

# **Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Fahrzeugtechnik Heft F 110**

**bast**

# **Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen**

von

Ercan Altinsoy  
Jürgen Landgraf  
Robert Rosenkranz  
Margitta Lachmann

TU Dresden  
Lehrstuhl für Kommunikationsakustik

Katharina Hagen  
Christoph Schulze  
Bernhard Schlag

TU Dresden  
Lehrstuhl für Verkehrspsychologie

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 110

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

#### **Impressum**

**Zusammenfassender Bericht zu den Forschungsprojekten:**  
FE 82.0578/2012 (FAT: 3.28) Reaktionen von Fußgängern auf unterschiedliche Fahrzeugaußengeräusche beim herannahenden, abfahrbereiten und anhaltenden Fahrzeug und FAT: 3.30 Auditive Wahrnehmung und Beurteilung von synthetisch generierten Geräuschen für Elektrofahrzeuge hinsichtlich der Erkennung von Betriebszuständen (finanziert durch die Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) und BASt)

Das Kapitel 2.7 dieses Berichts beschreibt die Ergebnisse des Projektteils FAT 3.30
---

#### **Fachbetreuung**

Maxim Bierbach  
Wolfram Bartolomaeus

#### **Herausgeber**

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

#### **Redaktion**

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

#### **Druck und Verlag**

Fachverlag NW in der  
Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9307

ISBN 978-3-95606-206-3

Bergisch Gladbach, November 2015

## Kurzfassung – Abstract

### **Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen**

Um Fahrzeuge und ihren Fahrzustand erkennen zu können, benötigt ein Fußgänger sensorisch übermittelte Informationen. Über die allgemeine Rolle der auditiven Information bei Wahrnehmung und Verhalten von Fußgängern in Interaktion mit Kraftfahrzeugen bestehen jedoch bislang kaum umfassende Erkenntnisse. Dem Fahrzeugaußengeräusch wird in der Literatur eine zentrale Rolle in der Informationsgewinnung für diejenigen Fußgänger zugeschrieben, die ohne eine Möglichkeit der visuellen Wahrnehmung (Sehbehinderte/Blinde) sind. Auch für Situationen, in denen die visuelle Wahrnehmung prinzipiell möglich ist, aufgrund von Einschränkungen des Gesichts- und/oder Blickfeldes sowie der Aufmerksamkeitskapazität jedoch nicht regelmäßig erfolgen kann, bestehen diesbezügliche Einschätzungen. Der Bericht „Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen“ gliedert sich in zwei Teile. Der erste Berichtsteil „Auditive Wahrnehmung“ liefert einen Beitrag zur Erklärung des Zusammenhangs zwischen Fahrzeugaußengeräuschen und deren Wahrnehmbarkeit in Hinblick auf eine mögliche Gefährdung von Fußgängern (Seheingeschränkte/Normalsehende) für drei ausgewählte Verkehrssituationen (herannahendes, anfahrendes und anhaltendes Fahrzeug). Außerdem wird in diesem Abschnitt geklärt, welche grundsätzlichen Eigenschaften ein synthetisches Fahrzeuggeräusch besitzen muss, um den Fahrzeugzustand „Bremsen“ und „Beschleunigen“ interpretieren zu können. Der zweite Berichtsteil untersucht die bimodale (auditiv-visuelle) Wahrnehmung von Fußgängern (Seheingeschränkte/Normalsehende) beim anfahren (Parkplatzsituation) und anhaltenden (Fußgängerüberwegssituation) Fahrzeug. Die Hörbarkeit zeigt in visuell dominanten Situationen auch bei normalsehenden Personen signifikante Effekte auf die Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen. Hieraus erwächst die abschließende Anregung einer stärkeren Untersuchung und Berücksichtigung der Wahrnehmung von akustischen Fahrzeug- und Situationsmerk-

malen, auch bezüglich nicht blinder Personen, bei praktischen, verkehrssicherheitsorientierten Betrachtungen.

### **Perception and evaluation of vehicle exterior noise by pedestrians at different traffic situations and different operating conditions**

To be able to recognize vehicles and their driving condition, a pedestrian requires sensory submitted information. However, so far there is no comprehensive knowledge about the general role of auditory information in the perception and behavior of pedestrians in interaction with motor vehicles. The vehicle exterior noise is attributed in literature a central role in the acquisition of information for those pedestrians who are without an opportunity of visual perception (visually impaired/blind). Even for situations where visual perception is basically possible, but due to limitations of face and/or visual field as well as the attention capacity can not be done on a regular basis, estimates exist. The report "Perception and evaluation of vehicle exterior noise by pedestrians at different traffic situations and different operating conditions" is divided into two parts. The first part "auditory perception" contributes to the explanation of the relationship between vehicle external noise and their perception by pedestrians (visually impaired/normal sighted) in terms of potential risk for three selected traffic situations (approaching, starting and sustained vehicle). This section also gives guidance, which basic properties a synthetic vehicle noise has to have in order to be interpreted as vehicle condition "accelerating" and "braking". The second part of the report investigates the bimodal (auditory-visual) perception of pedestrians (visually impaired/normal sighted) by starting (parking situation) and sustaining (pedestrian crossing situation) vehicles. The audibility shows even for normal sighted individual's significant effects on the perception and evaluation even in visually dominant situation. This gives rise to the final suggestion of greater investigation and consideration of the perception of acoustic vehicle and situational characteristics, also with respect to non blind people, for practical, traffic safety-oriented considerations.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>Audio-visuelle Wahrnehmung von Fahrzeugaußengeräuschen</b> .....	<b>45</b>
<b>2</b>	<b>Auditive Wahrnehmung von Fahrzeugaußengeräuschen</b> .....	<b>9</b>	3.1	Versuchsanordnung .....	45
2.1	Versuchsanordnung .....	9	3.1.1	Versuchsumgebung und Versuchsablauf .....	45
2.1.1	Aufgabenstellung .....	9	3.1.2	Probandenkollektiv .....	46
2.1.2	Methodik .....	10	3.1.3	Experimentelle Variation .....	46
2.1.3	Geräusch-Datenbasis .....	10	3.1.4	Verhaltensparameter .....	48
2.2	Herannahendes Fahrzeug .....	13	3.2	Ergebnisse Parkplatzsituation .....	49
2.2.1	Stimuli für Hörversuch .....	13	3.2.1	Ergebnisübersicht Reaktionsverhalten .....	49
2.2.2	Erkennungszeitmessung .....	14	3.2.2	Ergebnisübersicht Blickverhalten .....	51
2.2.3	Mithörschwellenmessung .....	20	3.2.3	Einfluss des Fahrzeuggeräusches .....	52
2.3	Herannahendes Fahrzeug mit erweiterter Datenbank .....	24	3.2.4	Einfluss des Hintergrundgeräusches .....	53
2.3.1	Erweiterung der Datenbasis .....	24	3.2.5	Einfluss des Störgeräusches .....	54
2.3.2	Erkennungszeitmessung .....	26	3.2.6	Einfluss weiterer Versuchsmerkmale .....	56
2.4	Anfahrendes Fahrzeug – Parkplatz .....	28	3.3	Ergebnisse Anhaltesituation .....	58
2.4.1	Geräuschaufnahmen .....	29	3.3.1	Ergebnisübersicht Reaktionsverhalten .....	58
2.4.2	Stimuli für Hörversuch .....	29	3.3.2	Ergebnisübersicht Blickverhalten .....	58
2.4.3	Erkennungszeitmessung .....	30	3.3.3	Einfluss des Fahrzeuggeräusches .....	60
2.4.4	Bestimmung der Ortungsfehler .....	33	3.3.4	Einfluss des Hintergrundgeräusches .....	60
2.5	Anhaltendes Fahrzeug – Fußgängerüberweg .....	33	3.3.5	Einfluss weiterer Versuchsmerkmale .....	61
2.5.1	Geräuschaufnahmen .....	34	3.4	Diskussion der audio-visuellen Versuche .....	62
2.5.2	Stimuli für Hörversuch .....	34	3.4.1	Untersuchungsansatz .....	62
2.5.3	Erkennungszeitmessung .....	34	3.4.2	Einflüsse akustischer Variationen .....	63
2.6	Motorstart .....	35	3.4.3	Personenmerkmale .....	65
2.6.1	Stimuli für Hörversuch .....	35	3.4.4	Integration und Ausblick .....	66
2.6.2	Erkennungszeitmessung .....	36	<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>67</b>
2.6.3	Mithörschwellenmessung .....	37	<b>5</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>70</b>
2.7	Betriebszustandserkennung „Beschleunigung“ – „Bremsen“ .....	38	<b>6</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>73</b>
2.7.1	Synthetische Signalerzeugung .....	39			
2.7.2	Erkennungszeitmessung .....	39			
2.8	Diskussion der auditiven Versuche .....	44			



## 1 Einleitung

Verhalten und Wahrnehmung von Fußgängern in Interaktion mit Kraftfahrzeugen sind in der Literatur bezüglich der Wahrnehmungsgrundlagen nicht sehr umfangreich beschrieben. Am ausführlichsten ist der Erkenntnisstand zu Querungsvorgängen an signalisierten und nicht signalisierten Knotenpunkten oder auch auf der freien Strecke. Oft beschränken sich die Betrachtungen auf Interaktionen mit dem fließenden Fahrzeugverkehr, die einen wesentlichen Einfluss auf das Sicherheits- und Querungsverhalten von Fußgängern haben (einen einführenden Überblick bieten HAGEN u. a. 2012a).

Interaktionen zwischen Fußgänger und Kraftfahrzeug treten häufig dann auf, wenn sich beide auf einer Verkehrsfläche befinden bzw. dieses beabsichtigen. Regelmäßige Merkmale dieser Situationen sind wiederkehrende Bewegungshalte und Bewegungsbeginne aller beteiligten Verkehrsteilnehmer. Für Kraftfahrzeuge gehören beispielsweise verkehrsbedingte Halte mit nachfolgenden Anfahrvorgängen an Knotenpunkten und Querungstellen sowie Beginn und Ende von Fahrten in und um Anlagen des ruhenden Verkehrs dazu. Fußgänger sind häufig aufgefordert und bestrebt, diese Halte- und Anfahrbewegungen von Fahrzeugen bei ihren eigenen Verhaltensentscheidungen zu berücksichtigen. Somit kommt den Fahrzuständen „stehend abfahrbereites“ und „anhaltendes“ Fahrzeug aus Sicht eines Fußgängers eine hohe Bedeutung zu.

Um Kraftfahrzeuge und ihren Fahrzustand erkennen zu können, benötigt ein Fußgänger sensorisch vermittelte Informationen. Über die allgemeine Rolle der auditiven Information bei Wahrnehmung und Verhalten von Fußgängern in Interaktion mit Kraftfahrzeugen bestehen jedoch bislang kaum umfassende Erkenntnisse. Dem Fahrzeugaußengeräusch wird in der Literatur eine zentrale Rolle in der Informationsgewinnung insbesondere für diejenigen Fußgänger zugeschrieben, die ohne oder mit eingeschränkter Möglichkeit der visuellen Wahrnehmung (Sehbehinderte und Blinde) sind. Auch für Situationen, in denen die visuelle Wahrnehmung prinzipiell möglich ist, aufgrund von Einschränkungen des Gesichts- und/oder Blickfeldes sowie der Aufmerksamkeitskapazität jedoch nicht regelmäßig erfolgen kann, bestehen diesbezügliche Einschätzungen.

Entsprechende Untersuchungen beschäftigen sich mehrheitlich mit sehbehinderten Personen und Blinden. Für diesen Personenkreis werden Erkenntnisse über den Einfluss von Umgebungsbedingungen auf die akustische Wahrnehmung (WALL EMERSON & SAUERBURGER 2008) und vor dem Hintergrund der Gestaltung von Verkehrsanlagen wie etwa Kreisverkehren (ASHMEAD u. a. 2005, GUTH u. a. 2005) oder akustischen Hinweissignalen (GUTH u. a. 1989, BACH u. a. 2009) beschrieben. Das sogenannte 2-Sinne-Prinzip stützt die Bedeutung der Fahrzeugaußengeräusche für das Erkennen von Fahrzuständen auch für Fußgänger mit ausreichendem Sehvermögen. Mit redundanter Information gehen eine höhere Fehlertoleranz und infolge dessen eine größere Situationssicherheit einher. So können mögliche negative Folgen zeitweiliger Einschränkungen der visuellen Information (z. B. geometrische Verdeckung) oder Wahrnehmung (z. B. Ablenkung) wahrscheinlicher kompensiert werden.

Eine große Anzahl Studien beschäftigt sich mit der Anforderung der rein akustischen Wahrnehmung leiser Fahrzeuge, primär Hybrid- und Elektrofahrzeuge, durch sehbehinderte oder blinde Fußgänger. Oftmals werden Wahrnehmungsunterschiede zwischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren und elektrischem Antrieb beschrieben (z. B. WIENER u. a. 2006, ROBERT & ROSENBLUM 2009, GARAY-VEGA u. a. 2010a, WALL EMERSON u. a. 2011, GLAESER u. a. 2012, GROSSE u. a. 2013, MISDARJIS u. a. 2013, PARIZET u. a. 2013). Vor dem Hintergrund der Verkehrssicherheit, insbesondere Sehbehinderter und Blinder (z. B. für USA National Federation of the Blind 2010, für Deutschland z. B. CLAUS 2011), entstand daraus eine Diskussion über die Kriterien notwendiger Außengeräusche solcher Fahrzeuge (z. B. USA (2011) „Pedestrian Safety Enhancement Act of 2010“, HASTINGS u. a. 2012 oder ECE (2012)). Weiterführende Untersuchungen betrachten die Wirkung von zusätzlich erzeugten Fahrzeugaußengeräuschen auf die akustische Wahrnehmung durch Personen mit eingeschränktem Sehvermögen (z. B. HASTINGS u. a. 2011, KIM u. a. 2012). Zunehmend geraten auch leise Fahrzustände unabhängig von der Antriebstechnologie in den Fokus (ASHMEAD u. a. 2012).

Die Untersuchungen des ersten Berichtsteils „Auditive Wahrnehmung von Fahrzeugaußen-

geräuschen“ bearbeitet vom Lehrstuhl für Kommunikationsakustik der Technischen Universität Dresden, zielen zentral darauf ab, dem wachsenden Bedarf zur Bestimmung der akustischen Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger gerecht zu werden. Durch Messungen der Wahrnehmung von Fußgängern soll ein Informationszuwachs geschaffen werden, der hilft, Fahrzeugaußengeräusche so zu gestalten, dass Fußgänger relevante akustische fahrzeugseitige Informationen wie Fahrtrichtung, Beschleunigung, Verzögerung, Geschwindigkeit oder Betriebszustand erhalten. Denn einerseits sollen Elektrofahrzeuge nicht mit mehr Fahrzeugaußengeräusch versehen werden als unbedingt notwendig und andererseits muss gewährleistet sein, dass sehbehinderten und blinden Menschen weiterhin eine angemessene Beteiligung am Straßenverkehr möglich ist.

