Untersuchung der Richtungsortung von akustischen Warneinrichtungen für bevorrechtigte Wegebenutzer im Innenraum von Kraftfahrzeugen

Matthias Mändl

Labor für Akustik und Schallanalyse, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden,
E-Mail: m.maendl@oth-aw.de

Einleitung

Im Straßenverkehr kommt es immer wieder zu Unfällen, an denen bevorrechtigte Wegebenutzer mit eingeschalteten akustischen Warneinrichtungen (z.B. „Martinshorn“) beteiligt sind, die ursächlich mit der zu späten oder nicht vorhandenen Wahrnehmung der Warneinrichtung zusammenhängen. Auffallend ist, dass solche Unfallereignisse meistens mit Kraftfahrzeugen und nur sehr selten mit Fußgängern oder Fahrradfahrern dokumentiert sind [1], was auf den akustischen Einfluss der Fahrgastzelle im Zusammenspiel mit den Störschallquellen des Fahrzeugs (Motor, Fahrgeräusch, Gebläse, Radio etc.) schließen lässt. Für manches Unfallgeschehen entscheidend ist aber nicht nur die rechtzeitige Wahrnehmung des Warnsignals sondern auch dessen korrekte akustische Ortung durch den Fahrzeugführer. Dies dürfte gerade in modernen Fahrzeugen mit zunehmender Fahrgeräuschdämpfung nach außen und hohem Diffusschallanteil durch schallharte Grenzflächen im Innenraum und damit verbundenen mehrfachen Schallreflexionen schwierig sein [2]. Hinzu kommt, dass das menschliche Gehör nur sehr unzureichend in der Lage ist, Geräuschquellen mit schmalbandigem Frequenzspektrum zu lokalisieren [3][4]. Bei diesem Projekt soll deshalb mit Hilfe von Hörversuchen die Fähigkeit von Fahrzeuglenkern zur akustischen Lokalisierung von Warnsignalen im Innenraum von verschiedenen Kraftfahrzeugen untersucht werden.

Versuchsaufbau

Abbildung 1 zeigt schematisch den Versuchsaufbau für die Hörversuche mit den kreisförmig um das Versuchsfahrzeug angeordneten acht Lautsprechern. Das aufgenommene Warnsignal (Hella RTK7 „Landsignal“) wurde den Versuchspersonen mit 7s Dauer und 5s Pause je viermal aus jedem Lautsprecher präsentiert. Um Seriationseffekte zu vermeiden, erfolgte die Verteilung auf die Richtungen zufällig nach dem Prinzip von lateinischen Quadraten. Es wurden 3 verschiedene Fahrzeuge (VW T5, BMW 3er Touring, Opel Corsa) mit je 25 Versuchspersonen untersucht. Jeder Versuchsperson wurde das Signal aus jeder Richtung viermal in zwei verschiedenen Lautstärken (75 und 80 dB(A) außen am Fahrzeug) präsentiert. Die vermutete Signalrichtungsangabe erfolgte durch die VP per Eingabemaske auf einem Tablet-PC.

