

# Untersuchung der Richtungs- ortung von akustischen Warneinrichtungen für bevorrechtigte Wege- benutzer im Innenraum von Kraftfahrzeugen

(Best Project 2014)

## Zusammenfassung

Mithilfe von Hörversuchen wurde die Fähigkeit zur akustischen Richtungs-ortung von Warnsignalen bevorrechtigter Wegebenutzer im Innenraum von Personenkraftwagen untersucht. Die Hörversuche an 75 Versuchspersonen in drei verschiedenen Fahrzeugen wurden statistisch ausgewertet und mit Messungen der die akustische Lokalisierung von Geräuschen bestimmenden auditorischen Parameter verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Führer eines Fahrzeugs mit Wegerecht gerade bei typischen Kreuzungssituationen keinesfalls davon ausgehen darf, dass er nur aufgrund des Warnsignals vom Querverkehr richtig geortet wird.

## Abstract

Listening experiments were used to assess the ability to localize acoustic warning signals of privileged road users in vehicle interiors. The listening tests, conducted with 75 test subjects in three different vehicles, were statistically evaluated and compared with measurements of the auditory parameters, that determine sound localization. The results suggest, that a privileged car driver with right-of-way cannot expect to be accurately localized by the crossing traffic at a typical intersection situation just because of the warning

## 1 Einführung

### 1.1 Ausgangssituation

Im Straßenverkehr kommt es immer wieder zu Unfällen, an denen bevorrechtigte Wegebenutzer mit eingeschalteten akustischen Warneinrichtungen (z. B. „Martins-horn“) 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 [Golder], 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 [Howard]. Hinzu kommt, dass das menschliche Gehör nur sehr unzureichend in der Lage ist, Geräuschquellen mit schmalbandigem Frequenzspektrum zu lokalisieren [Withington][Blauert].

Bei diesem Projekt soll deshalb mithilfe von Hörversuchen die Fähigkeit von Fahrzeuglenkern zur akustischen Lokalisierung von Warnsignaleinrichtungen im Innenraum von verschiedenen Kraftfahrzeugen untersucht werden.

### 1.2 Räumliches Hören

Räumliches Hören bzw. die akustische Ortung von Schallquellen im Raum beruht im Wesentlichen auf 3 Faktoren:

- dem inter- oder binauralen Pegelunterschied
- interauralen Laufzeit- oder Phasenunterschieden
- Verzerrungen des Schallsignals durch Ohrmuschel, Kopf und Körper

Binaurale Pegelunterschiede können vom Gehör nur wahrgenommen werden, wenn die Wellenlänge des Schalleignisses kleiner als der Kopf ist, was ab Frequenzen von etwa 2 kHz der Fall ist [Hellbrück].

Die beiden ersten Faktoren spielen vor allem im akustischen Freifeld und in der Azimutalebene eine dominierende Rolle. Im diffusen Schallfeld und in der Medianebene dagegen wird der Einfluss von Ohr, Kopf und Oberkörper wichtiger [Böck][Hellbrück][Blauert].

Die Winkelgenauigkeit, mit der eine Schallquelle in der Azimutalebene lokalisiert werden kann, hängt von der Einfallsrichtung und der Schallart ab. Sinustöne von vorne können auf  $1\text{--}2^\circ$  genau geortet werden. Seitlich einfallende Töne auf  $\pm 10^\circ$  und Töne von hinten auf  $\pm 5^\circ$  [Fast]. Bei schmalbandigen Signalen, wie sie auch von Warnsignaleinrichtungen kommen, tritt außerdem häufig der Effekt der Inversion auf: Eine vorne liegende Schallquelle wird fälschlicherweise aus einer an der Achse zwischen den beiden Ohren gespiegelten Richtung von hinten wahrgenommen. Beispiel: Durch den Inversionseffekt wird ein Schall statt aus  $30^\circ$  von schräg vorne aus  $150^\circ$  von schräg hinten kommend wahrgenommen [Fast].

### 1.3 Signalgewinnung [FHVR]

Die bei den Hörversuchen verwendeten Warnsignale wurden unter annähernd Freifeldbedingungen an der FHVR aufgenommen und akustisch vermessen. Gemessen wurden verschiedene, an unterschiedlichen Fahrzeugen verbaute Warnanlagen [FHVR]. Das für die Hörversuche letztendlich verwendete Signal stammt von einer Warnanlage der Fa. Hella, Modell RTK7, verbaut in einem uniformierten BMW 3er Touring, Erstzulassung: März 2012 (Abbildung 1).



Abbildung 1: Versuchsanordnung zur Messung und Aufnahme der verwendeten Warnsignale

### Signalkette

Abbildung 2 zeigt schematisch den Versuchsaufbau für die Hörversuche mit den kreisförmig um das Versuchsfahrzeug angeordneten acht Lautsprechern.

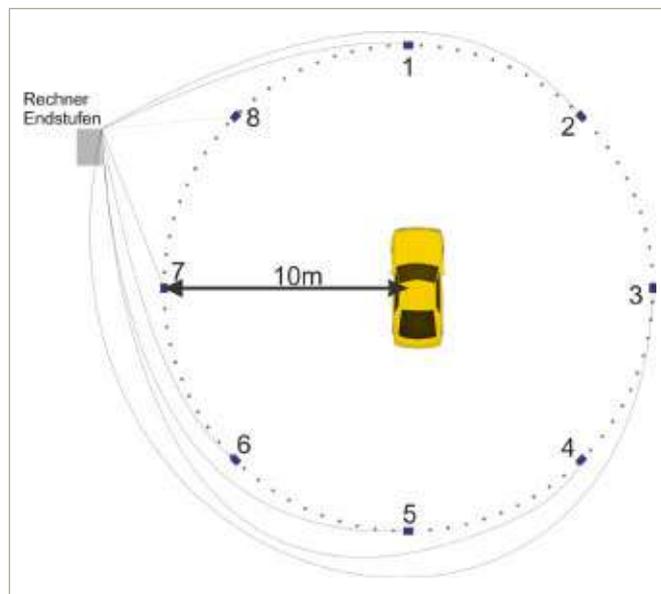


Abbildung 2: Versuchsaufbau Hörversuche schematisch

Das aufgenommene Warnsignal wurde mithilfe der Software LogicX zu sogenannten „Songs“, bestehend aus 16 identischen Warnsignalen mit 7 s Dauer und 5 s Pause, die auf die 8 Lautsprecherkanäle zufällig verteilt wurden, zusammengestellt. Um Seriationseffekte zu vermeiden, erfolgte die Verteilung nach dem Prinzip von zufällig generierten lateinischen Quadraten.

Die Pegelunterschiede der einzelnen Boxen wurden nach der Einmessung der Lautsprecher vor Ort an jedem Versuchstag noch einmal abgeglichen, damit alle den gleichen Schalldruckpegel aufwiesen. Die Unterschiede ergeben sich dabei durch die einzelnen Kanäle der Verstärker, aber auch durch unterschiedliche Längen der Lautsprecherkabel.

Ebenso wurden die zuvor im Labor entzerrten Lautsprecher an jedem Versuchstag noch einmal einzeln vor Ort entzerrt.

### 1.5 Messaufbau

Die Schallmessungen fanden am Versuchsort jeweils vor Beginn der Hörversuche statt. Gemessen wurde bei jedem Fahrzeug mit einem Außenmikrofon 20 cm über dem Fahrzeugdach an der Fahrerposition und mit einem Kunstkopfmesssystem am Fahrersitz (Abbildung 3). Bei den Messungen wurde zunächst aus jedem der acht Lautsprecher ein Rosa Rauschen abgespielt und anschließend das Warnsignal.



Abbildung 3: Messaufbau an Fzg. 2, aus [FHVR]

## 1.6 Versuchsablauf [FHVR]

Im Mittelpunkt des Kreises befindet sich die auf dem Fahrersitz eines Personenkraftwagens sitzende Versuchsperson (VP). Der Kreis fasst einen Durchmesser von 20 Metern. Auf der Kreislinie befinden sich 8 zum Kreismittpunkt ausgerichtete koaxiale Lautsprecherboxen (Abbildung 4).