Gegenstand dieses Berichtsteils sind die Wahrnehmung von und Reaktion auf rein akustische Darbietungen in drei ausgewählten Verkehrssituationen. Situation 1 verkörpert dabei die bisher häufiger betrachtete Situation des herannahenden Fahrzeuges. Die Situationen 2 und 3 untersuchen die auditive Wahrnehmung in bislang wenig untersuchten Verkehrssituationen anfährender und anhaltender Fahrzeuge durch normalsichtige und sehbehinderte Versuchspersonen. Die Bewertung erfolgt aus der Perspektive eines Fußgängers. Als Reaktion wird das möglichst schnelle und dabei sichere Erkennen des finalen Fahrzustandes (Heranfahen, Anfahren bzw. Halten) erhoben. Wesentliche experimentelle Variationen betreffen die Außengeräusche der präsentierten Fahrzeuge und das Hintergrundgeräusch (mehrstufig variiert). Die Untersuchungen sind entweder über Kopfhörer im Hörlabor (Situation 1) oder über die Wellenfeldsynthese im multimodalen Messlabor (Situation 2 und 3) durchgeführt worden.

Untersuchungen über das Zusammenwirken visueller und akustischer Wahrnehmung im Kontext praktischer Verkehrssicherheitsfragestellungen sind nahezu unbekannt. Einzelne Untersuchungen belegen einen Beitrag beider Wahrnehmungsmodalitäten (z. B. GROSSE 2009 für Querungsentscheidungen, KERBER 2008 für Fahrzeugannäherungen). Über die Interaktion der Sinneskanäle in Situationen, in denen sowohl akustische als auch visuelle Informationen genutzt werden können, bestehen jedoch kaum Erkenntnisse. Für die

sensorische Orientierung im Straßenverkehr wird allgemein ein wahrnehmungsphysiologisches Primat der visuellen Information beschrieben. Vor dem Hintergrund der absehbaren Entwicklungen der Elektromobilität (Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung 2009) und der damit verknüpften Problemstellungen und Chancen (Wissenschaftlicher Beirat 2012) kommt dem zweiten Berichtsteil zur Untersuchung und Beschreibung des Beitrages der akustischen Information im Kontext komplexer multimodaler Wahrnehmungsvorgänge in verkehrspraktischen Situationen seine Bedeutung zu.

Ausgangspunkt für entsprechende Untersuchungen und Gegenstand des zweiten Berichtsteils „Audio-visuelle Wahrnehmung von Fahrzeugaußengeräuschen“, welche der Lehrstuhl für Verkehrspsychologie der Technischen Universität Dresden durchgeführt hat, ist daher die grundsätzliche Frage, welche Effekte akustische Informationen in visuell dominierten Situationen mit „stehend abfahrbereiten“ und „anhaltenden“ Fahrzeugen bei großer Aufmerksamkeitsfokussierung auf die Wahrnehmungsaufgabe haben. Wenn sich dabei Einflüsse der Fahrzeugaußengeräusche auf Wahrnehmung und Reaktion finden, ist recht zwingend davon auszugehen, dass der für praktische Situationen anzunehmende Beitrag akustischer Situationsmerkmale auch bei grundsätzlicher Verfügbarkeit visueller Wahrnehmung nicht geringer sein dürfte.

Gegenstand hierfür sind daher die Wahrnehmung von und Reaktion auf audio-visuelle Darbietungen anfährender bzw. anhaltender Fahrzeuge durch normalsichtige und sehbehinderte Versuchspersonen. Die Darbietungen erfolgen dabei wieder aus Perspektive eines Fußgängers. Als Reaktion wird auch hier das möglichst schnelle und dabei sichere Erkennen des finalen Fahrzustandes (Fahren bzw. Halten) erhoben. Zur Charakterisierung der visuellen Wahrnehmung wird das Blickverhalten aufgezeichnet. Wesentliche experimentelle Variationen betreffen wie bereits im ersten Berichtsteil die Außengeräusche der präsentierten Fahrzeuge und das Hintergrundgeräusch. Die Untersuchungen sind im Multimodalen Messlabor des Lehrstuhls Kommunikationsakustik unter Kontrolle der akustischen und visuellen Situationsmerkmale durchgeführt worden.

## 2 Auditive Wahrnehmung von Fahrzeugaußengeräuschen

Im diesem Kapitel wird die Fahrzeugwahrnehmung durch Fußgänger ausschließlich auditiv betrachtet. Es werden Geräusche von Elektrofahrzeugen mit Geräuschen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren verglichen und in Hinblick auf die menschliche Wahrnehmung in Hörversuchen analysiert.

### 2.1 Versuchsanordnung

#### 2.1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Berichtsteils „Auditive Wahrnehmung von Fahrzeugaußengeräuschen“ ist die Erweiterung des Kenntnisstandes der Außengeräuschwahrnehmung von Fußgängern sowie die Bestimmung des Gefährdungspotenzials insbesondere für sehbehinderte Verkehrsteilnehmer durch die geringere Geräuschabstrahlung heutiger Elektrofahrzeuge. Ausgehend von der Wahrnehmungsmessung klassischer Verbrennungsfahrzeuggeräusche sollen mögliche Wahrnehmungsdefizite bei Elektrofahrzeuggeräuschen aufgezeigt werden.

Hierbei wurden folgende drei grundsätzlich verschiedene Verkehrssituationen untersucht:

- herannahendes Fahrzeug (Situation 1),
- anfahrendes Fahrzeug (Situation 2),
- anhaltendes Fahrzeug (Situation 3).

In allen Situationen wurden sowohl Geräusche von Verbrennungs- und Elektrofahrzeugen als auch synthetisch erzeugte Geräusche verwendet.

Für die erste Situation (Situation 1) ist wesentlich, in welcher Entfernung Fahrzeuge mit unterschiedlichen Motorisierungen auditiv wahrnehmbar sind. Gemessen wurde hier die Erkennungszeit bei verschieden lauten Umgebungsgläuschen. Bild 1 zeigt schematisch die Szene, in welcher die akusti-

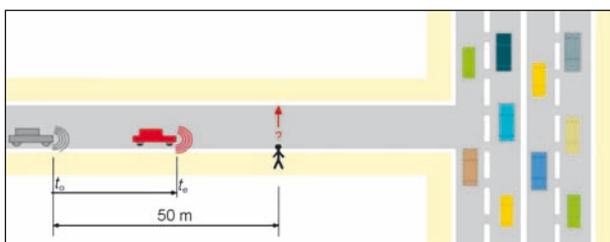


Bild 1: Szene eines herannahenden Fahrzeuges

schen Aufnahmen erstellt wurden. Die akustischen Aufnahmen des sich annähernden Fahrzeuges und des Hintergrundgeräusches wurden in Hörversuchen dargeboten.

Innerhalb der Situation 2 (Bild 2) wurde untersucht, wann ein ausparkendes (anfahrendes) Fahrzeug auditiv erkannt wird. In dieser Situation wurde auch die Ortungsgenauigkeit beim Anfahren beurteilt. Ein weiterer Untersuchungsgegenstand war der Vergleich der rein auditiven Wahrnehmung mit der audio-visuellen Wahrnehmung innerhalb dieser Parkplatzszene. Diese kombinierte Wahrnehmungsuntersuchung (Kapitel 3, S. 45) ist insbesondere für die Probandengruppe der Sehbehinderten (Restsehen vorhanden) sinnvoll.

Mit der Situation 3 wurde geprüft, inwieweit ein Fußgänger in der Länge ist, den Anhaltezeitpunkt eines Fahrzeuges rein auditiv zu erkennen. Vergleichsweise wurde diese Situation auch wieder audio-visuell untersucht. Bild 3 stellt die Aufnahmesituation dieser Szene dar. Hier wurden auch Aspekte der Start/Stop-Automatik untersucht.

Als Einstieg in den Bereich „Geräusche zur Betriebszustandserkennung“ wurde die Eignung synthetischer Sounds in Form von Sinus-Sweep-Signalen bezüglich der Erkennbarkeit von „Bremsen“ und „Beschleunigen“ bestimmt (Kapitel 2.7, S. 38). Analysiert wurde, innerhalb welches Frequenzbereichs die beste Wahrnehmung erzielt wird und wie groß der Frequenzanstieg/-abfall mindestens sein muss, damit eine sichere Erkennung des gewünschten Betriebszustandes gewährleistet ist.

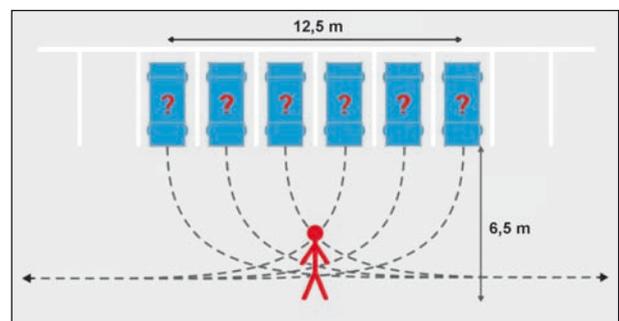


Bild 2: Parkplatzszene



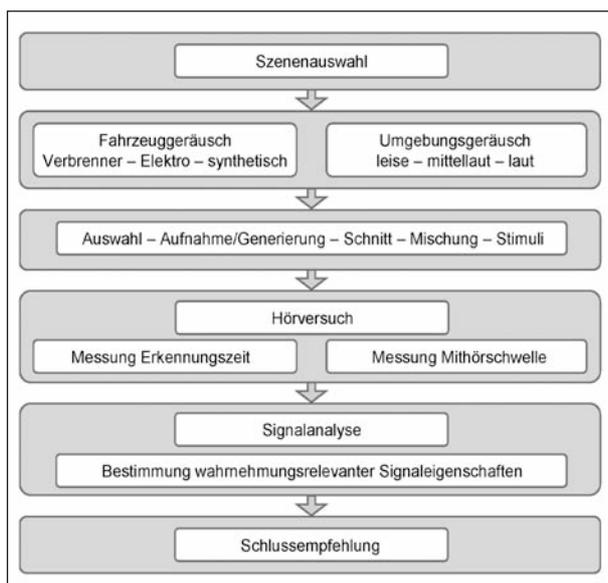
Bild 3: Anhalteszene am Fußgängerüberweg

Das Forschungsprojekt liefert belastbare Aussagen zum Gefährdungspotenzial „leiser Fahrzeuge“ für die drei ausgewählten Szenarien. Auf Grundlage der Erkenntnisse der Wahrnehmungsuntersuchungen können akustische Signale bestimmt werden, welche zur sicheren Erkennung von Fahrzeugen, auch durch blinde oder sehbehinderte Verkehrsteilnehmer, geeignet sind.

### 2.1.2 Methodik

Für die einleitend beschriebenen drei typischen Verkehrsszenen wurden situationsrelevante Fahrzeuggeräusche in Originalszenen aufgenommen (vgl. Bild 4). Im Ergebnis entstand eine Datenbank aus Geräuschen von Verbrennungs- und Elektrofahrzeugen ohne Soundgenerator. Ergänzt wurde die Geräuschdatenbank durch exemplarisch generierte synthetische Geräusche. In Verbindung mit einer Palette von Umgebungsgläuschen wurden Hörversuch-Setups zur Messung der auditiven Wahrnehmung zusammengestellt. Gemessen wurde die Erkennungszeit bis zur Erkennung des Fahrzeuggeräusches. Durch Pendelversuche wurden Mithörschwellen bestimmt, indem Probanden mit einem Potentiometer den Schalldruckpegel des Fahrzeuggeräusches so laut einstellten, dass sie das Geräusch gerade aus dem Hintergrundgeräusch der Verkehrsszene heraushörten.

Anschließend wurden die Fahrzeuggeräusche auf ihre wahrnehmungsrelevanten Signalanteile analysiert. Im Ergebnis dieser Analyse wurden Empfeh-



**Bild 4:** Methodik zur Bestimmung der auditiven Wahrnehmung von Fahrzeuggeräuschen

lungen für Minimalforderungen an Fahrzeugaußen- geräusche ausgesprochen.

### 2.1.3 Geräusch-Datenbasis

Die zu bewertenden Geräuschstimuli der Situationen 1 bis 3 wurden entweder über Kopfhörer im Hörlabor (Situation 1) oder über die Wellenfeldsynthese im Multimodalen Messlabor (Situation 2 und 3) wiedergegeben. Die Generierung der Geräuschstimuli wird im folgenden Kapitel dargelegt.

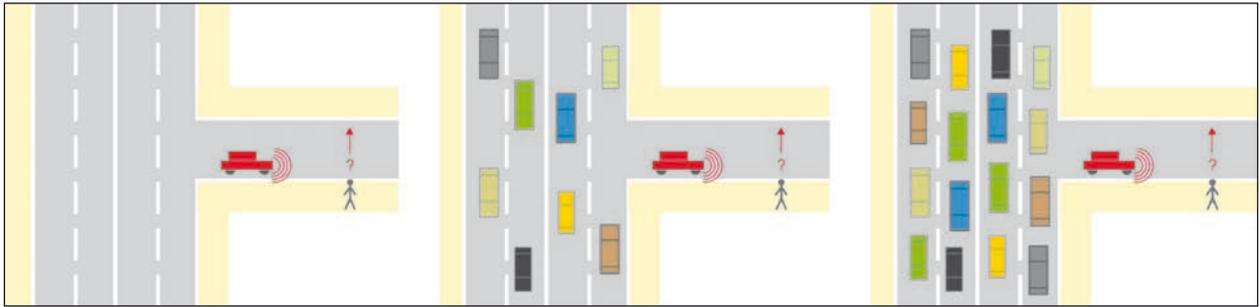
Die Datenbasis beinhaltet folgende Geräusche:

- Hintergrundgeräusche aus eigenen Aufnahmen an unterschiedlichen Orten der Dresdner Innenstadt (für alle Situationen verwendet),
- Annäherungs- und Motorstartgeräusche von verschiedenen Fahrzeugen mit Otto- oder Dieselmotor aus einer von der Daimler AG zur Verfügung gestellten Datenbank (für Situation 1 und Motorstartuntersuchungen verwendet),
- Annäherungsgeräusche von Elektro- und Hybridfahrzeugen aus eigenen Aufnahmen in ruhiger Umgebung des Dresdner Umlandes (für Situation 1 verwendet),
- Geräusche anfahrender Fahrzeuge mit Elektro- und Verbrennungsmotor aus eigenen Aufnahmen auf einem Dresdner Großparkplatz (verwendet für Situation 2),
- Geräusche anhaltender Fahrzeuge aus eigenen Aufnahmen auf einem Dresdner Großparkplatz (verwendet für Situation 3).