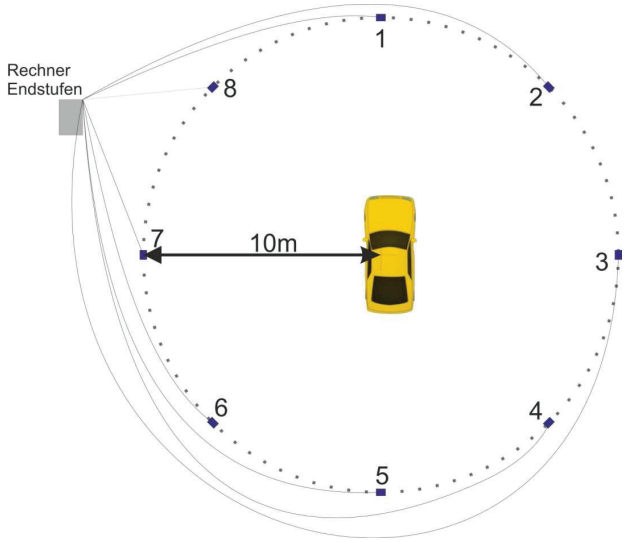

Abbildung 1: Versuchsaufbau für die Hörversuche

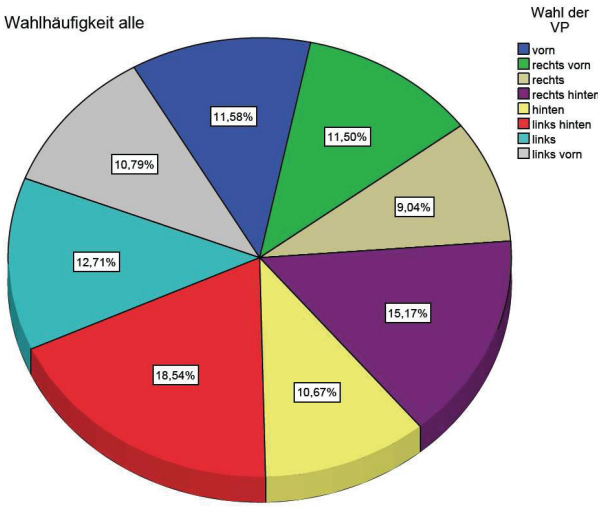

Abbildung 2: Verteilung der Richtungsaussagen der VP

Ergebnisse Hörversuche

Abbildung 2 zeigt die Verteilung der Richtungsaussagen aller Versuchspersonen. Die Ungleichverteilung ist statistisch signifikant bei einem Signifikanzniveau von 0,05. Zum Beispiel wird der Lautsprecher links hinten doppelt so oft genannt wie die Richtung rechts. Die Richtungen schräg nach hinten wurden deutlich häufiger gewählt als alle anderen, obwohl alle Richtungen gleich oft (300 mal = 12,5%) angespielt worden waren.

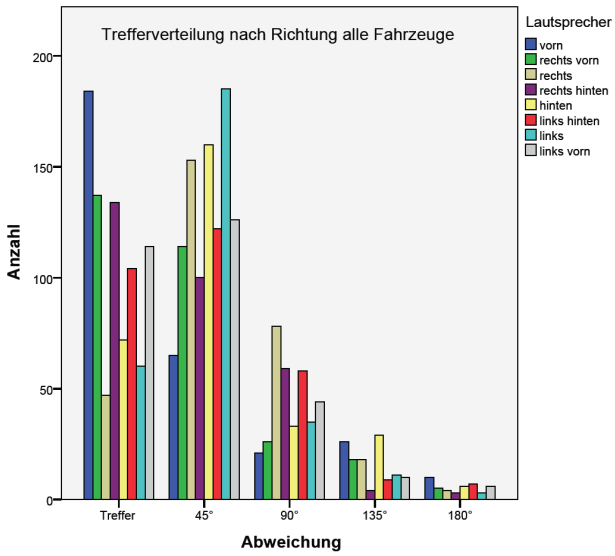

Abbildung 3: Verteilung von Treffer und Abweichungen für alle drei Fahrzeuge

Abb. 3 zeigt ein Histogramm der Treffer und Abweichungen für alle Versuche für jede Richtung. Es ist zu erkennen, dass Abweichungen von 45° häufiger auftreten als Treffer, größere Abweichungen aber eher selten sind und erwartungsgemäß mit zunehmender Abweichung abnehmen. Insgesamt kann eine grobe Richtungserkennung festgestellt werden. Allerdings sind die Fehlortungen sehr stark richtungsabhängig. Während das Signal von vorne kommend häufig richtig geortet wurde, werden besonders die Richtungen querab nur selten richtig erkannt. Beim Lautsprecher rechts (Balken beige) ist eine Fehlortung von 90° sogar wahrscheinlicher als ein Treffer. Bei den seitlichen Lautsprechern ist zudem eine klare Tendenz nach hinten zu erkennen, das Signal von hinten wird häufiger als von links hinten kommend geortet.

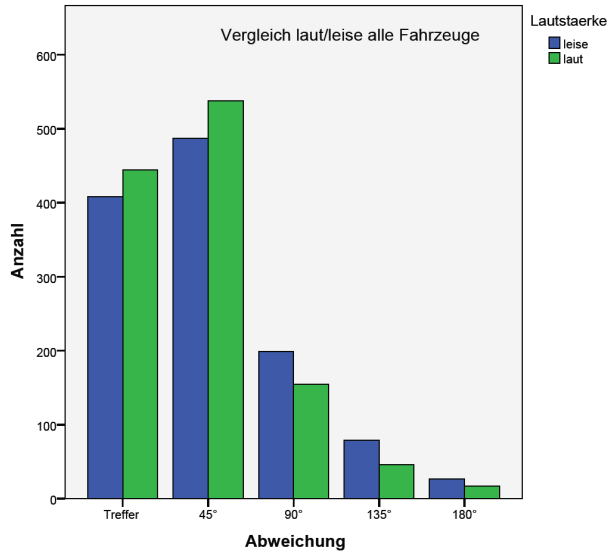

Abbildung 4: Vergleich der Verteilung von Treffer und Abweichungen für die beiden Signallautstärken 75 und 80 dB(A) außen am Fahrzeug

