

# Sounddesign im Dienste der Wahrnehmbarkeit von leisen Fahrzeugen

Alfred Zeitler<sup>1</sup>, Robert Liebing<sup>1</sup> & Stefan Kerber<sup>2</sup>

<sup>1</sup> BMW Group, Forschungs- und Innovationszentrum, 80788 München, E-Mail: alfred.zeitler@bmw.de

<sup>2</sup> AG Technische Akustik, Technische Universität München

## Einleitung

Im Kontext der Entwicklung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen wird zunehmend auch die Fußgängersicherheit dieser Fahrzeuge diskutiert (vgl. [1]). Das Argument der auditiven Orientierung von Passanten wird dabei gelegentlich mit dem im Sinne des Lärmschutzes formulierten Zieles möglichst niedriger Geräuschemissionen kontrastiert. Es gilt daher zu klären wie die Wahrnehmbarkeit von elektrisch betriebenen Fahrzeugen bei Näherung zu bewerten ist. Erwartungsgemäß dürfte das vergleichsweise niedrige Antriebsgeräusch vor allem bei Geschwindigkeiten bis ca. 20 km/h zu einem niedrigeren Außengeräusch führen, während oberhalb dieses Bereichs die Unterschiede aufgrund des zunehmenden Einflusses des Reifen-Fahrbahn-Geräusches geringer werden.

Zur Lösung des Problems wird u.a. über folgende Maßnahmen nachgedacht:

- Erhöhung des Reifen-Fahrbahngeräusches mittels spezieller Fahrbahnoberflächen
- Einsatz von Sensor- und Radartechnologien im Rahmen von Fahrerassistenzsystemen
- Situativ durch den Fahrer ausgelöste Warnsignale
- Verstärkung des Antriebsgeräusches

Sofern am Antriebsgeräusch angesetzt werden soll, entstehen für das Sounddesign zwei grundsätzliche Fragen. Zum einen gilt es einen Geräuschcharakter zu finden, welcher die geforderte Warnfunktion hinreichend erfüllt und zugleich im Hinblick auf die Lästigkeitswirkung bzw. soziale Akzeptanz auch umweltverträglich ist (Stichwort „Sounddesign“). Zum anderen muss definiert werden, mit welcher Intensität ein solches Geräusch abgestrahlt werden soll, d.h. wie gut die Wahrnehmbarkeit an definierten Messpositionen sein muss. Idealerweise müsste man sich dabei an der Maskierung des Fahrzeuggeräusches durch einen hypothetischen Geräuschhintergrund orientieren.

Aus dieser Betrachtung folgt, dass zur Bewertung der Wahrnehmbarkeit von Außengeräuschen ein Verfahren erforderlich ist, welches auf der Grundlage fundierter psychoakustischer Erkenntnisse beruht. Dies dürfte dann ebenfalls bedeuten, dass die Anwendung des A-Pegels im Sinne eines Mindestwertes nicht zu einem gegenstandsadäquaten Bewertungsergebnis führen dürfte. Neben den hinreichend belegten Unzulänglichkeiten im Hinblick auf die gehörrichtige Messung der Lautstärke (z.B. [2]), hätte ein rein auf dem Schallpegel basierendes Maß auch noch den gravierenden Nachteil, dass die in realen Verkehrssituationen gegebenen Maskierungseffekte nicht berücksichtigt werden.

Vor diesem Hintergrund stellt der von Kerber [3] entwickelte Ansatz zur Bestimmung eines psychoakustischen Maßes auf Basis von Mithörschwellen eine methodische Alternative dar. In diesem Beitrag soll daher über die exemplarische

Anwendung dieses Verfahrens zum Vergleich von Fahrzeugen mit Elektro- und Verbrennungsmotor berichtet werden. Die Ergebnisse sollen Anhaltspunkte für die Einschätzung der Wahrnehmbarkeit von leisen Fahrzeugen liefern und zugleich eine Orientierung für die Entwicklung von akustischen Maßnahmen bieten.