Im Weiteren werden die speziellen Aufnahmebedingungen für die einzelnen Geräusche näher erläutert.

#### 2.1.3.1 Hintergrundgeräusche

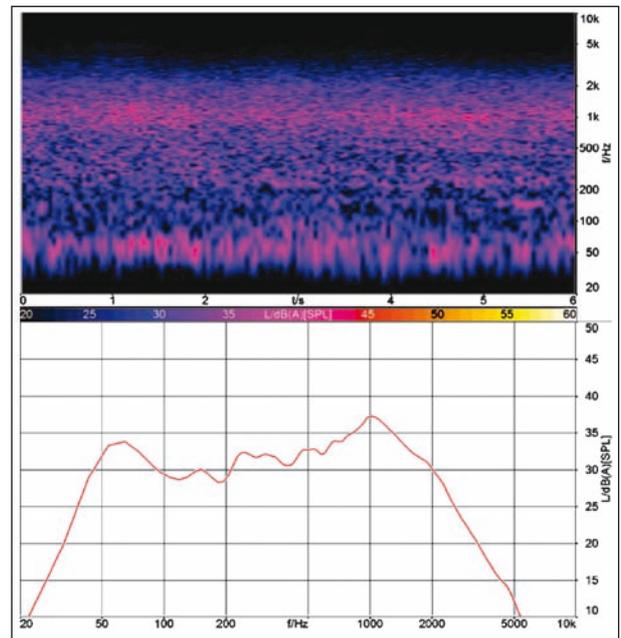
Ziel des Projektes sind Wahrnehmungsuntersuchungen von Fahrzeuggeräuschen bei verschiedener Verdeckung mit Hintergrundgeräuschen, wie sie in mannigfaltigen Verkehrssituationen auftreten können (Bild 5). Zu Beginn wurden an sehr unterschiedlichen Orten an Kreuzungen und Hauptverkehrsstraßen in der Dresdner Innenstadt akustische Aufnahmen mit einem Kunstkopf und einem 1/2“-Messmikrofon mit Kugelcharakteristik durchgeführt. Die Kunstkopfaufnahmen wurden für alle Experimente mit Kopfhörerwiedergabe und die Messmikrofonaufnahmen für die Experimente mit Wie-



**Bild 5:** Schematische Darstellung von unterschiedlich lauten Verkehrsszenarien

dergabe über die Wellenfeldsynthese verwendet. Nach dem Abhören durch Experten des Lehrstuhles wurden die Aufnahmen klassifiziert und nach ihrer Eignung für das Forschungsprojekt sortiert. Das Hauptkriterium war die Homogenität der Aufnahme ohne Dominanz von Einzelereignissen, wie sie bei einer Vorbeifahrt von Lkw, Bussen, Straßenbahnen oder Motorrädern auftreten können (PEDERSEN 2010). Die Suche nach geeigneten Abschnitten gestaltete sich relativ schwierig. Um die genannten Inhomogenitäten weitgehend auszuschließen, wurden die Hintergrundstimuli aus kurzen Abschnitten zusammengeschnitten, wobei auf die Unhörbarkeit der Übergangsstellen geachtet wurde.

Im Ergebnis entstanden vier Hintergrund-Stimuli mit Mittelungspegeln des Schalldruckes von 49, 52, 60 und 62 dB (A). Diese wurden in den Experimenten mit „sehr leise“, „leise“, „mittellaut“ und „laut“ beschrieben. Im Bild 6 sind exemplarisch das Frequenzspektrum über der Zeit sowie das gemittelte Frequenzspektrum für eine ausgewählte Hintergrundszene dargestellt.



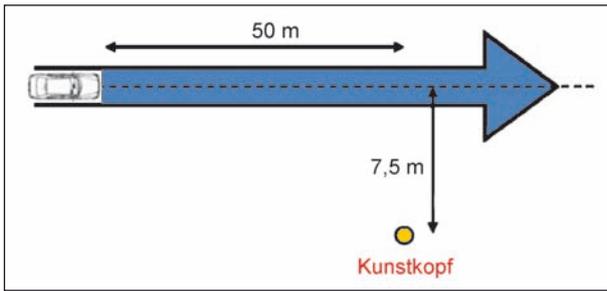
**Bild 6:** Hintergrund-Stimulus „mittellaut“, FFT über der Zeit (oben) und Mittelungsspektrum (unten), DFT-Länge 4096 Verbrennungsfahrzeuggeräusche – Daimler-Datenbank

### 2.1.3.2 Verbrennungsfahrzeuggeräusche – Daimler-Datenbank

Für die Situation 1 „Herannahendes Fahrzeug“ konnten Aufnahmen aus einer Datenbank der Daimler AG benutzt werden. Sie stammen aus Aufnahmen der Betriebszustände „Ampelstart-fern“ und „Teillast-fern“. Der Unterschied zwischen beiden Betriebszuständen liegt in einer etwas stärkeren Beschleunigung beim Betriebszustand „Ampelstart-fern“ gegenüber „Teillast-fern“ und – was für die Untersuchungen als wesentlich erschien – dem Baujahr der Fahrzeuge. So liegen die Erstzulassungsdaten der „Ampelstart-fern-Fahrzeuge“ zwischen 2000 und 2005 und die der „Teillast-fern-Fahrzeuge“ zwischen 2005 und 2008. In Tabelle 1 sind alle 14 Fahrzeuge, deren Geräusche in die Experimente einfließen, aufgelistet. Bei der Fahr-

Marke	Fahrzeug	Klasse	Motor
Daimler	S168 E 16	A-Klasse	Otto
Ford	Focus 2.0	A-Klasse	Otto
Daimler	S168 D 17	A-Klasse	Diesel
VW	Golf TDI 1.9	A-Klasse	Diesel
Daimler	W204DE 18 LA	C-Klasse	Diesel
Audi	A4 20 TDI	C-Klasse	Diesel
Audi	A6 3.2	E-Klasse	Otto
Daimler	W221 KE 55	S-Klasse	Otto
Audi	A8 42	S-Klasse	Otto
Daimler	W220 DE 40	S-Klasse	Diesel
Audi	TT 3.2	SLK-Klasse	Otto
Daimler	R171 KE 35	SLK-Klasse	Otto
BMW	750i	S-Klasse	Otto
Audi	A8 TDI	S-Klasse	Diesel

**Tab. 1:** Fahrzeuge – Annäherungsgeräusch



**Bild 7:** Aufnahmesituation – herannahendes Fahrzeug

Marke	Fahrzeug	Klasse	Motor
Audi	A4 18 TFSI	C-Klasse	Otto
BMW	320i	C-Klasse	Otto
Audi	A4 20 TDI	C-Klasse	Diesel
Daimler	A209 E18 ML	CLK-Klasse	Otto
BMW	530i	E-Klasse	Otto
Daimler	W211DE 30 LA	E-Klasse	Diesel
BMW	750i	S-Klasse	Otto
Audi	TT 3.2	SLK-Klasse	Otto
Daimler	R171 KE 35	SLK-Klasse	Otto
BMW	Z4 3.0	SLK-Klasse	Otto

**Tab. 2:** Fahrzeuge – Motorstartgeräusch

zeugauswahl wurde im Rahmen der Verfügbarkeit auf eine ausgewogene Mischung sowohl von Fahrzeugmarken und -klassen als auch von Otto- und Dieselmotoren geachtet. Die Aufnahmesituation der Annäherungsgeräusche ist im Bild 7 dargestellt. Das Fahrzeug fährt in 50 m Abstand vom Kunstkopf mit Teillastbeschleunigung an und passiert den Kunstkopf mit einer Vorbeifahrtsgeschwindigkeit von 50 km/h.

Für die Erkennungssituation „Motorstart“ konnten ebenfalls Geräusche aus der Daimler-Datenbank verwendet werden. Bei der Aufnahme der Motorstartgeräusche (Fahrzeuge in Tabelle 2) betrug die Quellentfernung zum Kunstkopf 4 m.

### 2.1.3.3 Elektro- und Hybridfahrzeuggeräusche

Für die Annäherungssituation wurden Außengeräusche von 6 verschiedenen Elektro- und Hybridfahrzeugen mit fahrzeugtypischer Bereifung aufgenommen. Die Audioaufnahmen aller Fahrzeuggeräusche entstanden an einem windstillen Tag auf einer trockenen, sauberen Asphaltstraße in einer ruhigen Umgebung im nördlichen Umland von Dresden (Bild 8).



**Bild 8:** Straßenbelag für Geräuschaufnahmen herannahender Elektro- und Hybridfahrzeuge

Marke	Fahrzeug	Elektro Hybrid EREV <sup>1</sup>	Sound-generator
Chevrolet	Matiz	Elektro	stationär
Mitsubishi	iMiev	Elektro	ohne
Nissan	Leaf	Elektro	ohne
Opel	Ampera	EREV	ohne
Toyota	Prius	Hybrid	ohne
Audi	Q 5	Hybrid	ohne

<sup>1</sup> Extended-Range Electric Vehicle (Elektrofahrzeug mit verlängerter Reichweite)

**Tab. 3:** Elektro- und Hybridfahrzeuge – Annäherungsgeräusch

Die Sauberkeit der Straße stellte sich als ein wesentliches Kriterium für akzeptable Aufnahmen heraus, da bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten die Geräuscherkennung auf verschmutzter Straße deutlich früher stattfindet als bei sauberem Asphalt. Gleichmaßen wurde darauf geachtet, dass das Reifenprofil möglichst frei von Steinen war. In Tabelle 3 sind alle aufgenommenen Fahrzeuge zusammengestellt.

Die Aufnahmesituation entsprach der schon in Bild 7 gezeigten „Daimler-Variante“. Mit Ausnahme des Chevrolet Matiz besaß kein Fahrzeug einen Sound-generator. Das E-Fahrzeug Chevrolet Matiz wurde für den Flughafeneinsatz umgerüstet und mit einem stationären Soundgenerator bestückt.

Die Eigenschaften des Generators werden im Kapitel 2.2.3.2 näher beschrieben.

Wie schon bei den Daimler-Aufnahmen wurde die Beschleunigung so gewählt, dass die Fahrzeuggeschwindigkeit am Kunstkopf 50 km/h betrug. Dieses Beschleunigungsverhalten führte bei den Hybridfahrzeugen (Toyota Prius und Audi Q5) zum „vorzeitigen“ Starten des Verbrennungsmotors. Daher wurden für alle Fahrzeuge (außer Chevrolet Matiz) auch

Endgeschwindigkeiten von 30 km/h und 40 km/h aufgenommen, um Varianten mit ausschließlichem Elektrobetrieb zu erhalten. Für den Chevrolet Matiz, als erstes gemessenes Fahrzeug, wurden diese Varianten nicht aufgenommen. Zu diesem Zeitpunkt war man sich des „Problems“ eines zu früh anspringenden Verbrennungsmotors noch nicht bewusst. Das Annäherungsgeräusch des Opel Ampera wurde bei 50 km/h in beiden Varianten (mit/ohne Verbrennungsmotor) aufgenommen.

## 2.2 Herannahendes Fahrzeug

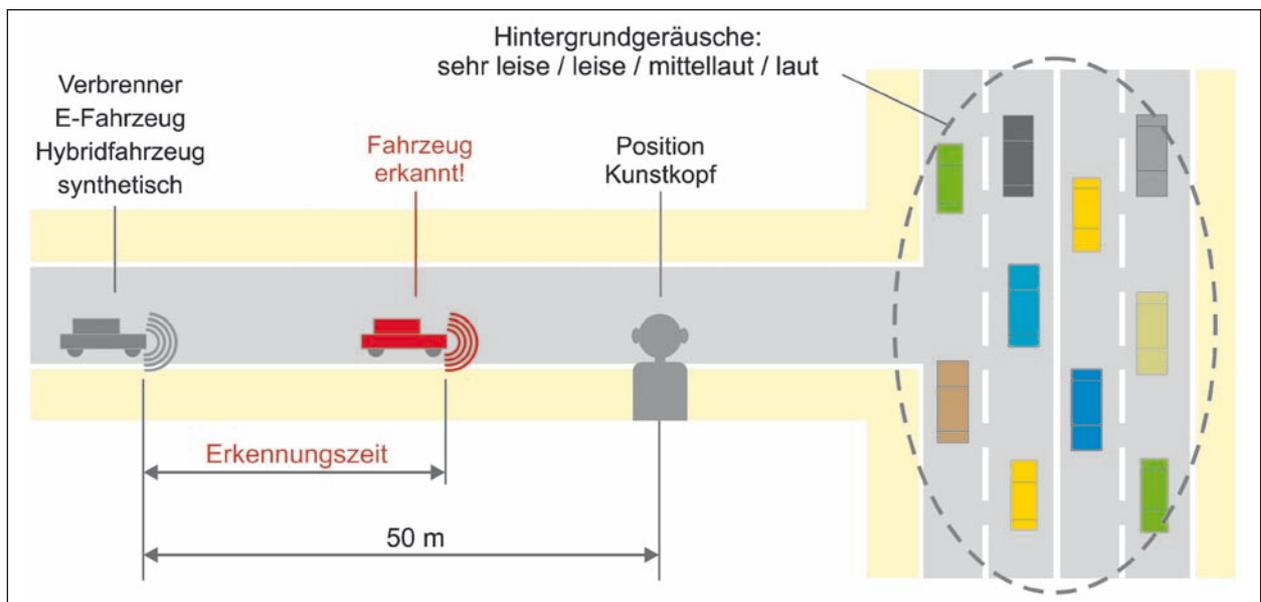
Die Situation eines herannahenden Fahrzeuges stellt eine typische Verkehrssituation dar, in der ein Fußgänger eine Querungsentscheidung treffen muss. Dabei ist die Entfernung, in welcher ein nahendes Fahrzeug wahrgenommen wird, abhängig vom Geräusch dieses Fahrzeuges und dem parallel wahrgenommenen Umgebungsgeschall. Im urbanen Straßenverkehr besonders häufig auftretende Konstellationen sind Nebenstraßen ohne Signalanlagen oder Fußgängerüberwege. In Abhängigkeit des Geräuschniveaus der übrigen Verkehrsumgebung, welche häufig auch von angrenzenden Hauptstraßen geprägt ist, gelingt Passanten die auditive Wahrnehmung von Einzelfahrzeugen besser oder schlechter (KERBER & FASTL 2007, KERBER & FASTL 2008). Die hier untersuchte Situation (Bild 9) stellt eine Nebenstraße dar, auf welcher sich einem Fußgänger ein Fahrzeug von links nähert. Rechts des Fußgängers befindet sich eine

Hauptverkehrsstraße mit verschieden dichtet Verkehr. Durch diese variablen Verkehrsdichten wird das Geräusch des sich nähernden Fahrzeuges unterschiedlich verdeckt.

Im Wahrnehmungsversuch wurden den Probanden vier unterschiedliche Hintergrundgeräusche mit Schalldruckpegeln von (49 bis 62) dB (A) dargeboten.