Abbildung 4 zeigt einen Vergleich der Trefferverteilung für die beiden verschiedenen Lautstärken der dargebotenen Signale. Erwartungsgemäß ist die Trefferquote beim lauteren Signal höher und Fehlortungen mit Abweichungen von mehr als 45° seltener als beim leiseren Signal.

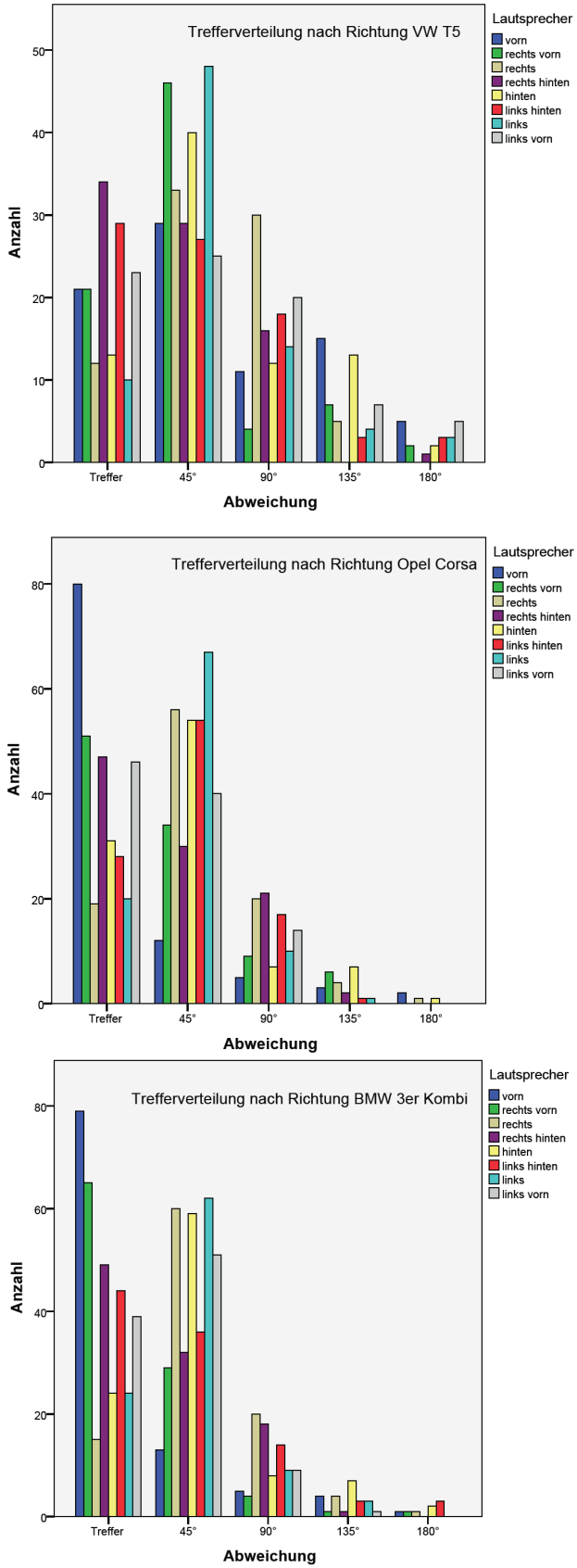

Abbildung 5: Vergleich der Verteilung von Treffer und Abweichungen bei den drei Fahrzeugen