Abbildung 4: Lautsprecheranordnung und Versuchsfahrzeug 2, aus [FHVR]

Die Lautsprecherboxen sind im 45°-Winkel angeordnet und wurden mithilfe eines Theodoliten ausgerichtet. Bei dem übertragenen Signal handelt es sich um die Aufnahme des Landsignals der RTK7-Warkeinrichtung der Fa. Hella. Das Signal wird pro Versuchsperson in zwei Lautstärken von 75 dB(A) und 80 dB(A) – gemessen über dem Autodach – abgespielt. Pro Lautstärke wird jede Lautsprecherbox in zufälliger Reihenfolge zweimal angesteuert. Die Versuchsperson hört insgesamt 32 Sequenzen von je 7 Sekunden Dauer. Nach jeder Sequenz hat die Versuchsperson 5 Sekunden Zeit die wahrgenommene Richtung in einen Tablet Computer mit Touchscreen einzugeben (Abbildung 5). Die eingegebenen Richtungen werden vom Eingabeprogramm in Zahlen von 1 bis 8 codiert (1=vorne, im Uhrzeigersinn umlaufend) und in einer Textdatei gespeichert, die zur Auswertung in das Statistikprogramm SPSS eingelesen und mit den in den Songs festgelegten Lautsprecherabfolgen verglichen werden kann.



Abbildung 5: Eingabemaske auf dem Tablet Computer

Die 75 Versuchspersonen (25 für jedes Fahrzeug) rekrutierten sich im Wesentlichen aus Personal und Auszubildenden der FHVR und waren zwischen 21 und 54 Jahre alt. 15 Personen waren weiblich.

## 2 Ergebnisse

### 2.1 Hörversuche

Die statistischen Auswertungen und grafischen Darstellungen der Ergebnisse der Hörversuche wurden mit dem Programm IBM SPSS Statistics Vers. 22 erstellt.

#### 2.1.1 Alle Fahrzeuge

Zunächst sollen die Ergebnisse der statistischen Auswertungen aller Versuche ohne Unterscheidung der Fahrzeugtypen dargestellt werden, um allgemeine Aussagen über die Ortbarkeit des Warnsignals machen zu können. Zur Auswertung kamen 75 Versuchspersonen, denen je 32-mal das Signal mit zwei verschiedenen Lautstärken (75 und 80 dB(A) gemessen außen am Fahrzeugdach über der Fahrerposition) aus einem der acht Lautsprecher vorgespielt wurde (2400 Signale). Dabei wurde jeder Lautsprecher mit Ausnahme von LS 1 (vorn, 306-mal) und LS 7 (links, 294-mal) wegen eines Fehlers im Versuchsablauf gleich oft (300-mal) angesteuert.

Abbildung 6 zeigt die Verteilung der Richtungsangaben 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 angespielt worden waren. Dieser Befund lässt sich möglicherweise mit dem in 1.2 beschriebenen Inversionseffekt erklären. Eine genaue Analyse der Verteilung der Fehlortungen für

jeden Lautsprecher bestätigte jedoch nur für die Richtung links vorn eine Tendenz nach der gespiegelten Richtung links hinten – für die Richtung rechts vorn dagegen nicht.

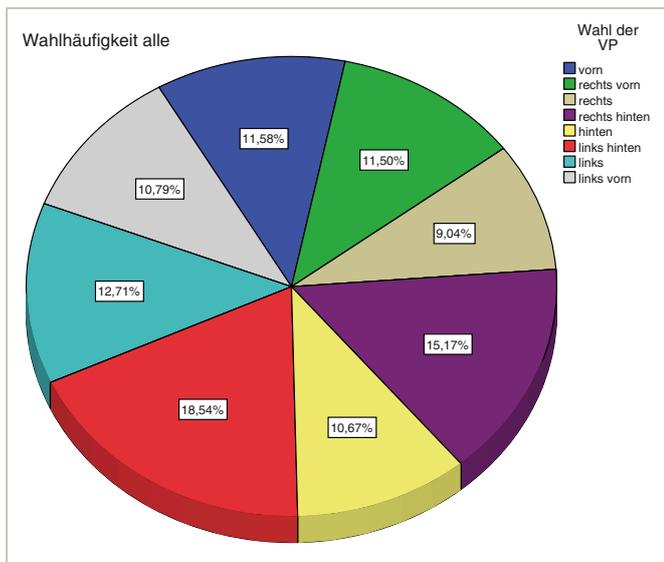


Abbildung 6: Verteilung der Richtungsangaben bei allen Versuchen

Abbildung 7 zeigt das Streudiagramm zwischen dem tatsächlich angespielten Lautsprecher und der Richtungsangabe der Versuchspersonen. Treffer befinden sich auf der Bilddiagonale (blau). Die Breite der Balken ist ein Maß für die Wahlhäufigkeit. Man erkennt, dass korrekte Ortungen und Abweichungen von 45° überwiegen.

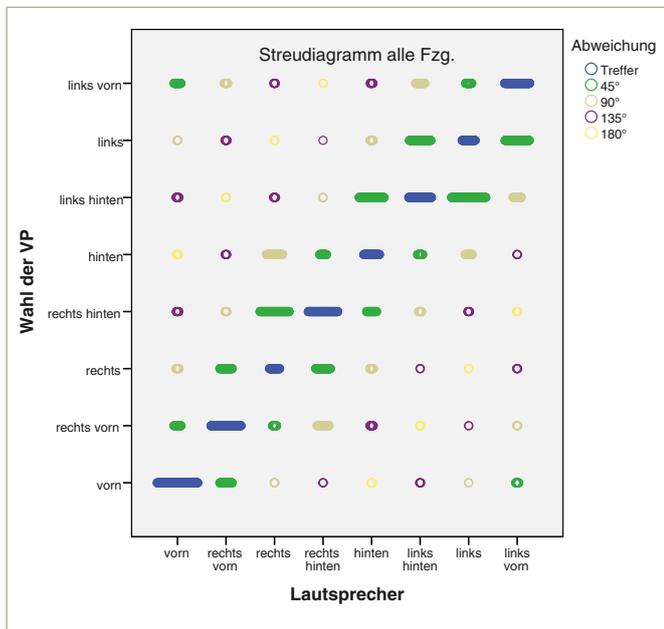


Abbildung 7: Streudiagramm der Richtungsangaben

Abbildung 8 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.

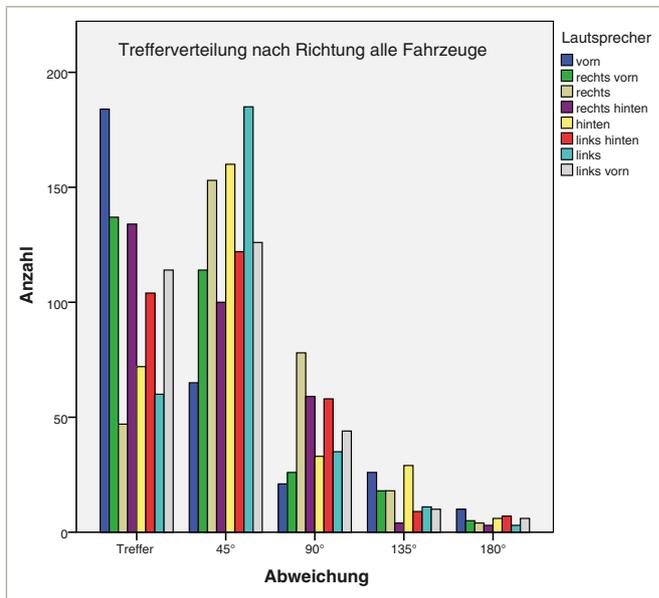


Abbildung 8: Treffer- und Abweichungsverteilung für alle Versuche

Abbildung 9 zeigt einen Vergleich der Trefferverteilung für die beiden verschiedenen Lautstärken der dargebotenen Signale. Erwartungsgemäß ist die Trefferquote beim lauterem Signal höher und Fehlortungen mit Abweichungen von mehr als 45° seltener als beim leiserem Signal. Die Pegelangaben beziehen sich auf die Lautstärke außen über dem Fahrzeug.