### 2.2.1 Stimuli für Hörversuch

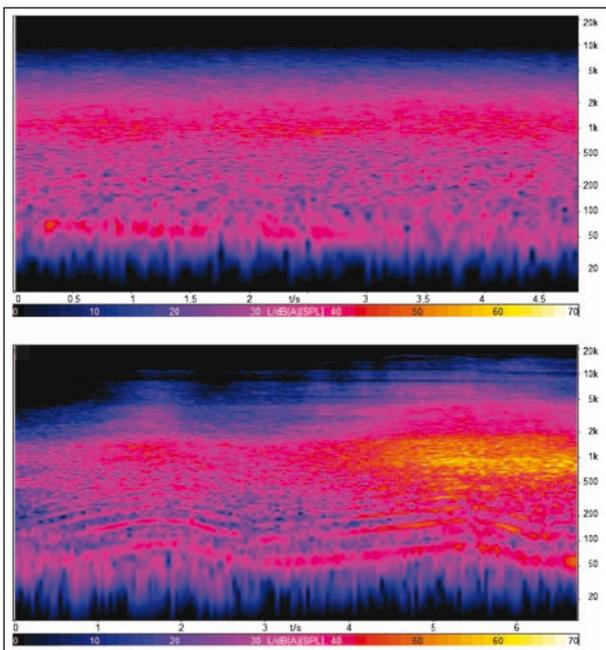
Aus den im Kapitel 2.1.3 beschriebenen Aufnahmen wurden Szenen zusammengemischt, welche sowohl ein Hintergrundgeräusch als auch ein Annäherungsgeräusch beinhalten. Um einen Einfluss der geringfügigen Pegelunterschiede im Hintergrund auszuschließen und um zu verhindern, dass sich die Probanden auf das Einsetzen der Fahrzeuggeräusche einstellen können, wurden die Annäherungsgeräusche mit randomisierten Verzögerungszeiten zwischen 2 und 4 s gestartet. Die Stimuluslänge, vom Anfahren bis zur Kunstkopfposition, betrug ca. 5 s (bei 50 km/h Endgeschwindigkeit). Bild 10 zeigt beispielhaft die Spektrogramme eines Hintergrundgeräusches und eines Annäherungsgeräusches. Aus der Kombination von 4 Hintergrundgeräuschen, 32 Annäherungsgeräuschen (14 Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, 16 Geräusche von Elektro- und Hybridfahrzeugen bei unterschiedlichen Endgeschwindigkeiten und 2 synthetisch erzeugten Geräusche) und einer kompletten Wiederholung entstand ein Hörversuch mit 256 Stimuli.



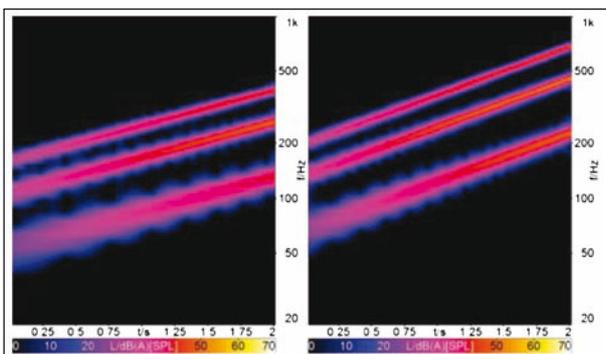
**Bild 9:** Schematische Darstellung der Erkennungszeitmessung – Situation: herannahendes Fahrzeug

Die beiden synthetischen Test-Stimuli wurden auf Basis des Drehzahlverlaufes eines typischen Verbrennungsfahrzeuges realisiert. Erzeugt wurden drei Motorordnungen, welche der 4., 8. und 12. Ordnung entsprechen. Der Unterschied beider Stimuli lag im Frequenzanstieg mit den Faktoren 2,5 und 3,3. Die Länge der synthetischen Stimuli wurde auf 2 s begrenzt, da in diesem Bereich der erste Schaltvorgang bei einem Verbrennungsfahrzeug stattfindet und bis dahin eine Erkennung des Annäherungsgeräusches wünschenswert ist (siehe auch Bild 15, Mitte).

Beide Stimuli besitzen nach 2 s einen Pegel, welcher dem durchschnittlichen Pegel eines Verbrennungsfahrzeuges nach 2 s Annäherungsfahrt entspricht. Im Bild 11 sind die Spektrogramme der Test-Stimuli dargestellt.



**Bild 10:** Spektrogramme eines Hintergrundgeräusches (oben) und eines Annäherungsgeräusches (unten), jeweils der linke Kanal



**Bild 11:** Spektrogramme der synthetischen Test-Stimuli, links: „synthetisch 1“ und rechts: „synthetisch 3“

## 2.2.2 Erkennungszeitmessung

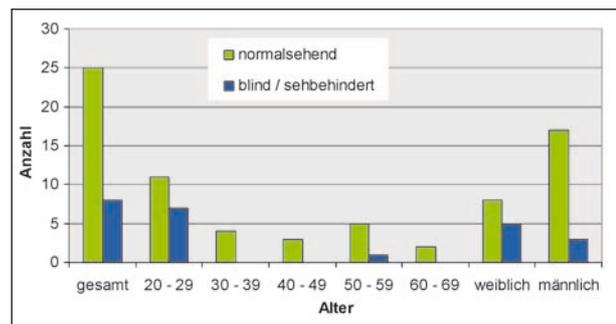
Ziel des Experimentes ist die Messung der Erkennungszeit, die eine Versuchsperson benötigt, um auf die auditive Erkennung eines sich nähernden Fahrzeuggeräusches gegenüber einem Hintergrundgeräusch zu reagieren.

### 2.2.2.1 Probanden

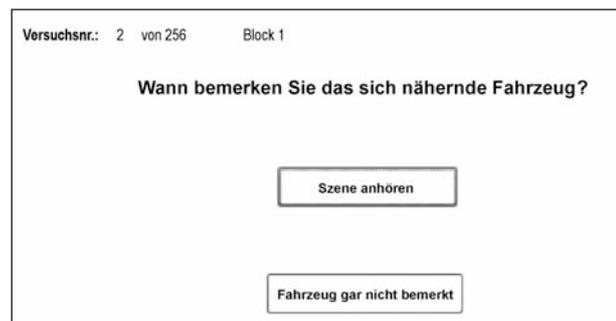
Am Hörversuch Erkennungszeitmessung „Herannahendes Fahrzeug“ nahmen 33 Probanden (20 männlich, 13 weiblich) teil. 25 Personen der Gruppe sind normalsehend, 5 Personen sind blind und 3 Personen sind sehbehindert (Sehrest 5 % bis 20 %). Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 34 Jahre. Die Altersgruppenverteilung zeigt Bild 12. Alle Versuchspersonen sind normalhörend.

### 2.2.2.2 Versuchsdesign

Im Hörversuch sollten die Probanden die Frage „Wann bemerken Sie das sich nähernde Fahrzeug?“ beantworten. Die in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Stimuli wurden im Hörversuchslabor über einen Kopfhörer der Fa. Sennheiser vom Typ HD 600 kalibriert wiedergegeben. Sowohl die Wiedergabereihenfolge der Paarungen aus Fahrzeug- und Hintergrundgeräusch als auch die Anfahrzeitpunkte



**Bild 12:** Probandenkollektiv des Hörversuchs



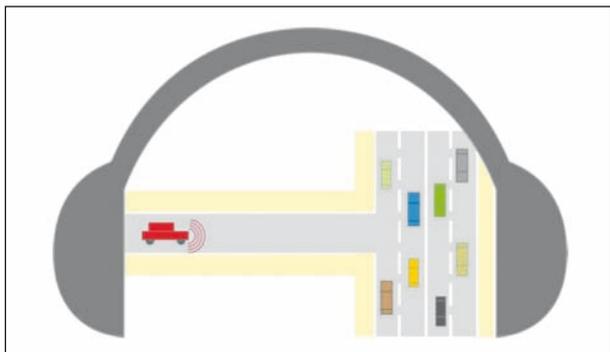
**Bild 13:** Versuchsoberfläche des Hörversuchs Erkennungszeitmessung

der Fahrzeuge wurden randomisiert dargeboten. Die Versuchspersonen reagierten auf die Erkennung des wahrgenommenen Fahrzeuggeräusches im Versuch per Mausklick. Die gemessenen Erkennungszeiten wurden in einer Excel-Tabelle abgelegt. Im Versuchs-Setup wurden alle determinierten Delays bestimmt und kompensiert. Die Summe der nicht korrigierbaren hardwarebedingten Verzögerungszeiten wurde mit  $< 10$  ms bestimmt. Dieser Betrag stellt den Fehler der Erkennungszeitmessung dar – ist aber vernachlässigbar klein. Die Benutzeroberfläche (Bild 13) wurde mit Matlab-GUI implementiert. Dem eigentlichen Hörversuch wurde ein Training vorangestellt, in welchem verschiedene Situationen dargeboten wurden. In diesem Training wurden sowohl Verbrennungsfahrzeuggeräusche wie auch Geräusche von Elektrofahrzeugen und ein synthetisches Geräusch vor unterschiedlich lauten Hintergrundgeräuschen präsentiert. Die Probanden konnten sich mittels der Trainingsstimuli gut „einhören“ und erhielten zusätzlich vom Versuchsleiter Erläuterungen zur gehörten Verkehrsszene. Der eigentliche Hörversuch mit den 256 zu bewertenden Stimuli umfasst einen Zeitraum von 40 bis 45 Minuten. Die Probanden erhielten pro Hörversuch eine Aufwandsentschädigung von 10 €.

### 2.2.2.3 Ergebnisse

Bild 14 verdeutlicht noch ein Mal die Szene im Hörversuch. Der Proband nimmt über Kopfhörer ein von links kommendes Fahrzeug wahr, während das Hintergrundgeräusch von einer rechts liegenden Hauptstraße kommt.

Im Bild 15 sind einführend die mittleren Erkennungszeiten beispielhaft für ein Verbrennungsfahrzeug und ein Elektrofahrzeug in die jeweiligen Spektrogramme eingetragen im Vergleich dazu, oben das Spektrogramm des parallel gehörten Hin-

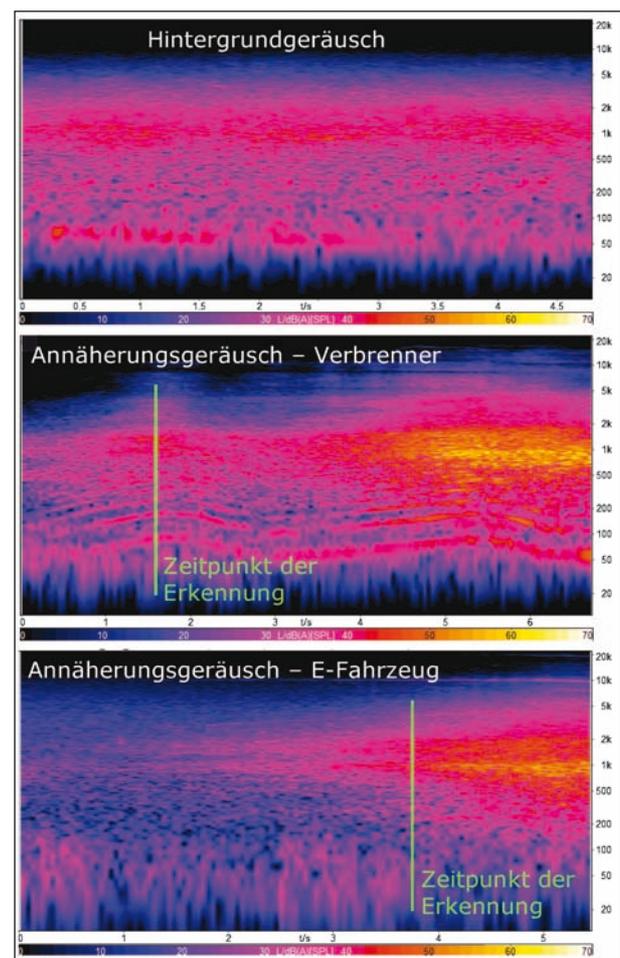


**Bild 14:** Hörszene – herannahendes Fahrzeug (sinnbildlich)

tergrundgeräusches. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind jeweils nur die Kanäle für das linke Ohr dargestellt. Beim ausgewählten Hintergrundstimulus handelt es sich um das „mittellaute“ Hintergrundgeräusch.

Sehr deutlich zu erkennen ist, wodurch die große Differenz im Erkennungszeitpunkt entsteht. Dem Elektrofahrzeuggeräusch fehlen sowohl tiefere als auch zeitvariante Signalanteile.

Der spektrale Schwerpunkt liegt bei beiden Fahrzeugtypen im Verdeckungsbereich des Hintergrundes. Im Fall des E-Fahrzeuges erreicht der Pegel im Bereich um 1 kHz erst über 2 s später als das Verbrennungsfahrzeug Werte, welche für eine Unterscheidung genügen. Beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor genügen die im Bild gut sichtbaren Motorordnungen im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 300 Hz zur Erkennung. Der zum



**Bild 15:** Spektrogramme: Verkehrshintergrundgeräusch (oben), Annäherungsgeräusch Verbrennungsfahrzeug mit Erkennungszeitpunkt (Mitte) und Annäherungsgeräusch Elektrofahrzeug mit Erkennungszeitpunkt (unten), dargestellt sind jeweils nur die linken Kanäle

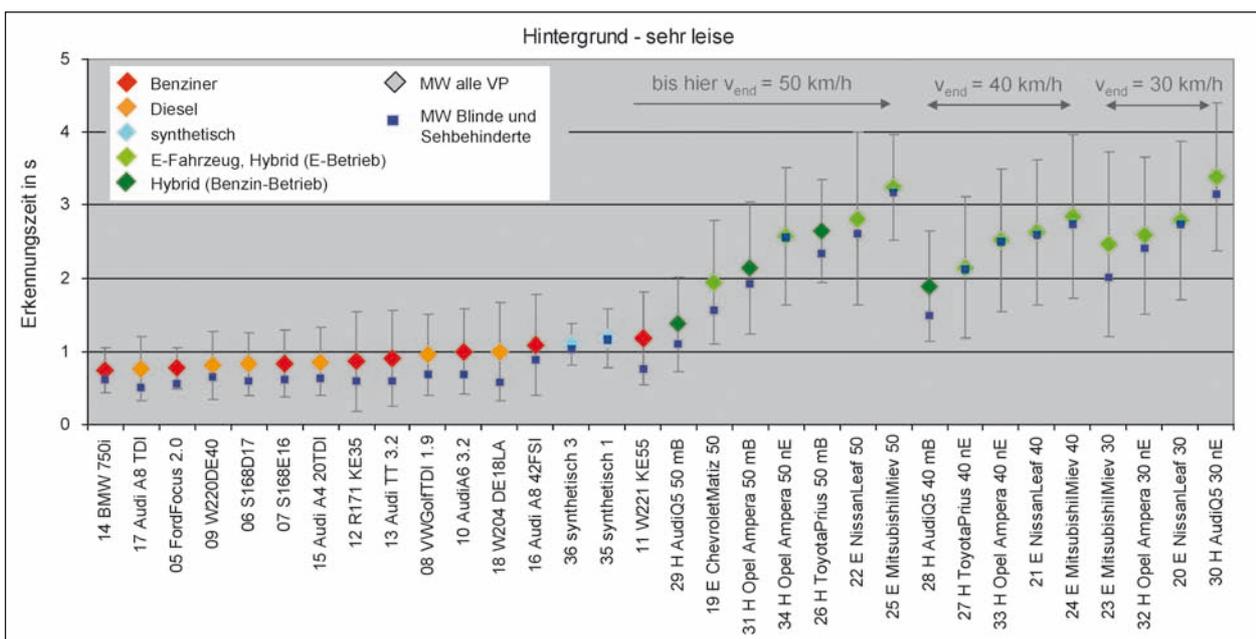
Erkennungszeitpunkt schon relativ hohe Pegel im 1. kHz-Bereich liefert zur Erkennung vermutlich keinen Beitrag. Dieses Beispiel steht stellvertretend für beide Fahrzeuggruppen zu Beginn des Kapitels „Ergebnisse“, da es gut zur Erklärung der Probandenwahrnehmung geeignet ist. Im Weiteren werden die Ergebnisse aller untersuchten Geräuschkombinationen detailliert dargestellt.