Vergleicht man die Trefferverteilungen der Fahrzeuge untereinander (Abb. 5) ist festzustellen, dass sich die beiden kleineren Fahrzeuge sehr ähnlich sind, der Kleinbus jedoch eine deutlich schlechtere Richtungsortung ermöglicht.
Um die Ergebnisse der Hörversuche in den einzelnen Fahrzeugen besser untereinander und mit den im nächsten Abschnitt beschriebenen Innenraummessungen vergleichen zu können, wurde für jede Richtung und jedes Fahrzeug getrennt die mittlere Winkelabweichung der Richtungsaussagen der Versuchspersonen vom Sollwert (= Richtung) bestimmt (Abb. 6):

$$\overline{\Delta\alpha}(Richtung, Fzg.) - \frac{1}{100}\sum_{i=1}^{100}|Richtung(i) - Richtungsangabe(i)|$$

Man erkennt eine deutlich schlechtere Ortung bei allen Richtungen im Kleinbus, während sich Kleinwagen und Mittelklassekombi kaum unterscheiden. Signale von hinten, links und rechts querab werden bei allen Fahrzeugen mit den größten Abweichungen also am schlechtesten lokalisiert, während Signale von vorne und rechts hinten am genauesten geortet werden.

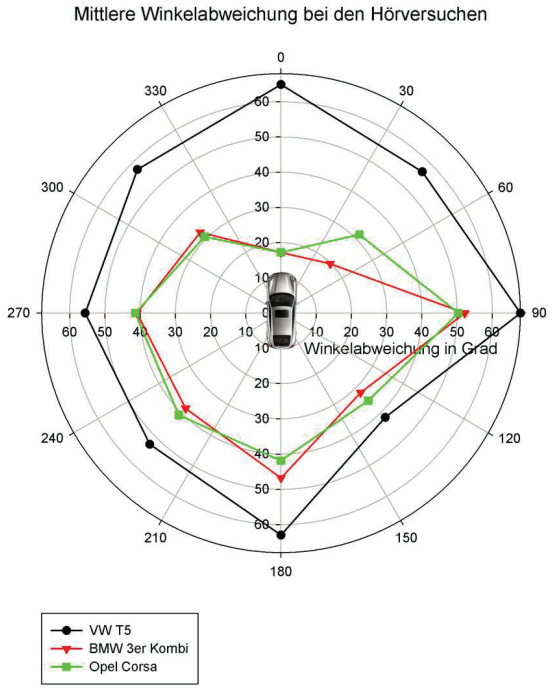

Abbildung 6: Polardiagramm der mittleren Winkelabweichung der Hörversuche bei den verschiedenen Fahrzeugen

Ergebnisse Messungen

Abbildung 7 zeigt die mit einem Kunstkopfmesssystem an Fahrerposition über 5 Wechseltonperioden gemittelten äquivalenten Dauerschallpegelspektren des Warnsignals bei Fzg.1 für die verschiedenen Richtungen. Die Grundtöne des Signals (360 und 480 Hz) treten bei diesem Fahrzeug - wahrscheinlich auf Grund des hohen Daches - bei manchen Richtungen bereits am Außenmikrofon kaum in Erscheinung. Die Obertöne des Signals über 4 kHz werden durch die Karosserie fast vollständig gedämpft, es dominieren die Harmonischen zwischen 2 und 3 kHz. Zum Teil treten in einzelnen Frequenzbändern erhebliche binaurale Pegelunterschiede von bis zu 15 dB auf (z.B. Richtung von hinten bei ca. 1450 Hz.). Bei den anderen beiden Fahrzeugen sind die Messergebnisse ähnlich.

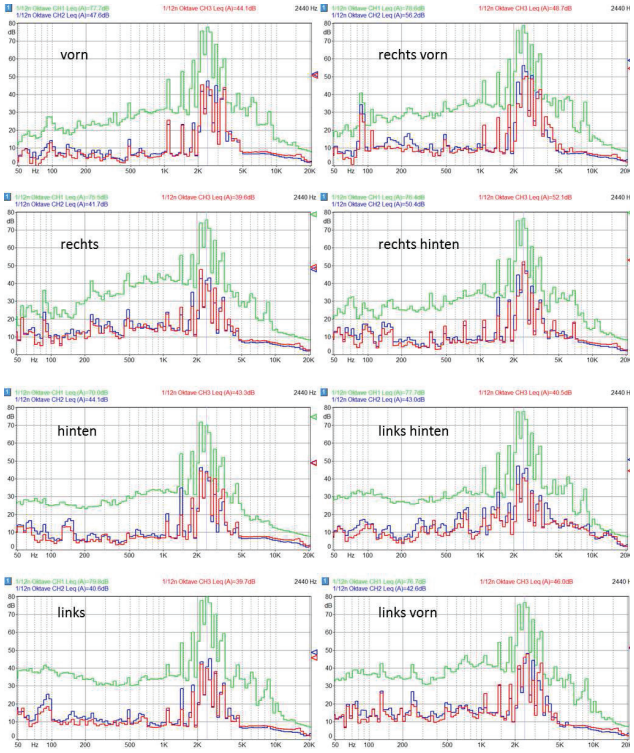

Abbildung 7: Warnsignalspektren in Fzg.1 (grün: Außenmikrofon über dem Dach, blau: Kunstkopf links, rot: Kunstkopf rechts)