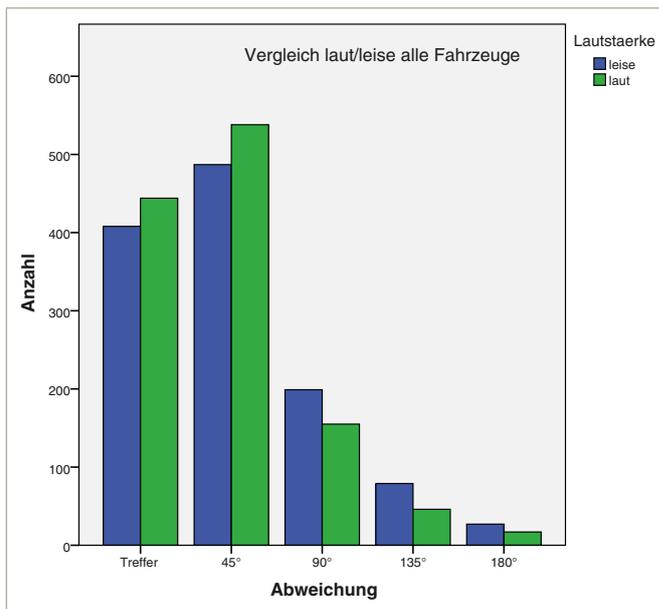


Abbildung 9: Vergleich der Trefferverteilung zwischen lautem und leisem Signal bei allen drei Fahrzeugen

## 2.1.2 VW T5



Abbildung 10: Fahrzeug 1, VW T5

Abbildung 11 zeigt die Verteilung der Richtungsangaben der Versuchspersonen. Die Ungleichverteilung ist statistisch signifikant bei einem Signifikanzniveau von 0,05. Auch hier wurden die Richtungen schräg nach hinten deutlich häufiger gewählt, obwohl alle Lautsprecher gleich oft angespielt worden waren.

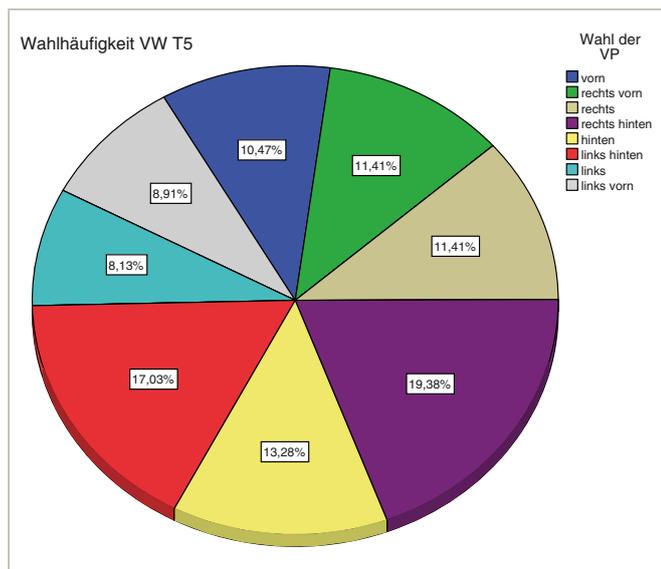


Abbildung 11: Verteilung der Richtungsangaben bei Fahrzeug 1 (VW T5)

Abbildung 12 zeigt die Verteilung von Treffern und Abweichungen bei den Hörversuchen mit Fahrzeug 1 (VW T5). Hier überwiegen bei fast allen Richtungen – außer von hinten rechts – die Fehlortungen um 45°. Der Lautsprecher rechts wird sogar am häufigsten mit einer Abweichung von 90° falsch lokalisiert.

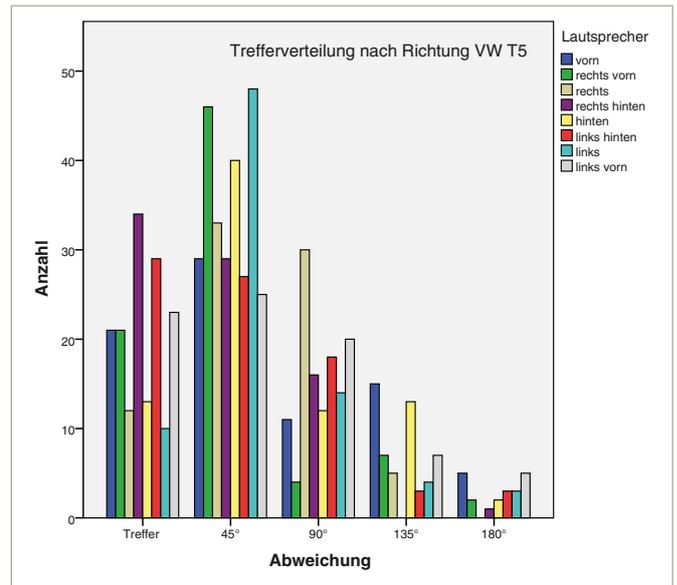


Abbildung 12: Treffer- und Abweichungsverteilung VW T5

Vergleicht man die Trefferverteilung bei lautem und leisem Signal, ergibt sich für Fzg. 1 eine fast identische Verteilung wie bei allen Fahrzeugen (Abbildung 13).

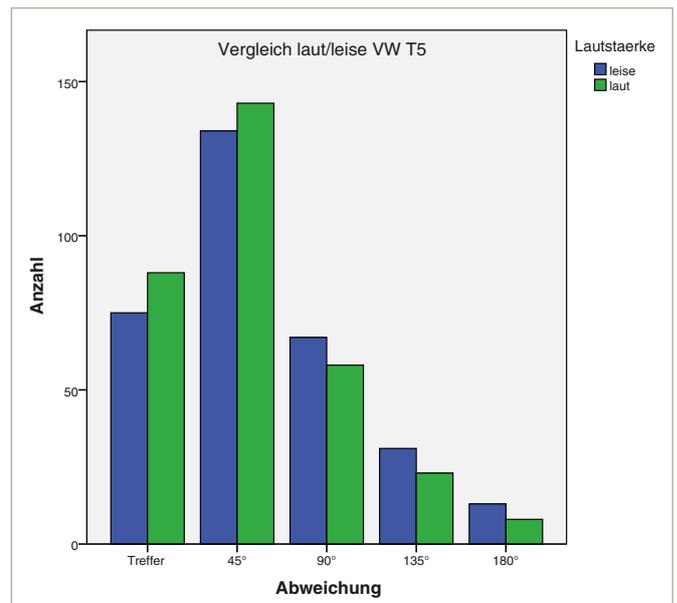


Abbildung 13: Vergleich der Trefferverteilung zwischen lautem und leisem Signal bei Fzg. 1 (VW T5)

## 2.1.3 BMW 3er Kombi



Abbildung 14: Fahrzeug 2, BMW 3er-Reihe Kombi

Abbildung 15 zeigt die Verteilung der Richtungsangaben der Versuchspersonen. Die Ungleichverteilung ist auch bei diesem Fahrzeug statistisch signifikant bei einem Signifikanzniveau von 0,05. Auch hier wurden die Richtungen schräg nach hinten deutlich häufiger gewählt, obwohl alle Lautsprecher gleich oft angespielt worden waren. Im Vergleich zu Fzg. 1 ist hier eine Lokalisierungstendenz nach links zu erkennen.

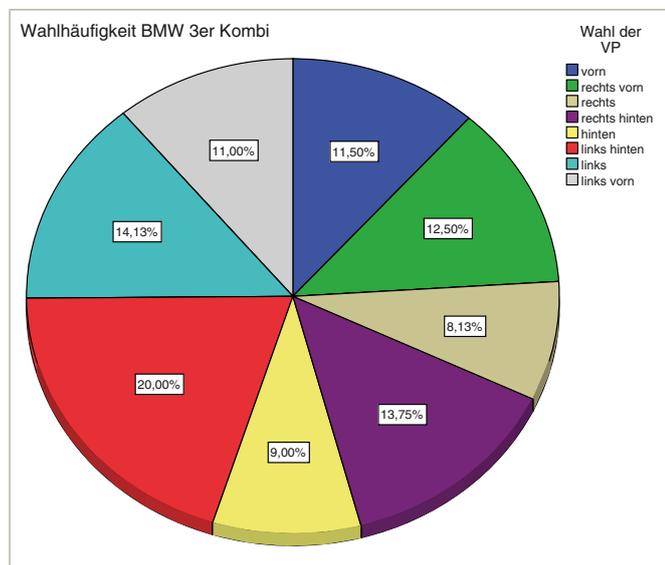


Abbildung 15: Verteilung der Richtungsangaben bei Fahrzeug 2 (BMW 3er)

Abbildung 16 zeigt die Verteilung von Treffern und Abweichungen bei den Hörversuchen mit Fahrzeug 2 (BMW 3er). Hier zeigt sich im Vergleich zu Fzg. 1 eine deutlich höhere Trefferquote, insbesondere beim Signal von vorne. Die seitlichen Lautsprecher werden hier am häufigsten mit einer Abweichung von 45° lokalisiert.