Die Ergebnisse werden getrennt nach den verschiedenen lauten Hintergrundgeräuschen diskutiert. In den Diagrammen (Bilder 16 bis 19) ist die Erkennungszeit über alle Fahrzeuggeräusche aufgetragen. Die Erkennungszeit ist hier die Zeitspanne vom Zeitpunkt des in 50 m Entfernung losfahrenden Fahrzeuges bis zur Erkennungsreaktion der Versuchsperson. Die Mittelwerte der Erkennungszeiten aller Probanden sind mit den jeweiligen Standardabweichungen abgebildet. Zur besseren Unterscheidung sind die Erkennungswerte von Geräuschen der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren in Rottönen (Ottomotoren rot, Dieselmotoren orangefarben), die Werte von Elektrofahrzeuggeräuschen grün und die Erkennungszeiten der beiden synthetischen Geräusche hellblau dargestellt.

Wie schon im Kapitel 2.1.3.3 beschrieben, kann bei Hybridfahrzeugen der Fall eintreten, dass der Verbrennungsmotor während der Messfahrt anspringt. In Fällen in denen der Verbrennungsmotor ansprang bevor die Erkennung stattfand (in der Fahrzeugbezeichnung „mB“), sind die Rauten dun-

kelgrün dargestellt und in Fällen des Anspringens nach dem Erkennungszeitpunkt, sind die Rauten hellgrün wie im reinen Elektrobetrieb („nE“) gezeichnet. Zusätzlich zum Mittelwert über alle Versuchspersonen sind die Mittelwerte der Gruppe der blinden und sehbehinderten Personen als kleine blaue Quadrate dargestellt.

Im Diagramm der Erkennungszeiten für den Hintergrund „sehr leise“ (Bild 16) zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Verbrennungsfahrzeug- und Elektrofahrzeuggeräuschen. Die Gruppe der Verbrennungsfahrzeuge wurde im Mittel bei knapp einer Sekunde erkannt, die E-Fahrzeuge bei etwa zwei bis reichlich drei Sekunden und die Hybridfahrzeuge liegen dazwischen. Auffällig ist die geringe Streuung zwischen den Verbrennungsfahrzeugen. Es gibt keinen nennenswerten Unterschied zwischen Diesel- und Ottomotor. Der Unterschied zwischen den Betriebszuständen „Ampelstart“ und „Teillast“ wird genauso wenig sichtbar wie die Unterschiede beim Jahr der Erstzulassung. Die Streuung bei den Elektrofahrzeuggeräuschen ist dagegen deutlich größer. Das liegt zum einem daran, dass das am besten erkannte Fahrzeug Chevrolet Matiz, einen Soundgenerator besitzt, und zum anderen an den unterschiedlichen Endgeschwindigkeiten. Da die Erkennung von Elektrofahrzeugen im Wesentlichen auf dem Rollgeräusch basiert, besitzen auch unterschiedliche Bereifungen einen Einfluss. Die beiden synthetischen Geräusche ordnen sich am Ende der Verbrennergruppe ein, was durch-

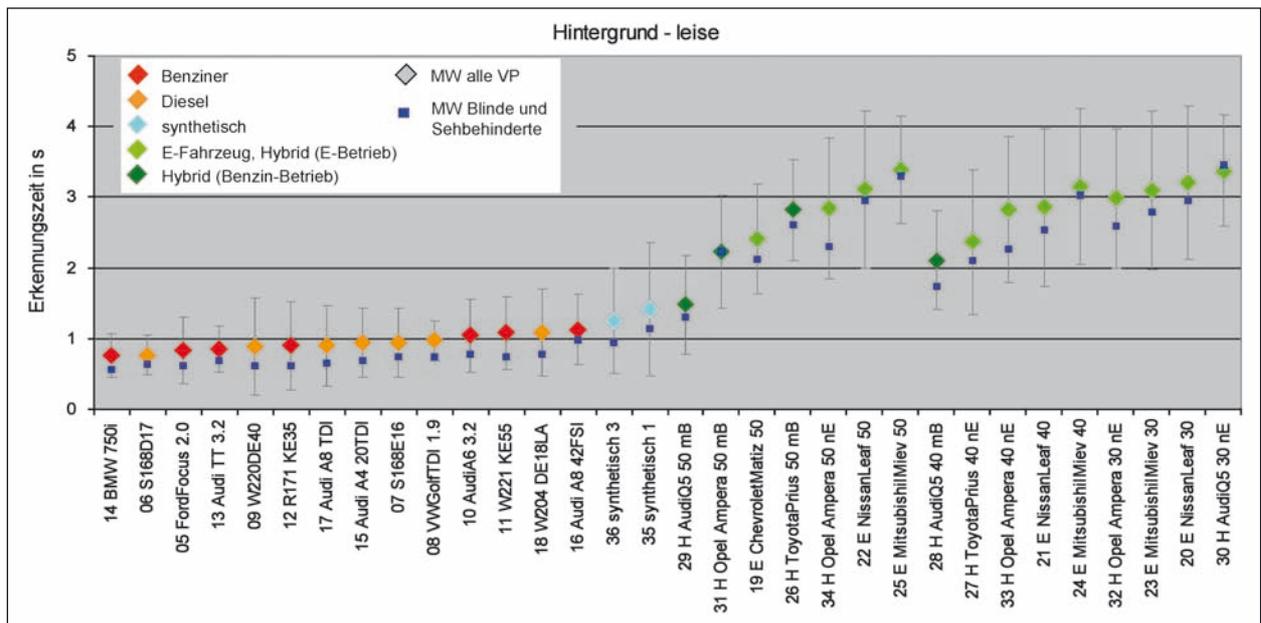


**Bild 16:** Erkennungszeit für alle Annäherungsgeräusche für den Hintergrund „sehr leise“, E- und Hybrid-Fahrzeuge sind zusätzlich nach Endgeschwindigkeit gruppiert (Geschwindigkeitsbereiche oben rechts eingezeichnet)

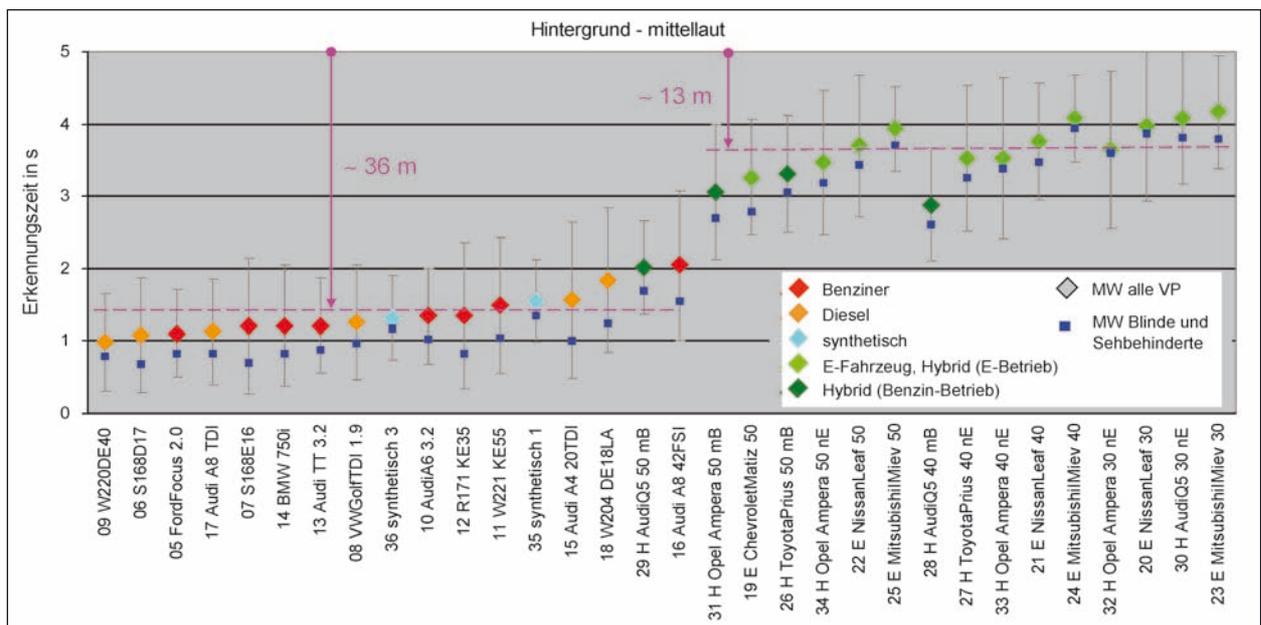
aus verständlich ist, da sie eine deutliche Zeitvarianz, ähnlich wie die Verbrennungsgeräusche aufweisen. Einen Nachteil besitzen die synthetischen Geräusche sicher in ihrer Unvertrautheit. Die Reaktion der Blinden und Sehbehinderten war geringfügig schneller als die von Normsehenden. Das könnte daran liegen, dass Blinde geschult in der Trennung unterschiedlicher Geräusche sind, aber auch an ihrem größeren Ehrgeiz gegenüber Normsehenden im Hörversuch. Die Ergebnisse im Bild 17 für den „leisen“ Hintergrund liefern ein ganz

ähnliches Bild, was nicht verwundert, da der Hintergrundpegel nur um etwa 2 dB (A) höher lag als beim „sehr leisen“ Hintergrund. Insgesamt haben sich die Erkennungszeiten für beide Fahrzeuggruppen nur geringfügig vergrößert. Bild 18 bildet die Erkennungszeiten für einen mittellauten Hintergrund ab.

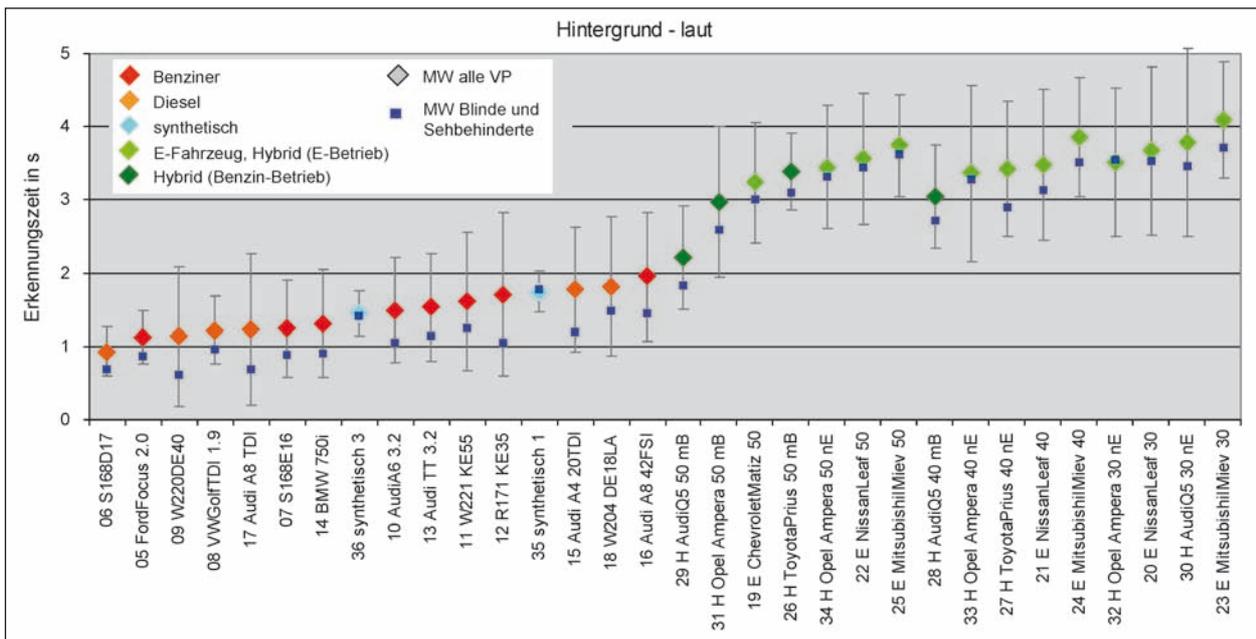
Je lauter das Hintergrundgeräusch ist, desto schwieriger wird die Wahrnehmung des Annäherungsgeräusches. Die Erkennungszeiten verschieben sich beim Hintergrund „mittellaut“ um einige 100 ms.



