Right	4.2	2.7	87.1	1.5	4.5
Back	15.2	5.7	9.8	61.0	8.3
Left	2.7	1.1	4.9	3.4	87.9

Abb. 8: Prozentsätze für die Erkennung von Richtungen; Farbcode: rot → gelb → grün – wachsende Erkennungsrate

delte, entschieden sich die Teilnehmer mit einer Quote von 60 % für eine niedrige Dringlichkeit, was scheinbar keinen Unterschied in der wahrgenommenen Dringlichkeit ohne visuellen Kontext bedeutet (siehe Abb. 9). Aufgrund der binären Wahl zwischen hoher und niedriger Dringlichkeit im zweiten Experiment kann jedoch keine Nuance in der wahrgenommenen Dringlichkeit festgestellt werden. Ein Vergleich mit den Bewertungen auf der 100-Punkte-Bewertungsskala von Experiment eins zeigt signifikante, wenn auch kleine Unterschiede in der Dringlichkeit. Angesichts des sehr eingeschränkten Gestaltungsspielraums ist es wahrscheinlich schwierig, große Unterschiede in der Dringlichkeit (z.B. durch drastische Ebenenunterschiede) intuitiv für die absolute Dringlichkeitsebene zu kommunizieren. Allerdings könnten die Probanden Unterschiede im Dringlichkeitsgrad lernen, indem sie den Warntönen in realen Situationskontexten längere Zeit ausgesetzt sind.

Zusammenfassung

Die grundlegenden Designbeschränkungen für Warntöne in Motorrädern wurden analysiert. Die Windgeräusche, die Wiedergabeeigenschaften typischer Headsets, erhöhte Hörschwellen für ältere Motorradfahrer und Schwellenwerte für das Risiko von Gehörschäden definierten insgesamt einen sehr begrenzten Gestaltungsspielraum für solche Warntöne. Innerhalb dieses Designraums wurden Warntöne für zehn Feedbackmeldungen definiert, um die Richtung der Bedrohung und das Ausmaß der Bedrohung zu kommunizieren. Eine Wahrnehmungsstudie zeigte, dass die Richtung den Probanden intuitiv vermittelt werden kann, was zu einer hohen Genauigkeit führt, auch ohne vorheriges Training oder explizite Unterweisung in die Bedeutung der Botschaft. Allerdings ist die intuitive Vermittlung einer absoluten Dringlichkeitsstufe innerhalb des eingeschränkten Design-Raums nicht ohne weiteres möglich und daher müsste die Dringlichkeitsbedeutung zunächst im situativen visuellen Kontext gelernt und anschließend auf relative Weise

	Entscheidung	
Stimuli	low	high
low	63.6	36.4
high	64.7	35.3

Abb. 9: Prozentsätze für die Erkennung von Dringlichkeit (für alle Stimuli)

unterschieden werden. Alternativ würden die Warntöne so verwendet, dass sie nur eine Dringlichkeitsstufe kommunizieren.

Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle, Kraftrad- und Fahrradunfälle im Straßenverkehr 2021
- [2] Atamer, S.; Rosenkranz, R.; Ballantyne, C.; Kuttler, A.; Altinsoy, M.E.: Design and Evaluation of Auditory Warning Sounds for Motorcyclists. Fortschritte der Akustik – DAGA 2023, 49. Jahrestagung für Akustik, Hamburg, S. 514–517, 2023.
https://pub.dega-akustik.de/DAGA_2023/data/articles/000349.pdf
- [3] Fastl, H.; Zwicker, E.: Psychoacoustics – Facts and Models. 3. ed. Springer Verlag, Berlin, 2010.
- [4] Haas, E.C.; Edworthy, J.: Designing urgency into auditory warnings using pitch, speed and loudness. Computing & Control Engineering Journal, vol. 7, no. 4, pp. 193–198, 1996.
- [5] Green, M.: How long does it take to stop? Methodological analysis of driver perception-brake times. Transportation Human Factors, vol. 2, no. 3, pp. 195–216, Sep. 2000.
https://doi.org/10.1207/STHF0203_1 ■

Prof. Dr. M. Ercan Altinsoy
Technische Universität Dresden,
Professur für Akustik und Haptik

Dr.-Ing. Serkan Atamer
Technische Universität Dresden,
Professur für Akustik und Haptik

Dr.-Ing. Robert Rosenkranz
Technische Universität Dresden,
Professur für Akustik und Haptik

Colin Ballantyne
KTM Forschungs & Entwicklungs GmbH, Mattighofen (A)

Alina Kuttler
KTM Forschungs & Entwicklungs GmbH, Mattighofen (A)