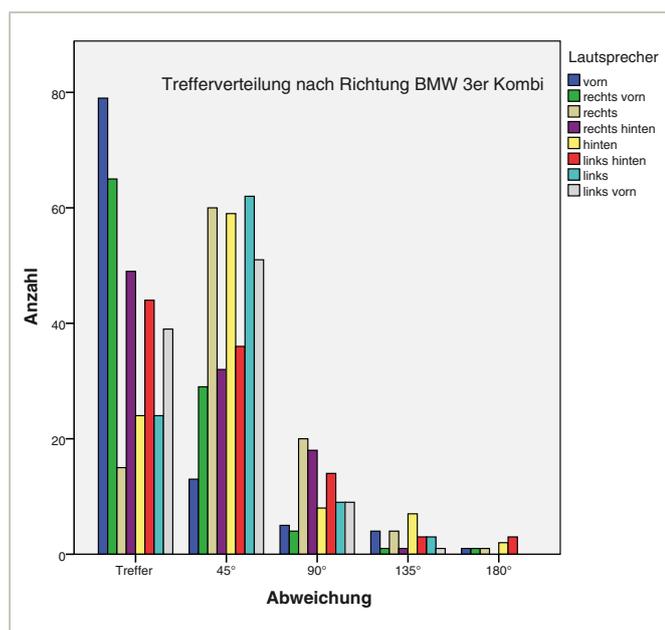


Abbildung 16: Treffer- und Abweichungsverteilung Fzg. 2 (BMW 3er)

Vergleicht man die Trefferverteilung bei lautem und leisem Signal, ergibt sich für Fzg. 2 eine fast identische Verteilung wie bei allen Fahrzeugen (Abbildung 17).

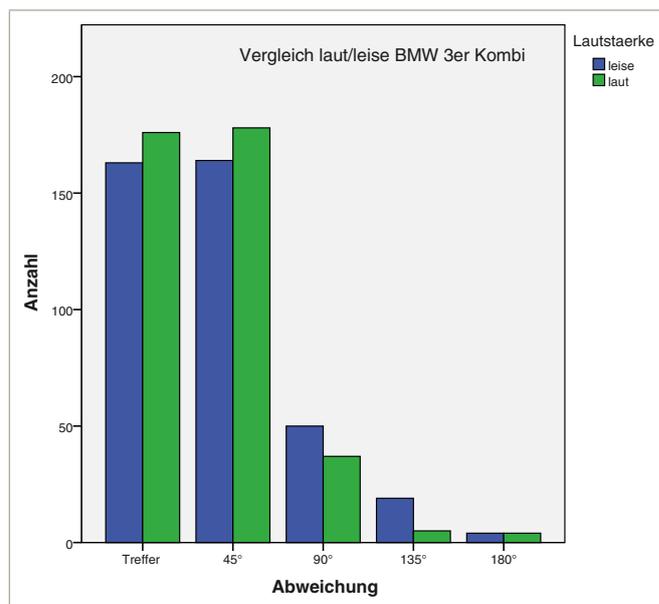


Abbildung 17: Vergleich der Trefferverteilung zwischen lautem und leisem Signal bei Fzg. 2 (BMW 3er)

#### 2.1.4 Opel Corsa

Die Ergebnisse bei diesem Fahrzeug waren fast identisch mit den Ergebnissen bei Fahrzeug 2 und werden deshalb nicht weiter erläutert.

#### 2.1.5 Vergleich der Fahrzeuge

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  $\overline{\Delta\alpha}$  (Richtung, Fzg.) der Richtungsangaben der Versuchspersonen vom Sollwert (= Richtung) bestimmt (Abbildung 18):

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

Man erkennt eine deutlich schlechtere Ortung bei allen Richtungen im VW T5, während sich Opel Corsa und BMW 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.

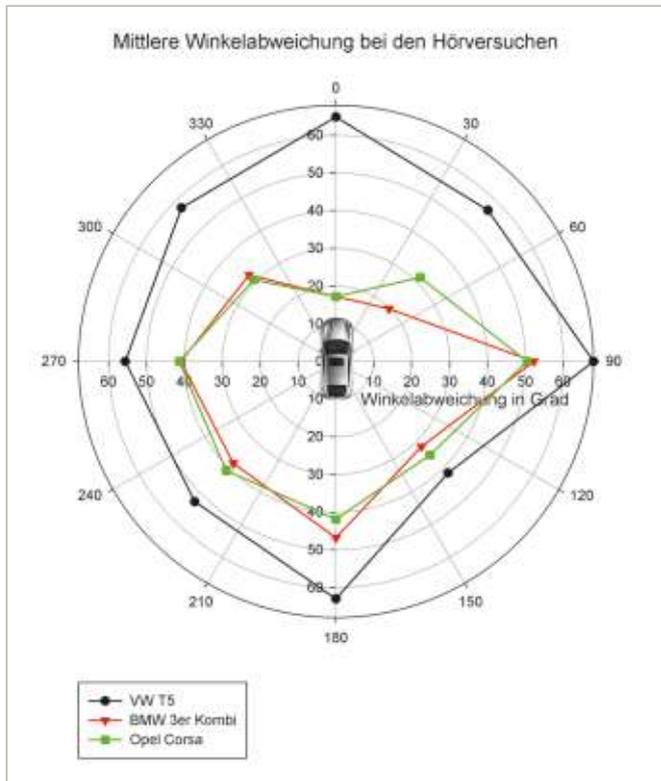


Abbildung 18: Vergleich der mittleren Winkelabweichungen der Hörversuche

### 2.1.6 Lerneffekt, individuelle Streuung und Selbsteinschätzung

Die in 2.1.5 definierte mittlere Winkelabweichung  $\bar{\Delta\alpha}$  der Richtungsangaben der Versuchspersonen lässt sich auch dazu verwenden, zu untersuchen, ob die Versuchspersonen die Signale mit zunehmender Versuchsdauer besser lokalisieren können:

$$\bar{\Delta\alpha}(\text{Signalnummer}) = \frac{1}{75} \sum_{i=1}^{75} |\text{Richtung}(i) - \text{Richtungsangabe}(i)|$$

In Abbildung 19 ist  $\bar{\Delta\alpha}(\text{Signalnummer})$  von allen 75 Versuchspersonen gegen die Signalnummer (= Versuchsabfolge) aufgetragen. Bei den ersten 16 – wohlgerneht zufällig ausgewählten, für jede VP aus einer anderen Richtungen – vorgespielten Signalen ist eine signifikante Verbesserung der Lokalisierung festzustellen, was auch an der Steigung der eingezeichneten Regressionsgerade sichtbar wird. Bei diesen Signalen handelt es sich um die leiseren. Abbildung 20 zeigt die Verhältnisse bei den jeweils letzten, den lauterer Signalen. Hier ist keine Verbesserung der Ortungsfähigkeit mehr festzustellen, die Steigung der Regressionsgeraden ist praktisch null. Es gibt also offensichtlich einen gewissen Lern- oder Gewöhnungseffekt bei den ersten Signalen.