**Bild 17:** Erkennungszeit für alle Annäherungsgeräusche für den Hintergrund „leise“, E- und Hybrid-Fahrzeuge sind zusätzlich nach Endgeschwindigkeit gruppiert



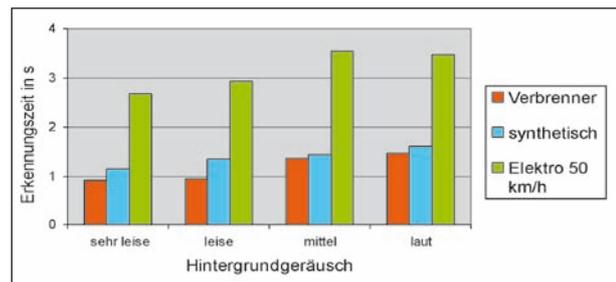
**Bild 18:** Erkennungszeit für alle Annäherungsgeräusche für den Hintergrund „mittellaut“, E- und Hybrid-Fahrzeuge sind zusätzlich nach Endgeschwindigkeit gruppiert



**Bild 19:** Erkennungszeit für alle Annäherungsgeräusche für den Hintergrund „laut“, E- und Hybrid-Fahrzeuge sind zusätzlich nach Endgeschwindigkeit gruppiert

Pinkfarben eingezeichnet sind die Gruppenmittelwerte von Verbrennungs- und Elektrofahrzeugen. Nimmt man (zur Verdeutlichung des Sachverhaltes) an, dass die Fahrzeuge von Anfang bis Ende mit einer konstanten Geschwindigkeit fahren, kann man den Erkennungszeiten Entfernungen zuordnen. Daraus ergäben sich die eingetragenen Werte von 36 und 13 m. Die 36-m-Entfernung wird in der Realsituation größer, da die Fahrzeuge zu diesem frühen Zeitpunkt noch eine niedrigere Geschwindigkeit aufweisen. Ein Fahrzeug, welches ein Fußgänger nach 1,4 s wahrnimmt, besitzt noch eine Entfernung von mehr als 36 m. Im Bereich der Elektrofahrzeugerkennung ist die Abschätzung deutlich genauer, da die Fahrzeuge zu diesem Zeitpunkt schon mit der Endgeschwindigkeit fahren. Streng genommen gilt diese Aussage nur für die Fahrzeuggeräusche mit 50 km/h Endgeschwindigkeit. Die jeweiligen Endgeschwindigkeiten stehen am Ende des Fahrzeugnamens, z. B. Nissan Leaf 50, für 50 km/h. Beim Fahrzeug „29 H Audi Q5 50 mB“ startete der Benzinmotor schon relativ zeitig, wodurch auch die relativ frühe Wahrnehmung begründet ist. Bei den Fahrzeugen 28 und 31 zündete der Benzinmotor später, sodass die Wahrnehmung davon nur teilweise beeinflusst wurde. Beim Fahrzeug 26 startete der Benzinmotor zwar ebenfalls, aber erst nach dem Erkennungszeitpunkt – also ohne Einfluss darauf.

Die Ergebnisse für den „lauten“ Hintergrund sind im Bild 19 dargestellt. Die Abweichungen zum „mittellauten“ Hintergrund sind sehr gering.



**Bild 20:** Mittlere Erkennungszeiten für die Gruppen: Verbrennungsfahrzeuge, synthetisch und Elektrofahrzeuge (nur jene mit gleicher Endgeschwindigkeit – 50 km/h – wie Verbrenner)

Bild 20 zeigt im Überblick die Erkennungszeiten für alle drei Gruppen.

Die größten Erkennungszeitdifferenzen bestehen, wie aufgrund der Pegeldifferenzen zu vermuten war, zwischen „leise“ und „mittellaut“. Für diese beiden Hintergründe sind die Erkennungszeiten geräuschabhängig im Bild 21 gezeichnet.

Die Sortierung ist für beide Kurven „aufsteigend“, wodurch übereinander stehende Werte nicht zwingend demselben Fahrzeug entsprechen. Auf eine Fahrzeugbeschriftung wurde daher verzichtet. Dabei zeigt sich bei den Elektrofahrzeuggeräuschen eine deutlich größere Differenz als bei den Geräuschen klassischer Antriebe.

Man könnte annehmen, dass die Erkennbarkeit von Fahrzeuggeräuschen mit der Höhe ihrer Schall-

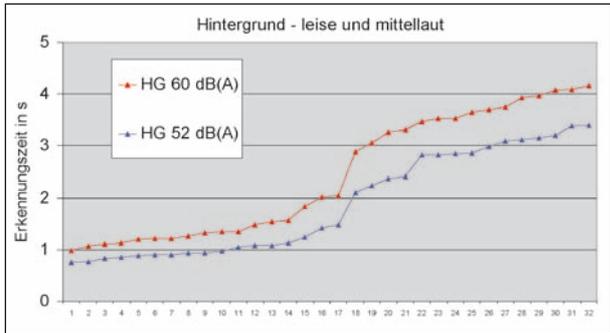
druckpegel korreliert – dass dies nicht der Fall ist, zeigt das Diagramm im Bild 22.

Im Diagramm ist die Erkennungszeit über dem A-bewerteten Schalldruckpegel zum Zeitpunkt der Erkennung aufgetragen. Die geringe Korrelation lässt den Schluss zu, dass es komplexere Zusam-

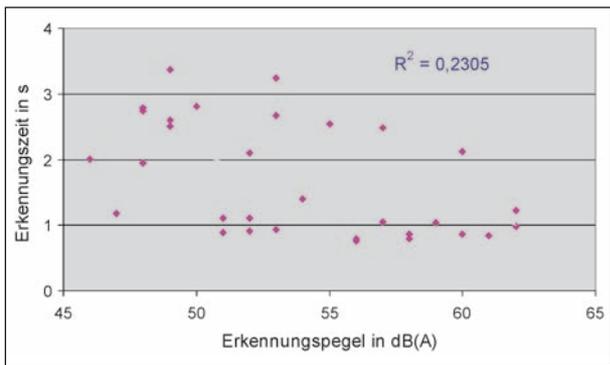
menhänge bei der Geräuscherkennung geben muss, was Anlass zur Hoffnung gibt, leisere (als gegenwärtige Verbrennungsgeräusche), aber dennoch gut erkennbare Geräusche zu bestimmen bzw. zu erzeugen (ähnliche Ergebnisse siehe PA-RIZET u. a. 2013).

Um wahrnehmungsrelevante Frequenzbereiche der Verbrennungsgeräusche zu erkennen, sind im Bild 23 die Terzpegel der Fahrzeuggeräusche zum Zeitpunkt der Erkennung dargestellt. In jedem Diagramm ist zum Vergleich das Spektrum des „mittel-lauten“ Hintergrundes grau eingezeichnet. Die Diagramme sind aufsteigend nach dem Erkennungspegel geordnet. Im ersten Diagramm oben links erscheint das Geräusch „synthetisch 3“ mit einem Erkennungspegel von nur 52,7 dB (A). Die über die graue Hintergrund- „Treppe“ herausragenden pinkfarbenen Flächen repräsentieren Terzpegel über dem Hintergrundpegel. Bei den verschiedenen Fahrzeugen zeigen sich ganz unterschiedliche Pegeldifferenzen. Der „Audi A4 20TDI“ ragt nur bei einigen Terzen wenige dB aus dem Hintergrund heraus. Einige andere Fahrzeuge besitzen dominante Terzen, mit mehr als 10 dB Überhöhung und andere wiederum besitzen über einen breiten Bereich höhere Pegel als der Hintergrund.

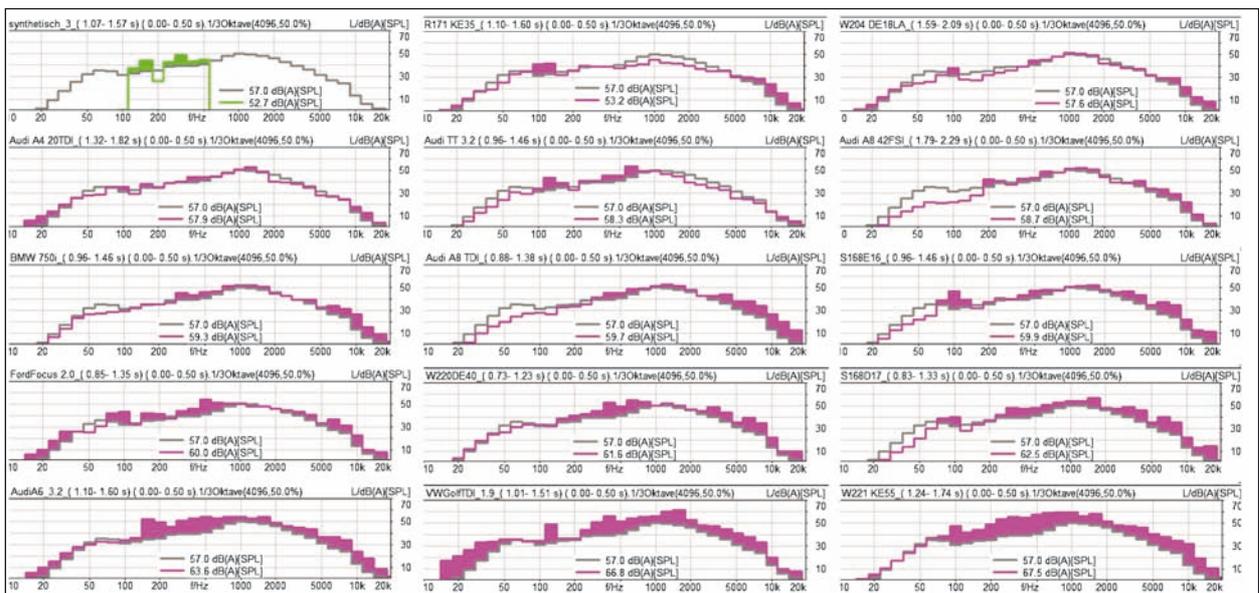
Bild 24 zeigt die Terzspektren der Elektrofahrzeuge im Vergleich zum Hintergrund. Ähnlich wie bei den Verbrennungsgeräuschen sind die Pegeldifferenzen, welche zur Erkennung benötigt werden, sehr unterschiedlich. Die geringsten Pegeldifferenzen



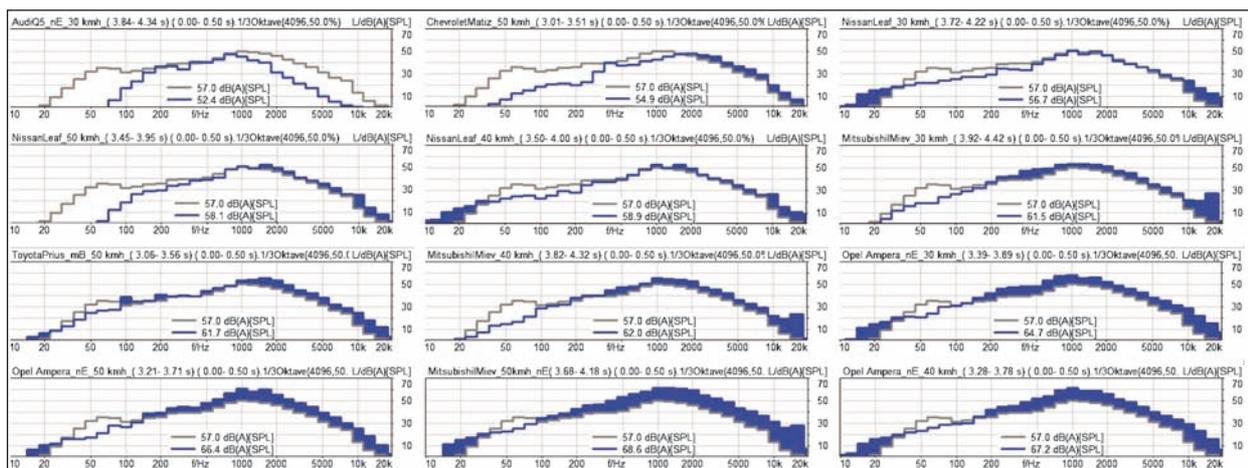
**Bild 21:** Erkennungszeiten für die Hintergründe „leise“ und „mittellaut“



**Bild 22:** Korrelation: Erkennungszeit – Erkennungspegel



**Bild 23:** Terzpegel bei Erkennung des Annäherungsgeräusches, linker Kanal, 500 ms (250 ms vor bis 250 ms nach der Erkennung), sortiert nach ihren Erkennungspegeln, Grün: synthetisches Geräusch, Pink: Verbrennungsfahrzeuge im Vergleich zum Hintergrundgeräusch „mittellaut“ (Grau)



**Bild 24:** Erkennungsterzpegel der Elektrofahrzeuge, Darstellung analog zu Bild 23

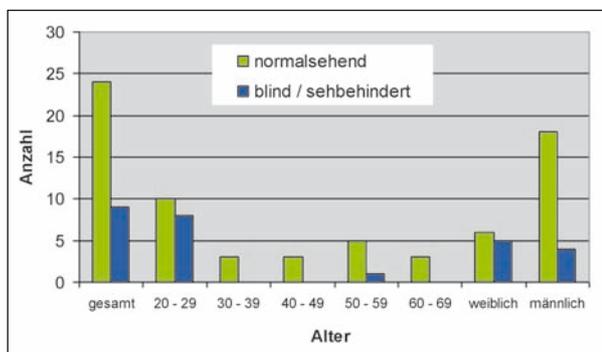
erscheinen wieder bei den Geräuschen mit den niedrigsten Erkennungspegeln. Der „Audi Q5 hybrid 30 km/h“ (oben links) wird wahrgenommen, obwohl er bei keiner Terz einen höheren Pegel als das Hintergrundgeräusch besitzt.

### 2.2.3 Mithörschwellenmessung

Die Mithörschwellenmessung ist eine klassische Methode der Psychoakustik. Bei der Bestimmung der Mithörschwelle kann eine Versuchsperson beispielsweise einen Ton derart im Schalldruckpegel verändern, dass dieser in einem Maskierer eben hörbar wird. In unserem Fall der Erkennung eines Annäherungsgeräusches handelt es sich um ein komplexes Signal eines Fahrzeuges in einer maskierenden Verkehrsumgebung. Die Mithörschwelle kann in einem adaptiven Verfahren oder einem Herstellungsverfahren ermittelt werden. In einem adaptiven Verfahren bestimmt der Versuchsleiter bzw. ein Computerprogramm die Pegel des zu untersuchenden Signals. Der Proband entscheidet nur noch, ob das Signal im Maskierer hörbar war oder nicht. Die für die Versuchsperson angenehmere Methode ist das Herstellungsverfahren, in welchem sie selbst den Signalpegel verändert, bis das Signal gerade hörbar ist. Da das Herstellungsverfahren außerdem effizienter ist, wurde es im Projekt angewendet.

#### 2.2.3.1 Probanden

Am Hörversuch Mithörschwellenmessung „Herannahendes Fahrzeug“ nahmen 33 Probanden (22 männlich, 11 weiblich) teil. 24 Personen der Gruppe sind normalsehend, 5 Personen sind blind und 4 Personen sind sehbehindert (Sehrest 5 % bis



**Bild 25:** Probandenkollektiv – Mithörschwellenmessung

20 %). Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 36 Jahre. Die Altersgruppenverteilung zeigt Bild 25. Bis auf wenige Ausnahmen entspricht das Probandenkollektiv dem der ersten Untersuchung.

Nach der Auswertung wurden die Datensätze von 7 Personen gestrichen, da viele ihrer Bewertungen Pegel aufwiesen, die nichts mit den präsentierten Signalen zu tun haben konnten. Als Hintergrund wird eine fehlerhafte Bedienung vermutet.