Einer der wichtigsten Einflussfaktoren beim Richtungshören ist der inter- oder binaurale Pegelunterschied $\Delta L(Richtung)$ zwischen den beiden Ohren ([5] [6]). Er wurde für jede Signalrichtung aus den über 7s gemittelten, am Kunstkopf an Fahrerposition gemessenen äquivalenten Dauerschallpegeln nach folgender Vorschrift bestimmt:

$$\Delta L(vorn, hinten) = |L_{eq}(KK\ links) - L_{eq}(KK\ rechts)|$$

$$\Delta L(vorn\ rechts, rechts, hinten\ rechts) = L_{eq}(KK\ rechts) - L_{eq}(KK\ links)$$

$$\Delta L(vorn\ links, links, hinten\ links) = L_{eq}(KK\ links) - L_{eq}(KK\ rechts)$$

Für eine korrekte Ortung sollten die Pegeldifferenzen für Signale von vorn und hinten möglichst klein sein. Positive ΔL ergeben sich nach dieser Vorschrift, wenn das dem Signal zugewandte Ohr einen höheren Pegel registriert als das abgewandte, negative, wenn das Signal am abgewandten Ohr lauter ist.
Die Abbildung 8 zeigt beispielhaft die so berechneten Pegelunterschiede im Vergleich zu den Ergebnissen aus den Hörversuchen. Zur besseren Darstellung wurden die mittleren Winkelabweichungen aus den Hörversuchen durch 10 geteilt. Es fällt auf, dass die Signalrichtung „vorn rechts“ (45°) bei allen Fahrzeugen negative Pegeldifferenzen an der Fahrerposition erzeugt, d.h. das Signal ist am linken Ohr lauter als am rechten. Hier spielt vermutlich die Schallreflexion an der Seitenscheibe nahe am linken Ohr eine entscheidende Rolle. Dies wird unterstützt durch die Tatsache, dass Signale von links fast immer positive Differenzen ergeben. Trotzdem ist die mittlere Abweichung bei Signalen von links nicht signifikant kleiner als von rechts, was den Schluss zulässt, dass die interaurale Pegeldifferenz bei der Lokalisierung von Geräuschen im Innenraum von Fahrzeugen keine große Rolle spielt.

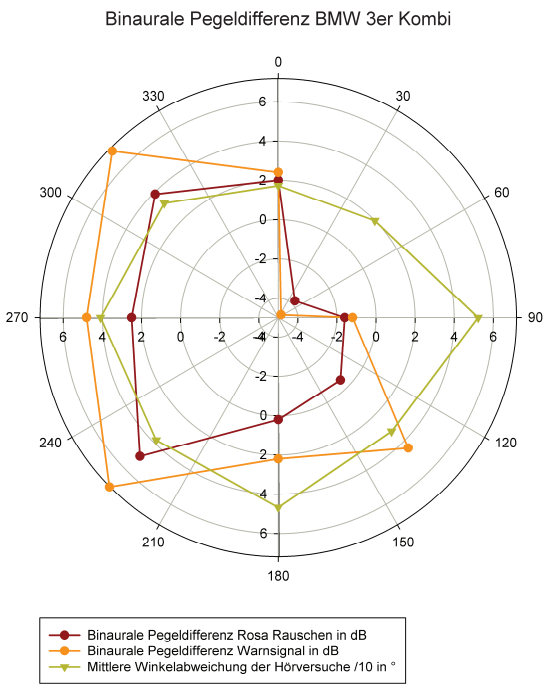

Abbildung 8: Am Kunstkopf gemessene interaurale Pegeldifferenzen ΔL und Ortungsabweichung aus den Hörversuchen bei Fzg.2