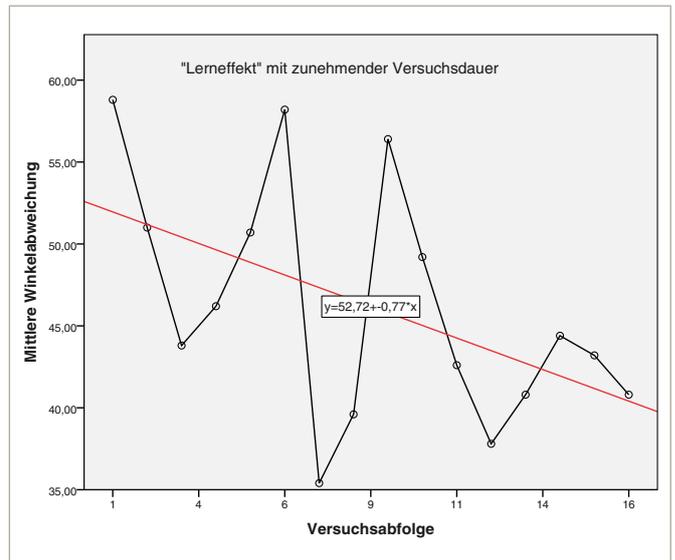


Abbildung 19: Mittlere Winkelabweichung bei den ersten 16 Signalen

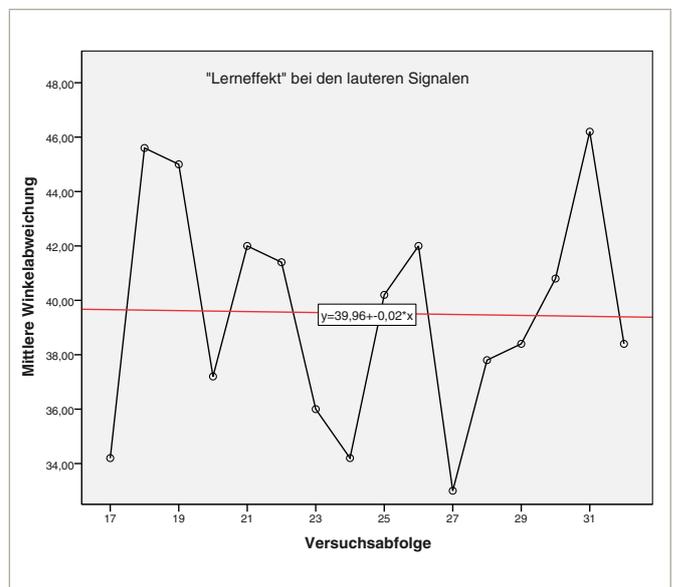


Abbildung 20: Mittlere Winkelabweichung bei den letzten 16 Signalen

Berechnet man die mittlere Winkelabweichung für jede einzelne Versuchsperson  $\bar{\Delta\alpha}(VP)$ , kann man Aussagen über die Streuung der individuellen Ortungsfähigkeit machen:

$$\bar{\Delta\alpha}(VP) = \frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} |\text{Richtung}(i) - \text{Richtungsangabe}(i)|$$

Abbildung 21 zeigt die Häufigkeitsverteilung der in 5°-Intervallen einsortierten mittleren Winkelabweichungen für die 75 Versuchspersonen. Die „beste“ VP hat eine mittlere Winkelabweichung von nur 17°, die beiden „schlechtesten“ von über 90°. Diese – auch von der Statistik als Ausreißer identifizierten Fälle – gaben im Fragebogen (siehe Anhang) an, unter einer leichten Gehörschädigung (z. B. Altersschwerhörigkeit) zu leiden. Im Mittel der VP liegt die Abweichung bei 41°.

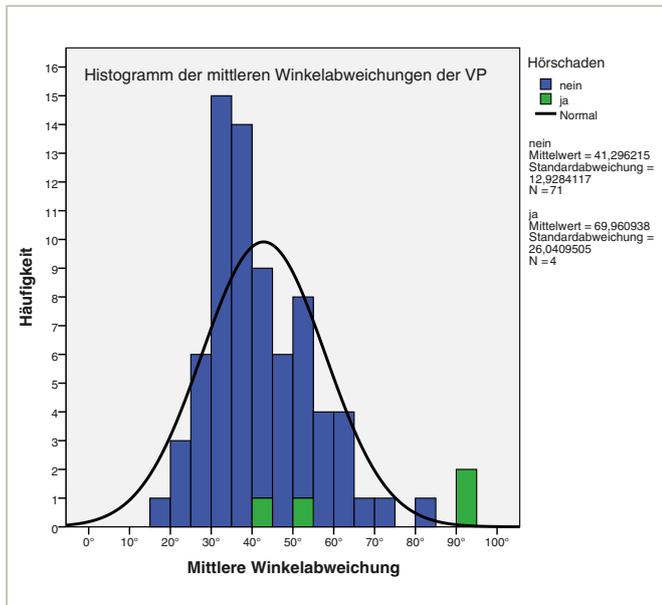


Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung der mittleren Winkelabweichungen je Versuchsperson mit und ohne Hörerschäden in 5°-Intervallen mit von SPSS berechneter Normalverteilung

Nach dem Hörversuch hat jede VP einen Fragebogen ausgefüllt, in dem unter anderem nach dem empfundenen Schwierigkeitsgrad der Ortungsaufgabe gefragt wurde. Auf einer fünfteiligen Skala von „sehr leicht“ bis „sehr schwer“ sollten entsprechende Selbsteinschätzungen gemacht werden [FHVR]. Abbildung 22 zeigt das auf eine Zahlenskala (-2 = sehr leicht, -1 = eher leicht, 0 = neutral, 1 = eher schwer, 2 = sehr schwer) übertragene Ergebnis für jede Versuchsperson im Vergleich zur individuellen mittleren Winkelabweichung  $\bar{\alpha}_i$  (VP). Man erkennt, dass auch in der persönlichen Einschätzung die Lokalisierung in Fzg. 1 (VP 1–25) als am schwersten empfunden wurde.

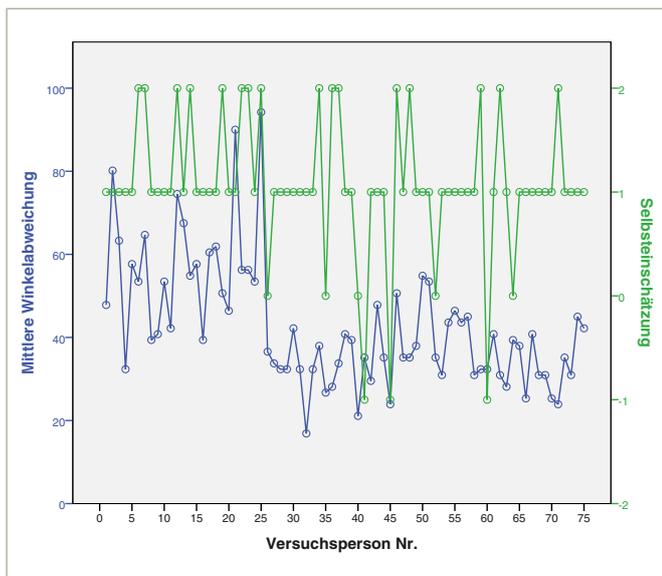


Abbildung 22: Korrelation zwischen Ortungsfähigkeit und Schwierigkeitsgrad bei allen VP (VP 1–25: VW T5, VP 26–50: BMW 3er Kombi, VP 51–75: Opel Corsa)

Untersucht man mit statistischen Korrelationsrechnungen den Zusammenhang zwischen dieser Selbsteinschätzung und dem Lokalisierungsergebnis in Form der mittleren Winkelabweichung, erhält man eine statistisch signifikante Korrelation. Das heißt, dass Versuchspersonen, welche die Testaufgabe als eher leicht empfunden haben, auch ein besseres Ortungsergebnis erzielten und umgekehrt.

## 2.2 Innenraummessungen

### 2.2.1 VW T5

In Abbildung 23 ist die richtungsabhängige Dämpfung der Fahrzeugkarosserie für ein Rosa-Rausch-Signal und das Warnsignal dargestellt. Angegeben sind jeweils die Differenzen zwischen den A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegeln ( $L_{Aeq}$ ), gemessen am linken und rechten Kunstkopfkanal im Fahrzeuginnenraum und dem Außenpegel, gemessen über dem Dach an Fahrerposition.