#### 2.2.3.2 Versuchsdesign

Bei der Mithörschwellenmessung nach dem Herstellungsverfahren stellt der Proband die Lautstärke des Fahrzeuggeräusches mit einem Potentiometer so ein, dass er es gerade noch aus der Umgebung heraushört. Die konkrete Aufgabe lautete: „Stellen Sie die Lautstärke des sich nähernden Fahrzeuges so ein, dass Sie es gerade noch aus der Umgebung heraushören“. Dieser sogenannte Pendelversuch ist zwar nicht so realitätsnah wie der Erkennungszeitmessungsversuch, aber durch ihn verspricht man sich eine bessere Trennung relativ ähnlicher Signale. Da die Ergebnisunterschiede der Erken-

nungszeitmessung zwischen dem Hintergrund „sehr leise“ und „leise“ außerordentlich gering waren, wurde bei der Mithörschwellenmessung auf den Hintergrund „sehr leise“ verzichtet. Die Anfahrgeräusche wurden auf die ersten 2 Sekunden geschnitten, da man davon ausgeht, dass ein Fußgänger ein herannahendes Fahrzeug im Abstand von mindestens 30 Metern erkennen sollte, um sicher die Straße zu überqueren. Außerdem erfolgt bei diesem Betriebszustand nach 2 Sekunden Beschleunigung in der Regel ein Gangwechsel, was ein auditives Schaltloch zur Folge hat. Zusätzlich zu den Geräuschen der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, wurde das Geräusch des E-Fahrzeugs Chevrolet Matiz in die Untersuchung mit einbezogen, da es als einziges E-Fahrzeug einen Soundgenerator beinhaltet. Dieser Generator erzeugt einen betriebszustandsunabhängigen Sound.

### 2.2.3.3 Ergebnisse

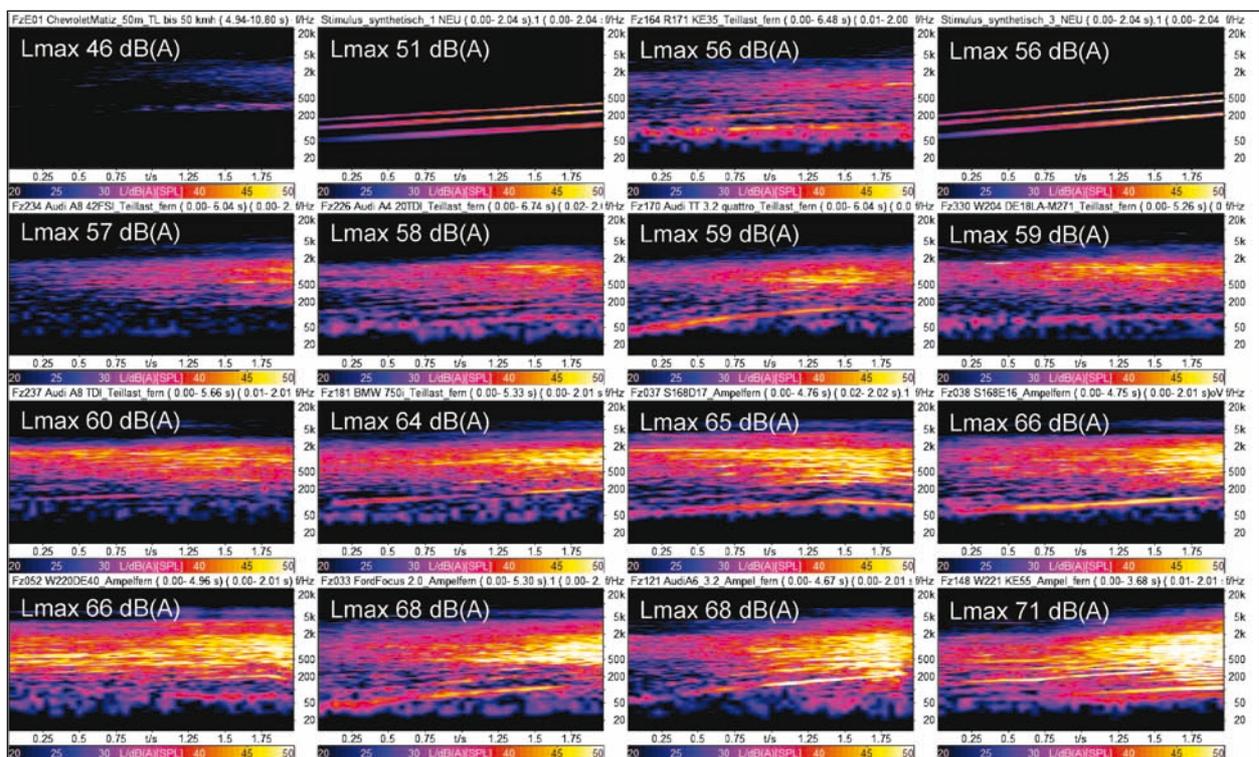
Bild 26 zeigt die verwendeten Stimuli bei ihren im Hörversuch dargebotenen Pegeln. Die Reihenfolge der Darstellung entspricht der Höhe des Maximalpegels während dieser 2 s.

Deutlich abweichend von den Verbrennungsfahrzeuggeräuschen zeigen sich die beiden syntheti-

schen Stimuli und das von einem statischen Soundgenerator bestimmte Geräusch des Chevrolet Matiz. Aber auch die Bilder der Verbrenner-Gruppe weisen unterschiedliche Merkmale bezüglich Spektrums, Zeitverlaufs und Pegels auf.

Bild 27 zeigt die Ergebnisse der Mithörschwellenmessungen für die drei Hintergründe. Dargestellt ist die durch den Probanden eingestellte Pegeldifferenz zum Originalpegel, bei welcher das Annäherungsgeräusch gerade noch wahrgenommen wird. Beispielsweise wird bei dem „leisen“ Hintergrund (Bild 27 oben) das Fahrzeug 09 W221 KE55 mit einer Pegelreduktion von ca. 19 dB immer noch herausgehört. Das Geräusch des Fahrzeugs 14 Audi A8 42FSI hingegen konnten die Probanden im Mittel nur 8 dB leiser drehen, um es noch wahrzunehmen. Das E-Fahrzeug Chevrolet Matiz musste im Pegel geringfügig angehoben werden. Bei dieser Untersuchung trennen sich die Betriebszustände Ampel-fern (AF) und Teillast-fern (TF) aufgrund ihrer unterschiedlichen Anfangsbeschleunigung. Ähnliche Verläufe ergeben sich beim „mittellauten“ und „lauten“ Hintergrund, allerdings mit höher eingestellten Pegeln.

Um zu zeigen, wie weit die Originalpegel der Verbrennungsfahrzeuge gesenkt werden können,



**Bild 26:** Spektrogramme der 2-Sekunden-Stimuli für die Mithörschwellenmessung, aufsteigend nach ihrem Maximalpegel sortiert (nur linke Kanäle)

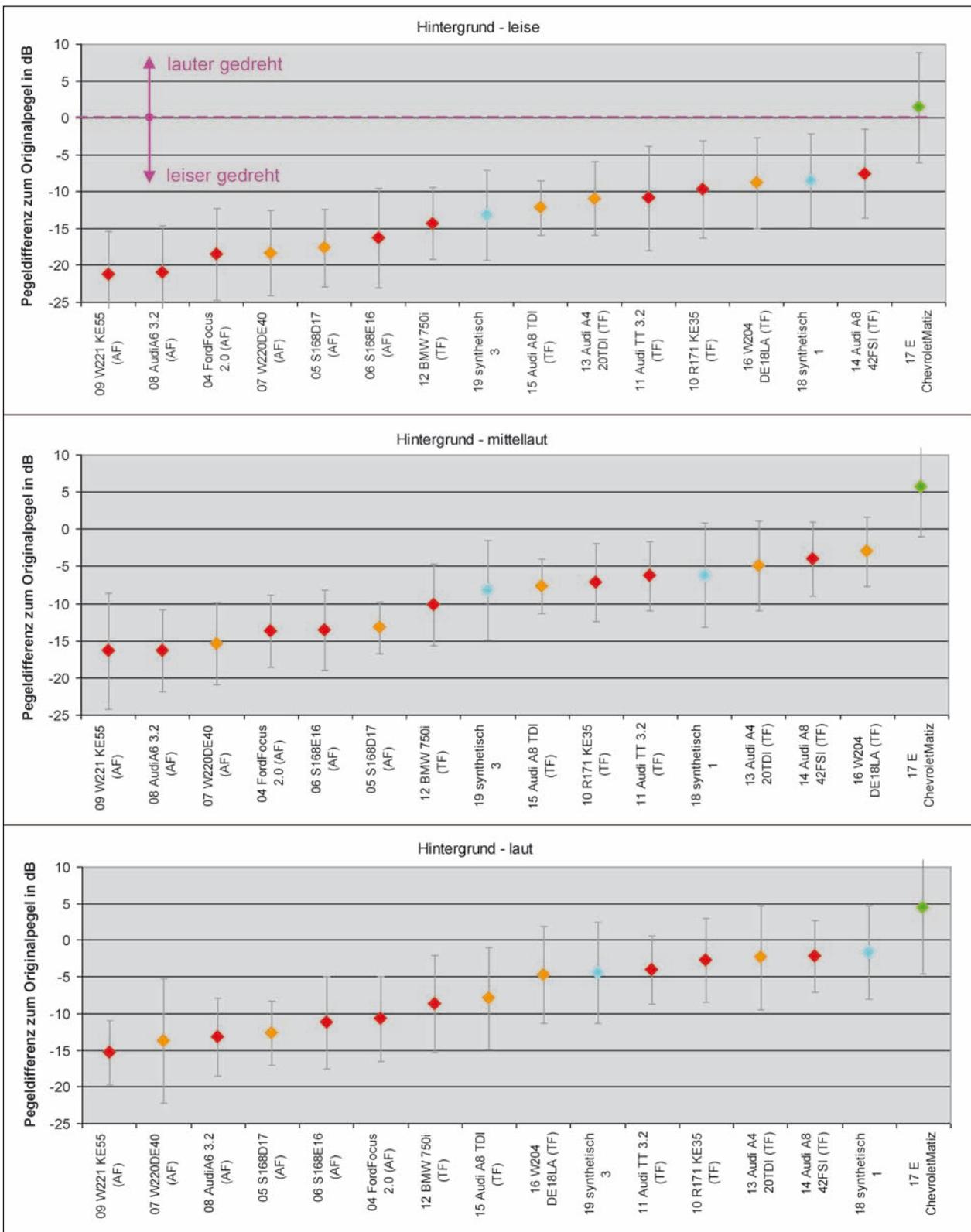


Bild 27: Von den Probanden eingestellte Pegeldifferenz, bei welcher das Annäherungsgeräusch gerade noch wahrnehmbar ist – für die Hintergründe „leise“ (oben), „mittellaut“ (Mitte) und „laut“ (unten)

sind im Bild 28 die Pegelreduktionen für den „mittellauten“ Hintergrund dargestellt, zum Vergleich im oberen Teil noch mal die Originalpegel (wie im Bild 26).

Im Bild 29 wurde für jedes Geräusch der Erkennungspegel aus dem zum Zeitpunkt der Erkennung vorliegenden Maximalpegel und der vom Probanden eingestellten Pegeldifferenz gebildet. Auffällig

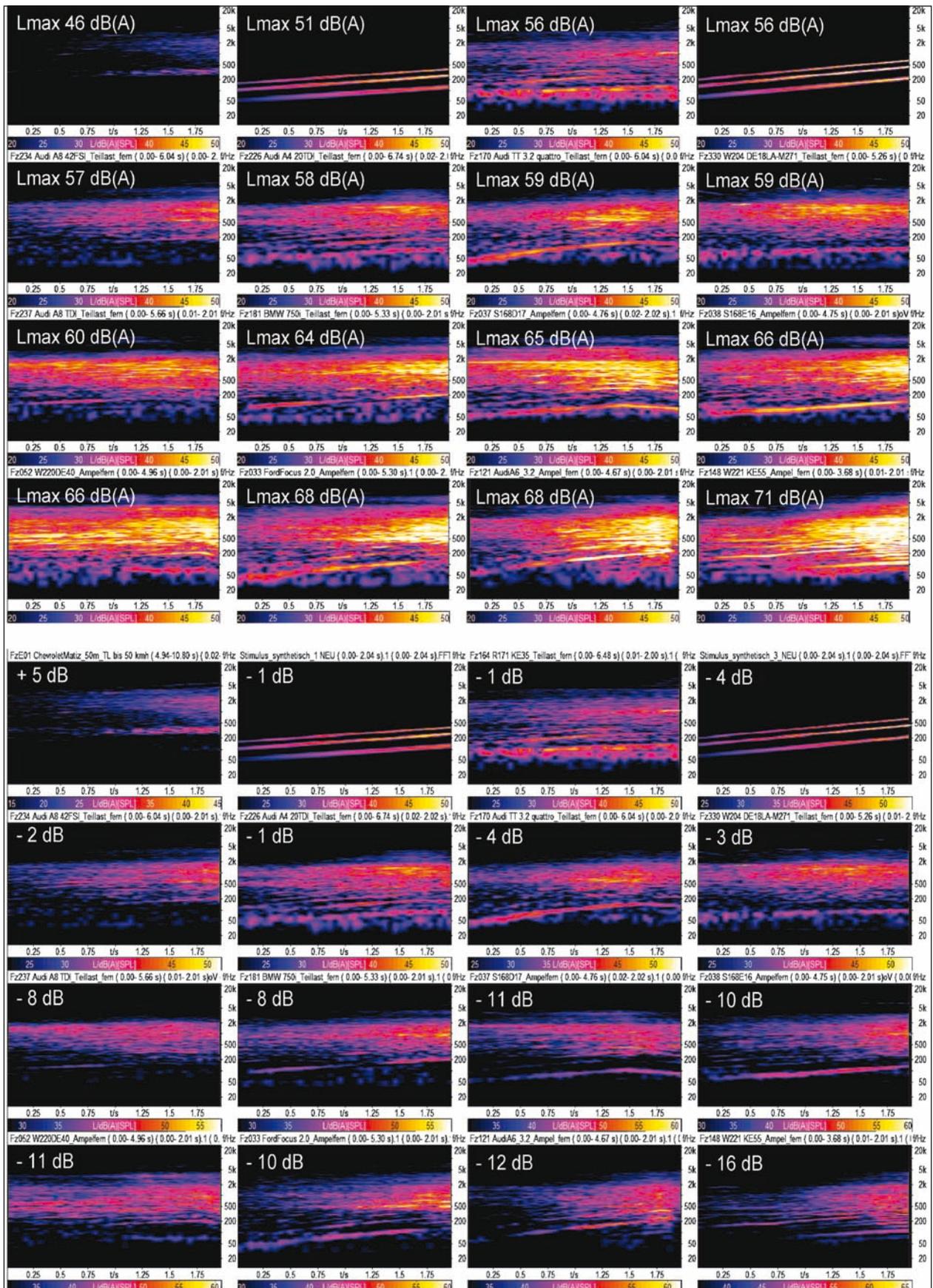


Bild 28: Original-Spektrogramme (oben), korrigiert auf Pegel, welche zur Erkennung beim Hintergrund „mittellaut“ benötigt wurden (mit eingetragem Differenzpegel (unten))

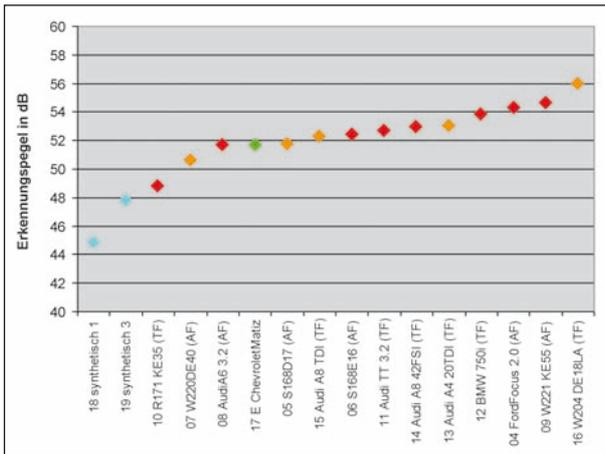


Bild 29: Erkennungspegel (Hintergrundgeräusch „mittel“)

ist die frühe Einsortierung der synthetischen Geräusche, was zum Teil auch daran liegt, dass es bei ihnen naturgemäß kein Rollgeräusch gibt.