## Psychoakustischer Bewertungsansatz

Abbildung 1 zeigt das Modell zur Vorhersage der akustischen Wahrnehmbarkeit nach Kerber [3], dessen grundlegende Funktionsweise im Folgenden knapp erklärt werden soll. Im linken Zweig des Modells wird aus der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg}$  und dem Schalldruckzeitverlauf der Fahrzeugannäherung  $p_{Fzg}$  der positionsabhängige Pegel am Zuhörerort berechnet. Im rechten Zweig wird in einem ersten Schritt die zeitabhängige Mithörschwelle der Fahrzeugannäherung im gegebenen stationären Hintergrundgeräusch  $p_M$  berechnet. Dazu wird die Fahrzeugannäherung in quasi-stationäre Teile zerlegt, und für jedes dieser Teile eine Mithörschwelle mit einem Verfahren nach Fastl & Zwicker [4] berechnet. Daran anschließend wird diese Mithörschwelle wiederum unter Zuhilfenahme der Fahrzeuggeschwindigkeit in eine ortsabhängige Größe umgerechnet. Gemäß der Definition der Mithörschwelle wird ein Fahrzeug dort hörbar, wo dessen Pegel die Mithörschwelle übersteigt, d.h. dort wo  $L_{F,approx}(s)$  größer  $L_{MHS,approx}(s)$  wird. Ein Fußgänger würde das Fahrzeug an dieser Position hören, allerdings erst nach Ablauf seiner Reaktionszeit auf das Geräusch reagieren.

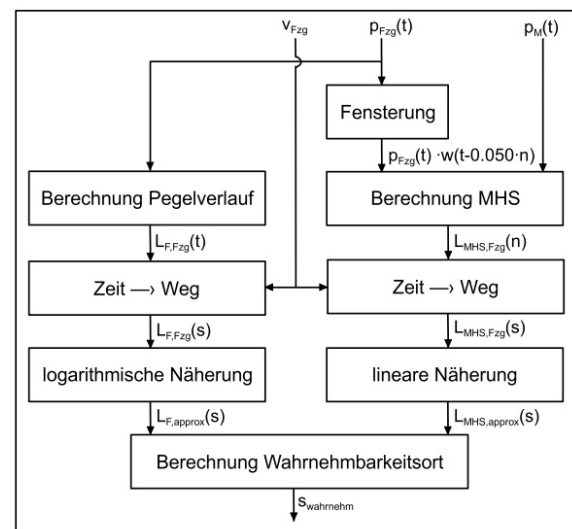


Abbildung 1: Schematischer Ablauf zur Berechnung der akustischen Wahrnehmbarkeit nach Kerber [3].

## Fahrzeuge und Geräuschaufnahmen

Um die Unterschiede in der Wahrnehmbarkeit verschiedener Antriebskonzepte zu untersuchen, wurden auf der Außenge-

räuschmessstrecke von BMW Geräuschaufnahmen von folgenden Versuchsträgern (alle mit Automatikgetriebe) bzw. Antrieben hergestellt:

- Limousine mit 4-Zyl. Ottomotor („VM“)
- Hybrid-Fahrzeug verbrennungsmotorisch (8-Zyl. Otto-Motor; „HVM“)
- Hybrid-Fahrzeug im reinen Elektrobetrieb („HEV“)
- Elektrofahrzeug („BEV“)

Aufgezeichnet wurden Vorbeifahrten bei einer Konstantfahrgeschwindigkeit von 10 km/h (jeweils Fahrstufe D). Der Abstand des Mikrofons zur Fahrbahnmitte betrug 2 m.

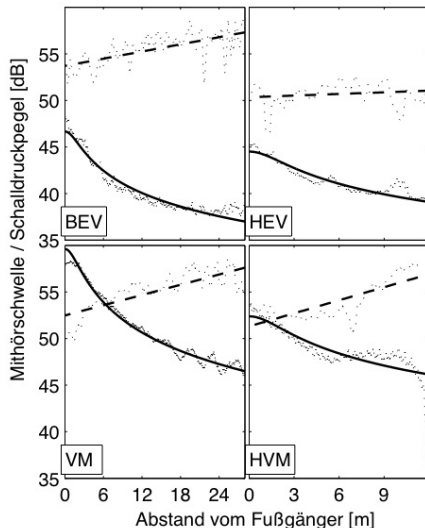
### Maskiererschalle

Zur Simulation einer städtischen Geräuschkulisse wurde eine Geräuschaufnahme mit quasistationärem Charakter verwendet, welche am Stadtrand von München hergestellt worden war. Für die Berechnung der Wahrnehmungsabstände wurde der Pegel dieses Geräusches in vier Stufen zwischen 47 und 62 dB(A) variiert (vgl. Abbildung 3).