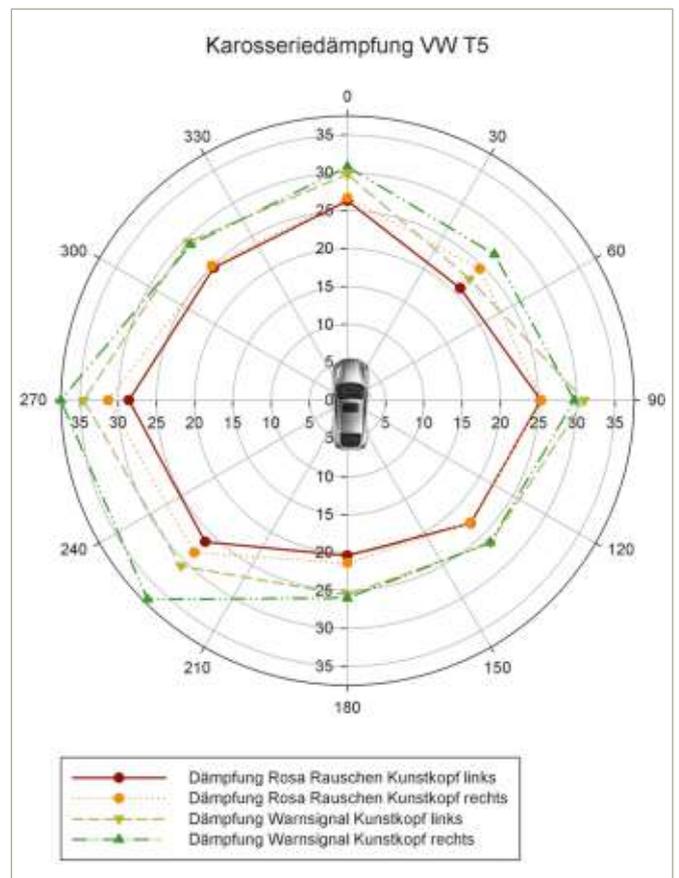


Abbildung 23: Dämpfung der Fahrzeugkarosserie bei Fzg. 1 in dB bei Rosa Rauschen und Warnsignal

Deutlich zu erkennen, dass das hochfrequente Warnsignal stärker gedämpft wird als das Rauschen und dass die Dämpfung richtungsabhängig ist: Signale von links werden z. B. um etwa 10 dB stärker gedämpft als Signale von hinten. Ebenso sind Pegelunterschiede zwischen linkem und rechtem Ohr festzustellen, wobei bei fast allen Richtungen der Pegel am rechten Ohr kleiner (= größere Dämpfung) ist als am linken.

Abbildung 24 zeigt die gemessenen A-bewerteten 12tel-Oktavspektren von einem Rosa-Rauschsignal (schwarze Linie, am Versuchsort ohne Fahrzeug gemessen), über dem Dach an Fahrerposition (grün), im Fahrzeuginneren am linken Kunstkopfkanal (blau) und am rechten Kunstkopfkanal (rot) bei Fahrzeug 1. Die Spektren stellen über 7,5 s gemittelte äquivalente Dauerschallpegel dar. Auffallend sind die nichtlinearen richtungsabhängigen Verzerrungen des Signals über dem Autodach, die durch Abschattungs- und Absorptionseffekte der Karosseriefächen und durch Schallbeugung an den Karosseriekanten entstehen dürften. Im Fahrzeuginnenraum ist bei allen Richtungen eine starke Schalldämpfung bei hohen Frequenzen ab 5 kHz festzustellen. Bei allen Frequenzen sind zum Teil erhebliche Pegelunterschiede zwischen linkem und rechtem Ohr von bis zu annähernd 20 dB (z. B. Richtung rechts vorn bei ca. 350 Hz) zu beobachten, deren Ursache in den akustischen Eigenschaften der Karosserie zu suchen sind. Besonders Reflexionen an schallharten Oberflächen in der Nähe des Kunstkopfes (Seitenfenster, Windschutzscheibe), Ausbildung von stehenden Wellen und Absorptionen dürften hier maßgeblichen Einfluss haben.

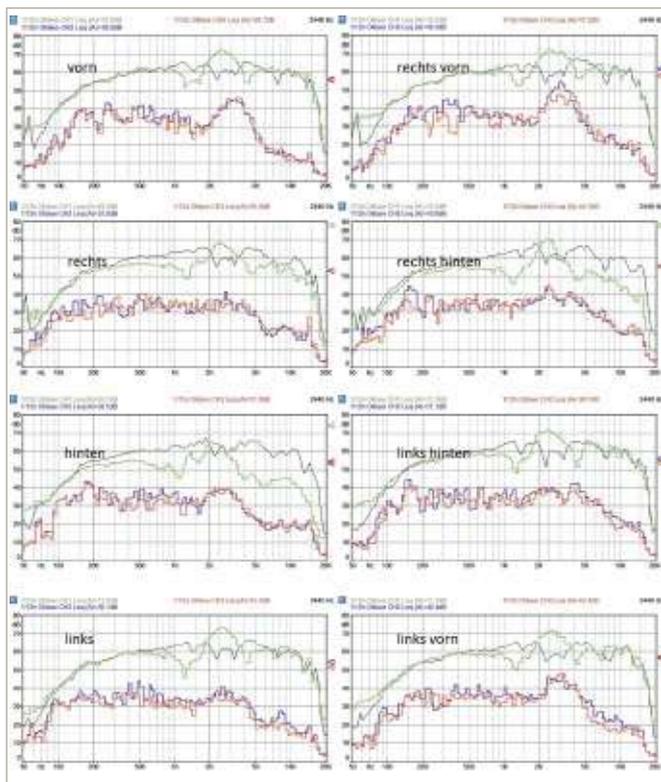


Abbildung 24: Rauschspektren Fzg. 1 (schwarz: ohne Fahrzeug, grün: Außenmikrofon über dem Dach, blau: Kunstkopf links, rot: Kunstkopf rechts)

Abbildung 25 zeigt die 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 aufgrund

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).

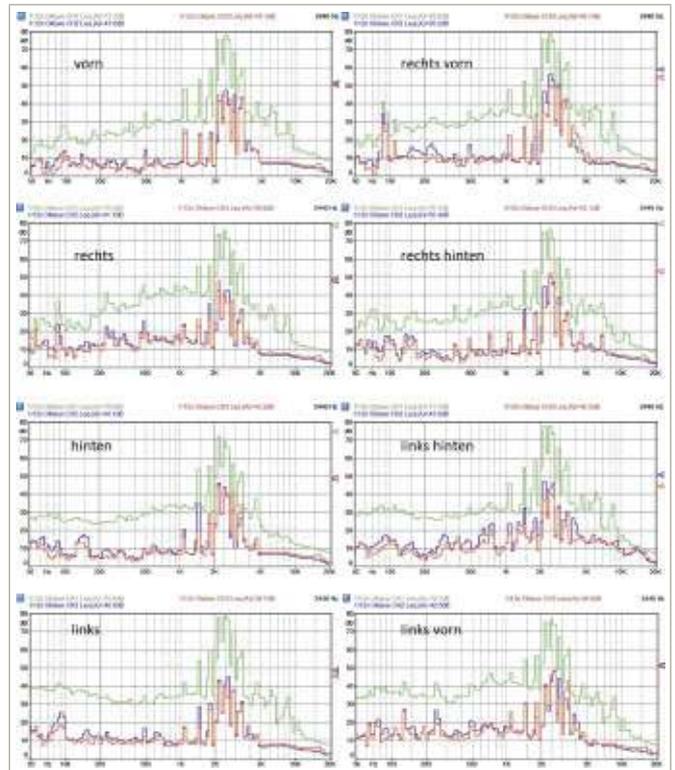


Abbildung 25: Warnsignalspektren Fzg. 1 (grün: Außenmikrofon über dem Dach, blau: Kunstkopf links, rot: Kunstkopf rechts)

Bei den anderen beiden Fahrzeugen sind die Messergebnisse ähnlich, allerdings ist die Karosseriedämpfung bei Fzg. 2 deutlich größer als beim VW T5. Auffallend ist, dass die nichtlinearen richtungsabhängigen Verzerrungen des Signals über dem Autodach, die durch Abschattungs- und Absorptionseffekte der Karosseriefächen und durch Schallbeugung an den Karosseriekanten entstehen dürften, bei Fahrzeug 2 (BMW 3er Kombi) wesentlich geringer sind als beim VW T5. Bei allen Frequenzen sind zum Teil erhebliche Pegelunterschiede zwischen linkem und rechtem Ohr von bis zu 15 dB zu beobachten, die bei diesem Fahrzeug jedoch wesentlich breitbandiger ausfallen als bei Fzg. 1.