Auch die Trefferverteilung ist für Signale aus der linken Hemisphäre trotz günstiger Pegeldifferenz nicht besser als für Schall von rechts. Lediglich die Häufigkeit mit der Lautsprecher aus der linken Hemisphäre genannt wurden (Abb. 2) ist mit 42% größer als aus der rechten (36%). Hinzu kommt, dass den Versuchspersonen bei den Hörversuchen nicht verboten wurde, zur besseren Ortung den Kopf zu drehen um ein möglichst realistisches Ergebnis zu bekommen. Viele machten davon auch Gebrauch, sodass die statisch mit dem Kunstkopf gemessene Pegeldifferenz mit den Hörversuchen wenig korrelieren kann.
Offensichtlich müssen andere Mechanismen des Richtungshörens hinzukommen, welche die Quellenortung in diesem Fall ermöglichen. In Frage kommen interaurale Laufzeitunterschiede (Präzedenzeffekt, Gesetz der ersten Wellenfront) oder die richtungsabhängige Filterung der Signale durch Ohrmuschel, Kopf und Körper also die aus der Literatur [6] bekannte kopfbezogene Übertragungsfunktion (HRTF, Head Related Transfer Function).

Zusammenfassung

- Die Richtungsaussagen der Versuchsteilnehmer bei den Hörversuchen ist nicht gleichverteilt, es besteht eine Tendenz nach hinten
- Die Treffer – und Abweichungsverteilung hängt von der Einfallsrichtung des Schalls ab, Signale von der Seite (90°) werden besonders schlecht lokalisiert, Signale von vorn besonders gut
- Lautere Signale werden besser geortet als leisere
- Die Treffer – und Abweichungsverteilung hängt vom Fahrzeug ab: Im Kleinbus ist die Ortung deutlich schlechter als in den kleineren Fahrzeugen
- Die akustische Dämpfung der Fahrzeugkarosserie ist richtungs-, frequenz- und fahrzeugabhängig
- Das Warnsignal wird durch Reflexion, Absorption und Interferenz des Schalls im Fahrzeuginnenraum erheblich verzerrt
- Es treten falsche binaurale Pegeldifferenzen auf
- Die statisch (ohne Kopfbewegung) gemessene interaurale Pegeldifferenz an der Fahrerposition trägt nicht zur Richtungsortung bei

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Studie wurden mit Versuchspersonen unter Versuchsbedingungen erzielt. Die Versuchspersonen waren auf die Signaleinwirkung vorbereitet, unabgelenkt und darauf konzentriert, das Signal richtig zu orten. Im Fahrzeug und auch von außerhalb gab es praktisch keine Nebengeräusche. Akustisch herrschten im Außenraum annähernd Freifeldbedingungen.
Die korrekte Lokalisierung eines herannahenden, ein akustisches Warnsignal führenden Fahrzeugs allein aufgrund der auditorischen Information ist im Innenraum von Fahrzeugen in realen Verkehrssituationen als eher unwahrscheinlich zu betrachten. Die Ergebnisse implizieren insbesondere, dass der Führer eines Fahrzeugs mit Wegerecht gerade bei typischen Kreuzungssituationen keinesfalls davon ausgehen darf, dass er aufgrund des Warnsignals vom Querverkehr richtig geortet wird. Erst wenn eindeutiger Sichtkontakt besteht, sollte das Wegerecht ausgeübt werden. Die akustische Warneinrichtung ist nur dazu geeignet, Aufmerksamkeit bei den Verkehrsteilnehmern zu erregen. Die Lokalisierung eines bevorrechtigten Fahrzeugs kann mit ausreichender statistischer Sicherheit nur visuell erfolgen.

Literatur

[1] Golder: Unfälle mit Fahrzeugen mit Sonderrechten, VRR 9/2008

[2] Carl Q. Howard, Aaron J. Maddern and Elefterios P. Privopoulos: Acoustic Characteristics for Effective Ambulance Sirens; Vol. 39 August (2011) No. 2 Acoustics Australia

[3] Deborah J. Withington: Localisable Alarms, Extract from Human Factors in Auditory Warnings – Edited by Neville A Stanton & Judy Edworthy, Published by Ashgate Publishing Ltd 1999

[4] Blauert, J.: Spatial Hearing, Cambridge, MA: MIT Press. (1997)

[5] Hugo Fastl, Eberhard Zwicker: Psychoacoustics – Facts and Models, Springer, 2007

[6] J. Hellbrück, W. Ellermeier: Hören, Hogrefe Verlag, Göttingen 2004