### Ergebnisse

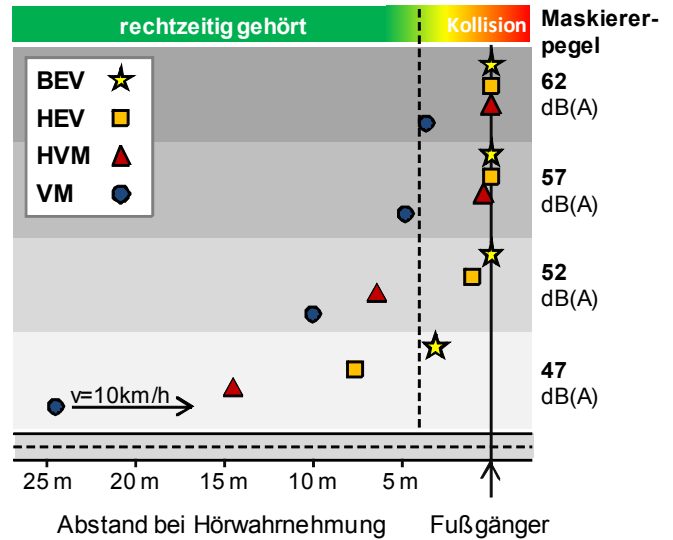
Abbildung 2 zeigt exemplarisch für das Hintergrundgeräusch mit einem Pegel von 57 dB(A), dass die Geräusche der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge (obere Reihe) während der gesamten Annäherung maskiert werden. Hingegen ist das Herannahen der verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeuge (untere Reihe) an der Fußgängerposition hörbar, wobei Fahrzeug VM hier einen deutlichen Abstandsvorteil gegenüber Fahrzeug HVM hat.

Ferner spiegelt der Verlauf der Mithörschwelle erwartungsgemäß die Veränderung des Klangbildes an der Fußgängerposition gehörten Fahrzeuggeräusches wider. Je näher das Fahrzeug kommt, desto besser hebt es sich aufgrund seiner spektralen Eigenschaften vom Hintergrund ab.



**Abbildung 2:** Verlauf von Mithörschwelle (gestrichelte Linie) und Pegel (durchgezogene Linie) über dem Fahrzeugabstand für die vier untersuchten Fahrzeugannäherungen. Die Fahrzeuge werden dort wahrnehmbar, wo der Pegel die Mithörschwelle übersteigt. Passiert dies nicht (obere Graphen) so sind die Fahrzeuge im untersuchten Hintergrundgeräusch unhörbar.

In Abbildung 3 sind die für alle vier Pegelstufen des Hintergrundgeräusches berechneten Wahrnehmungsabstände aller Fahrzeuge zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die elektrisch angetriebenen Fahrzeuge nur bei einem Hintergrundgeräusch mit einem Pegel unterhalb von 47 dB(A) rechtzeitig gehört werden könnten.



**Abbildung 3:** Wahrnehmungsabstände der Fahrzeuge in Abhängigkeit des Maskierpegels. Um eine Kollision vermeiden zu können, muss ein Passant bei mittelschneller Reaktion (vgl. [5]) das herannahende Fahrzeug spätestens in einem Abstand von 3,8 m wahrgenommen haben (gestrichelte Linie).

### Zusammenfassung und Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die durch das Außengeräusch bedingten Unterschiede in der Wahrnehmbarkeit bedeutungsvoll quantifizieren lassen. Das Modell erlaubt definitionsgemäß Vorhersagen für unterschiedliche Hintergrundgeräusche und kann einen wertvollen Beitrag für die differenzierte Bewertung der auditiven Wahrnehmbarkeit von herannahenden Fahrzeugen leisten.

### Literatur

- [1] Whoriskey, P.: The Deadly Silence of the Electric Car. The Washington Post (23.9.2009).
- [2] Hellmann, R.; Zwicker, E.: Why can a decrease in dB(A) produce an increase in loudness? J. Acoust. Soc. Am. 82: 1700-1705 (1987).
- [3] Kerber S.: Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen in Hintergrundgeräuschen: Psychoakustische Beurteilungen und modellbasierte Prognosen. Verlag Dr. Hut, München (2008).
- [4] Fastl, H.; Zwicker, E.: Psychoacoustics. Facts and models. 3rd Edition, Springer Berlin Heidelberg New York (2007).
- [5] Green, M.: How long does it take to stop? Methodological analysis of driver perception-brake times, Transportation human factors, 2(3): 195-216 (2000).