Die Obertöne des Warnsignals über 5 kHz werden durch die Karosserie bei Fahrzeug 2 fast vollständig gedämpft, es dominieren die Harmonischen zwischen 2 und 4 kHz. Bei Fzg. 3 (Opel Corsa) ist die Karosseriedämpfung etwas kleiner als bei Fzg. 2, ansonsten sind die Ergebnisse der Innenraummessungen ähnlich wie bei Fzg. 2.

## 2.3 Korrelationen

### 2.3.1 Karosseriedämpfung – Winkelabweichung Hörversuche

In Abbildung 26 ist die mittlere Winkelabweichung aus den Hörversuchen und die Karosseriedämpfung in dB gemessen am rechten Kunstkopfkanal gegen die Richtung des Warnsignals in Fzg. 2 aufgetragen. Die beiden Größen korrelieren: Man findet eine größere Winkelabweichung, wenn die Dämpfung groß ist, das Signal am rechten Ohr also vergleichsweise leise ist.

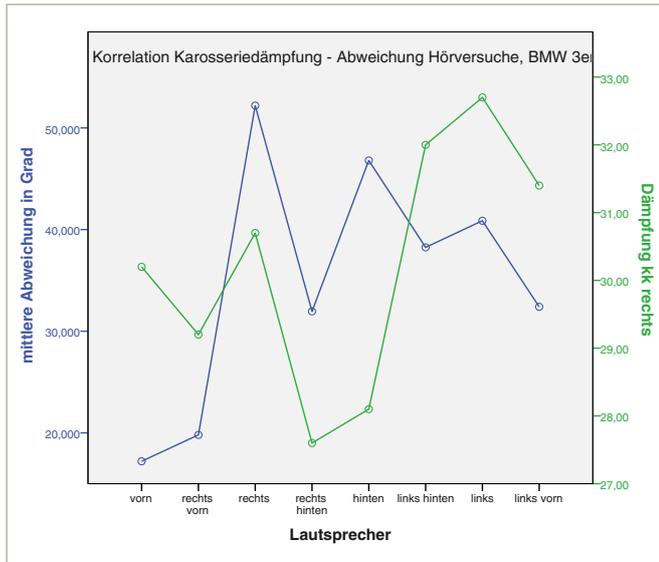


Abbildung 26: Mittlere Abweichung aus den Hörversuchen  $\bar{\Delta\alpha}$  (Richtung, Fzg. 2) (blau) und Karosseriedämpfung (grün)

Statistische Korrelationsrechnungen bestätigen einen signifikanten Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson, der einen linearen Zusammenhang zwischen normalverteilten Variablen annimmt, beträgt 0,72, der Fehler ist kleiner als 5 %. Andere Größen wie die Innenraumpegel korrelieren nicht mit der Winkelabweichung. Bei den anderen beiden Fahrzeugen findet man mit den gleichen Methoden jedoch keine statistischen Zusammenhänge zwischen den genannten Schallmessgrößen und den Hörversuchen, weshalb ein Kausalzusammenhang zwischen der richtungsabhängigen Karosseriedämpfung und der Ortbarkeit eines Warnsignals nicht angenommen werden kann.

### 2.3.2 Interaurale Pegeldifferenz – Winkelabweichung Hörversuche

Einer der wichtigsten Einflussfaktoren beim Richtungshören ist der inter- oder binaurale Pegelunterschied  $\Delta L$  (Richtung) zwischen den beiden Ohren ([Fastl], [Hellbrück]). Er wurde für jede Signalrichtung aus den über 7 s gemittelten, am Kunstkopf an Fahrerposition

gemessenen äquivalenten Dauerschallpegeln nach folgender Vorschrift sowohl für die Warnsignale als auch für das Rosa Rauschen bestimmt:

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

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

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

Für eine korrekte Ortung sollten die Pegeldifferenzen für Signale von vorn und hinten möglichst klein sein. Positive  $\Delta L$  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.

Abbildung 27 bis Abbildung 29 zeigen 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.

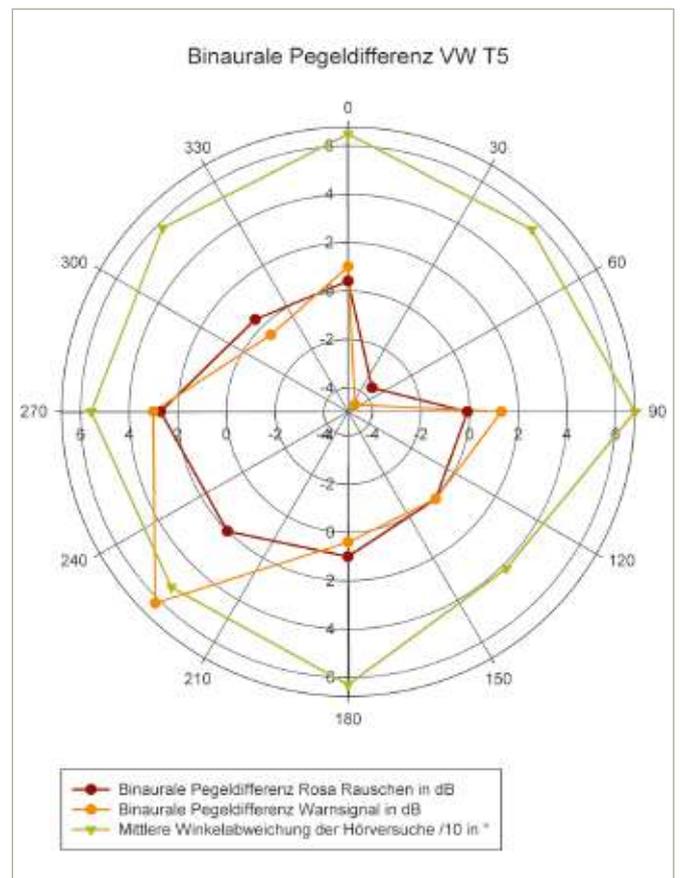


Abbildung 27: Am Kunstkopf gemessene interaurale Pegeldifferenzen  $\Delta L$  und Ortungsabweichung aus den Hörversuchen bei Fzg.1

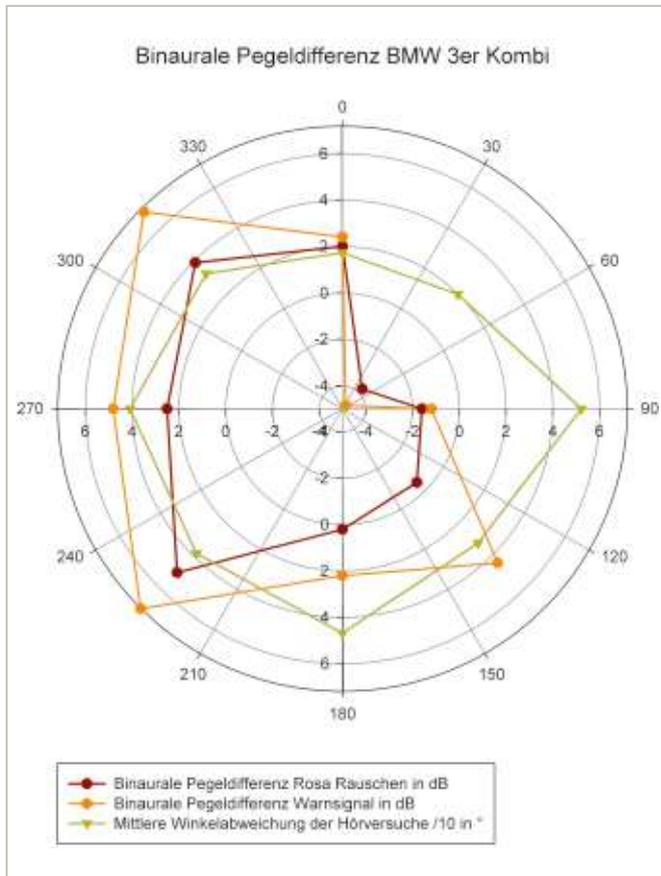


Abbildung 28: Am Kunstkopf gemessene interaurale Pegeldifferenzen  $\Delta L$  und Ortungsabweichung aus den Hörversuchen bei Fzg. 2

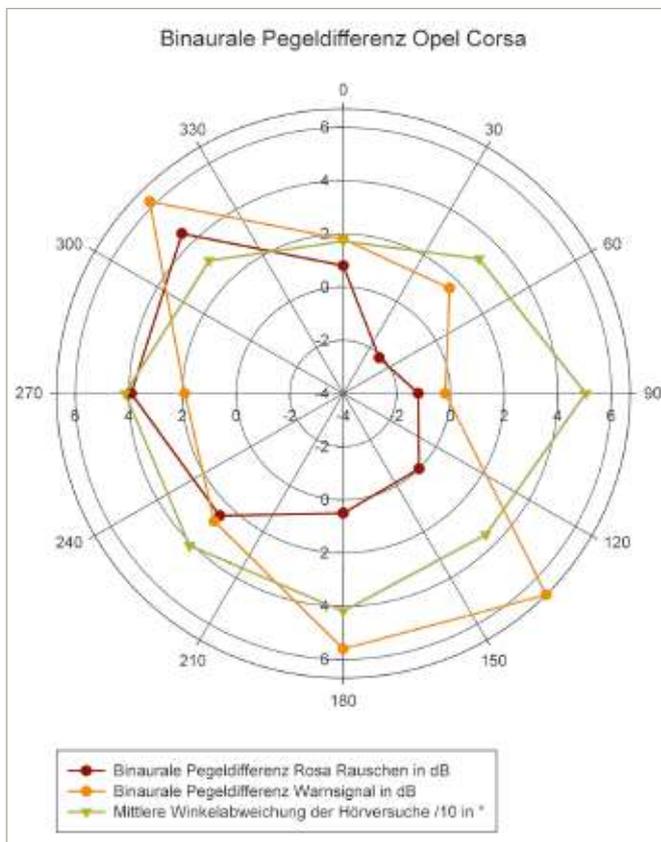


Abbildung 29: Am Kunstkopf gemessene interaurale Pegeldifferenzen  $\Delta L$  und Ortungsabweichung aus den Hörversuchen bei Fzg. 3

Es fällt auf, dass die Signalrichtung „vorn rechts“ ( $45^\circ$ ) 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. Auch die Trefferverteilung ist für Signale aus der linken Hemisphäre trotz günstiger Pegeldifferenz nicht besser als für Schall von rechts (vgl. Abbildung 8). Lediglich die Häufigkeit, mit der Lautsprecher aus der linken Hemisphäre genannt wurden (Abbildung 6), 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. Infrage kommen interaurale Laufzeitunterschiede (Präzedenzeffekt, Gesetz der ersten Wellenfront) oder die richtungsabhängige Filterung der Signale durch Ohrmuschel, Kopf und Körper, also die aus der Literatur [Hellbrück] bekannte kopfbezogene Übertragungsfunktion (HRTF, Head Related Transfer Function).

## 2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

- Die Richtungsangaben der Versuchsteilnehmer bei den Hörversuchen sind nicht gleichverteilt, es besteht eine Tendenz nach hinten
- Die Treffer- und Abweichungsverteilung hängt von der Einfallrichtung des Schalls ab, Signale von der Seite ( $90^\circ$ ) 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.
- Während der Hörversuche tritt anfänglich ein Lerneffekt ein: Die ersten Signale werden schlechter geortet als die letzten.
- Die Fähigkeit zur Richtungsortung der Signale unterliegt einer großen individuellen Streuung und korreliert mit der Selbsteinschätzung der Versuchspersonen.
- 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 Richtungsartung bei.

### 3 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. Unter diesen im realen Verkehrsgeschehen nur äußerst selten auftretenden Bedingungen wurden die in Abschnitt 2.4 zusammengefassten Ergebnisse erzielt.

**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.**

### 4 Ausblick

Um die bei der auralen Richtungsartung in akustisch problematischen Umgebungen wirkenden auditorischen Mechanismen zu erforschen, sollten Hörversuche unter Aufzeichnung der intuitiven Kopfbewegung von Versuchspersonen unternommen werden. Dies sollte zunächst unter Freifeldbedingungen in einem hallarmen Messraum signalrichtungsabhängig erfolgen. Es wäre zu untersuchen, ob sich einheitliche Bewegungsmuster erkennen lassen. Sollte dies der Fall sein, könnte die Bewegung in der gleichen akustischen Umgebung robotisch mit einem Kunstkopfmesssystem nachgefahren werden und dabei ebenfalls signalrichtungsabhängig die interauralen Pegel- und Laufzeitunterschiede sowie Frequenzverzerrungen durch die HRTF gemessen werden. Anschließend könnte untersucht werden, ob Korrelationen zwischen Bewegungsmustern, Messergebnissen und richtigen oder falschen Richtungsartungen der Versuchspersonen

bestehen. Die Versuche könnten in anderen akustischen Umgebungen, z. B. auch in Fahrzeuginnenräumen, wiederholt werden.

Die beschriebenen Hörversuche könnten mit einem anschwellenden Signalpegel, ähnlich einem sich annähernden Fahrzeug, wiederholt werden. Hierbei sollten die VP eine Ortungsaussage erst dann machen, wenn sie glauben, die Signalrichtung sicher lokalisiert zu haben. Pegel und Zeit, bei der die Aussage erfolgt, sollten aufgezeichnet werden und können anschließend mit der Winkelabweichung der Richtungsangaben korreliert werden.

Interessant wäre natürlich auch noch die Untersuchung anderer Fahrzeugtypen (Lkw, Cabrio ...), der Einfluss verschiedener Fremdgeräusche (Radio, Sprache, Lüftungs- und Motorengeräusche) sowie die Verwendung anderer Signale, z. B. aus dem Ausland [FHVR].

### Danksagung

Mein Dank gilt zuallererst der Projektgruppe der Fachhochschule für öffentliche Verwaltung und Rechtspflege in Bayern (FHVR) unter Leitung von Christian Hecht und fachlicher Betreuung von Polizeidirektor Stefan Beil für die überaus konstruktive und reibungslose Zusammenarbeit, besonders bei der Planung und Durchführung der Hörversuche.

Meinem Laboringenieur, Jürgen Schafberger, gilt mein Dank für die ideenreiche und kompetente Instrumentierung des Versuchsaufbaus und seine ausdauernde Hilfsbereitschaft in allen Phasen des Projekts.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei der Hochschulleitung der FHVR für die organisatorische Unterstützung und die Zurverfügungstellung des Versuchsgeländes.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich beim Vorstand der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden für die großzügige finanzielle Förderung des Projekts im Rahmen des „Best Project“-Programms der Hochschule.

---

## Literaturverzeichnis

1. [Blauert] Blauert, J.: *Spatial Hearing*, Cambridge, MA: MIT Press. (1997)
2. [Böck] Dennis Böck, Jürgen Schafberger, Matthias Mändl: *Richtungshören in der Medianebene unter Modifizierung der Einflüsse von Schultern und Oberkörper*, DAGA Oldenburg, 2014
3. [Fastl] Hugo Fastl, Eberhard Zwicker: *Psychoacoustics – Facts and Models*, Springer, 2007
4. [FHVR] Projektabschlussbericht zum Thema: *Untersuchung der Richtungsörtung von akustischen Warneinrichtungen für bevorrechtigte Wegebenutzer im Innenraum von Kraftfahrzeugen*, Jahrgang 2011/14B, Fachhochschule für öffentliche Verwaltung und Rechtspflege in Bayern, Fachbereich Polizei, Sulzbach-Rosenberg, Mai 2014
5. [Golder] Golder: *Unfälle mit Fahrzeugen mit Sonderrechten*, VRR 9/2008
6. [Hellbrück] J. Hellbrück, W. Ellermeier: *Hören*, Hogrefe Verlag, Göttingen 2004
7. [Howard] Carl Q. Howard, Aaron J. Maddern and Elefterios P. Privopoulos: *Acoustic Characteristics for Effective Ambulance Sirens*; Vol. 39 August (2011) No. 2 Acoustics Australia
8. [Withington] 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

## Kontakt:



**Prof. Dr. Matthias Mändl**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Labor für Akustik und Schallanalyse (LAuS)  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

m.maendl@oth-aw.de



**Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Schafberger**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Labor für Akustik und Schallanalyse (LAuS)  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

j.schafberger@oth-aw.de