### 2.3 Herannahendes Fahrzeug mit erweiterter Datenbank

Im vorangegangenen Kapitel wurden Wahrnehmungsuntersuchungen an originalen Fahrzeuggeräuschen durchgeführt. Beschrieben werden konnten also „nur“ die Wahrnehmungen der Gesamtgeräusche. Für eine zielorientierte Gestaltung von Fahrzeuggeräuschen wäre es darüber hinaus wünschenswert, wenn Erkenntnisse über den Wahrnehmungsanteil einzelner Geräuschkomponenten vorlägen. Daher wurden in diesem Kapitel Stimuli untersucht, bei denen mittels Filterungen bestimmte Signalanteile eliminiert wurden.

#### 2.3.1 Erweiterung der Datenbasis

Unter Berücksichtigung der bisherigen Ergebnisse wurden 4 Verbrennungsfahrzeuggeräusche als Basis für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Diese 4 Fahrzeuggeräusche besitzen sehr unterschiedliche spektrale und zeitliche Eigenschaften (Bild 28) und daraus resultierend deutlich voneinander abweichende Erkennungszeiten, welche aber nicht allein pegelabhängig sind. Es müssen also noch andere erkenntnisrelevante Signalmerkmale vorliegen, welche bestimmt werden sollen. Im Bild 30 sind die Pegel-Zeit-Verläufe dieser 4 Geräusche in der Umgebung des Mittelwertes der Erkennungszeitpunkte aller Probanden dargestellt.

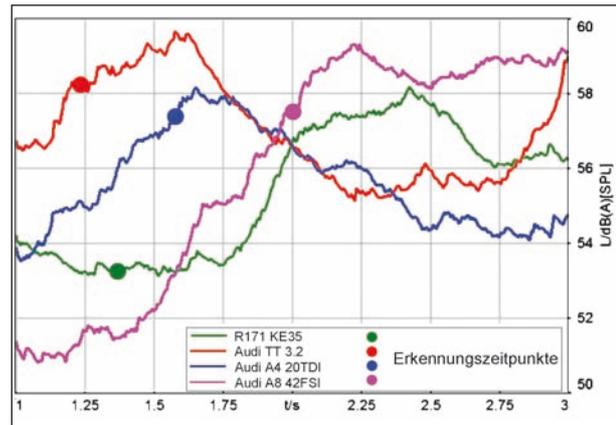


Bild 30: Pegel-Zeit-Verläufe (Ausschnitt) der 4 Geräusche mit eingetragenen Erkennungszeitpunkten (gemittelt über alle Probanden)

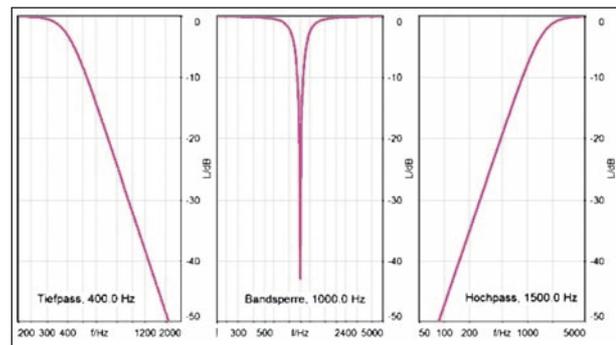


Bild 31: Filterfunktionen

#### 2.3.1.1 Geräuschstimuli durch Filterung

Die 4 Fahrzeuggeräusche wurden im Wahrnehmungsexperiment sowohl im Original als auch mit drei gefilterten Varianten benutzt (Bild 32). Folgende drei Filter wurden angewendet:

- Tiefpass bei 400 Hz, 4. Ordnung,
- Bandsperre bei 1 kHz, 2. Ordnung, Güte 3,
- Hochpass bei 1,5 kHz, 2. Ordnung.

Der Tiefpass wurde bei 400 Hz mit relativ großer Steilheit begrenzt, um speziell den Einfluss der unteren Motorordnungen zu bestimmen. Die Ausprägungen dieser Motorordnungen verlaufen bei den vier Fahrzeugen sehr unterschiedlich – beim A8 fehlen sie fast vollständig. Die Bandsperre wurde bei 1 kHz so gelegt, dass sie den Signalanteil herausfiltert, welcher in den dominantesten Frequenzbereich des Hintergrundgeräusches fällt. Mit dem 1,5-kHz-Hochpass werden die wahrnehmungsrelevanten Signalanteile im oberen Bereich des Fahrzeuggeräuschkennwertes ermittelt. Die angewendeten Filterfunktionen sind im Bild 31 dargestellt.

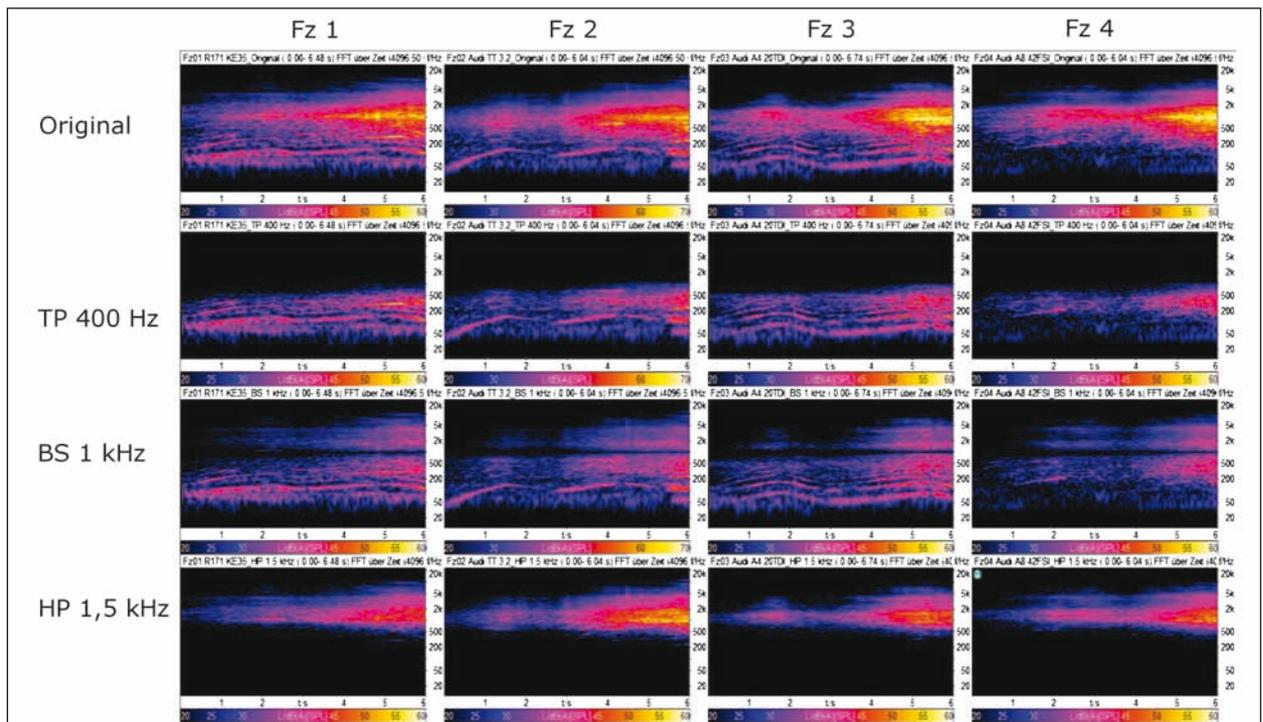


Bild 32: Spektrogramme der vier Basisgeräusche mit den drei Filtervarianten (Tiefpass, Bandsperr und Hochpass)

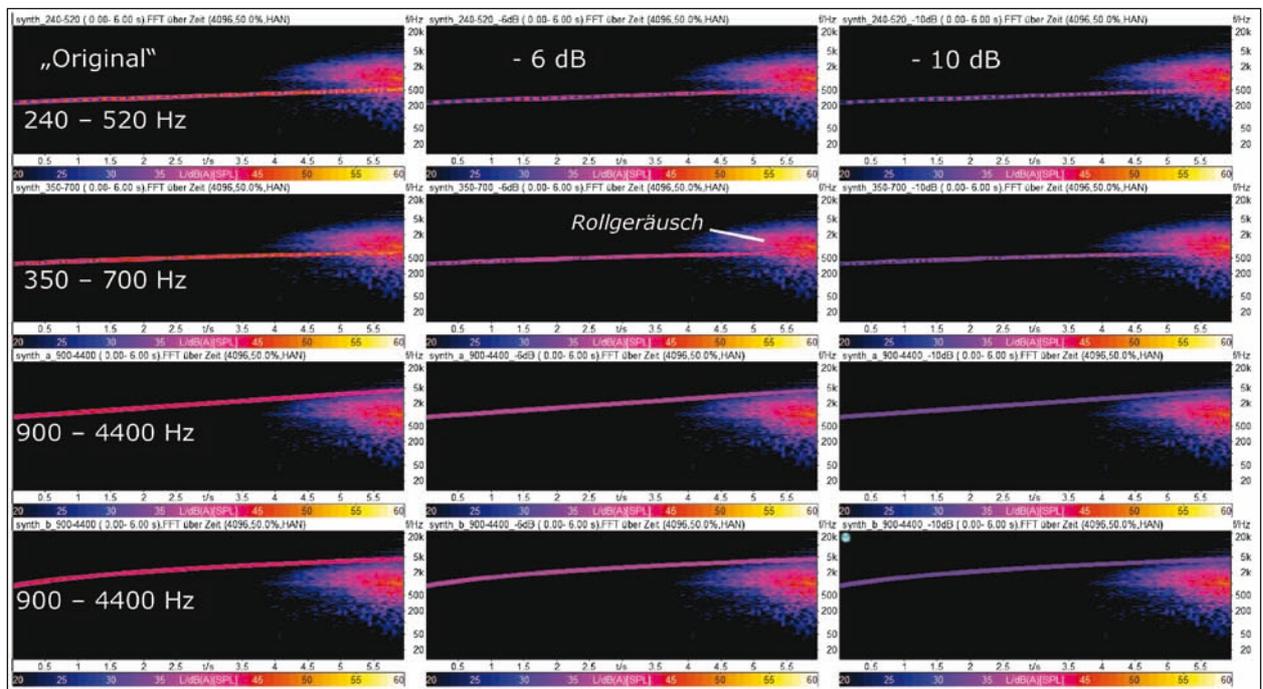


Bild 33: Spektrogramme der vier synthetischen Stimuli mit drei Pegelvariationen

### 2.3.1.2 Synthetische Annäherungsgeräusche

Ergänzt wurde die Datenbasis mit 4 synthetischen Geräuschen. Die synthetischen Geräusche bestehen aus der Überlagerung von 7 Sinus-Sweeps, jeweils mit einem Frequenzversatz von  $\pm 2,5\%$ ,  $\pm 5\%$  und  $\pm 7,5\%$ . Es wurden drei Frequenzbereiche benutzt (240 bis 520 Hz, 350 bis 700 Hz und 900 bis

4. 400 Hz). Dabei liegt der erste Sweep unterhalb des dominanten Rollgeräuschspektrums, ein Sweep läuft am Ende mit dem Rollgeräuschspektrum zusammen und ein Sweep verläuft oberhalb. Der dritte Sweep wurde sowohl mit linearem als auch mit logarithmischem Anstieg generiert (siehe Bild 33).

Um auch bei den synthetischen Geräuschen der Realsituation nahezukommen, wurde ihnen das Rollgeräusch der Aufnahme eines Elektrofahrzeuges addiert. Die Pegel der synthetischen Stimuli wurden in einer Voruntersuchung auf Werte festgelegt, welche Erkennungszeiten im Bereich der Verbrennungsgeräusche liefern. Zusätzlich wurden die 4 synthetischen Geräusche 6 dB und 10 dB leiser dargeboten, um den Pegel einfluss abschätzen zu können.

### 2.3.2 Erkennungszeitmessung

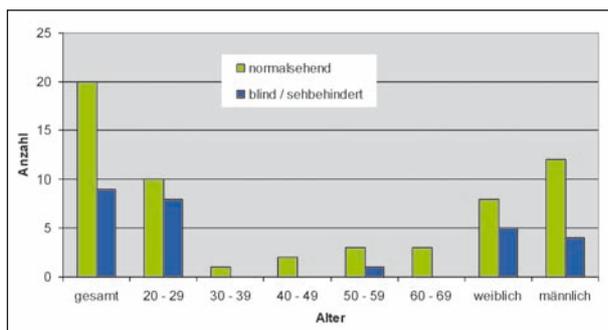
Die Messung der Erkennungszeit erfolgte in gleicher Weise wie im Hörversuch aus Kapitel 2.2.2.

#### 2.3.2.1 Probanden

Am Hörversuch Erkennungszeitmessung „Herannahendes Fahrzeug mit erweiterter Datenbank“ nahmen 29 Probanden (16 männlich, 13 weiblich) teil. 20 Personen der Gruppe sind normalsehend, 5 Personen sind blind und 4 Personen sind sehbehindert (5 bis 20 %). Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 34 Jahre. Die Altersgruppenverteilung zeigt Bild 34. Alle Versuchspersonen sind normalhörend. Bis auf wenige Ausnahmen entspricht das Probandenkollektiv dem der ersten Untersuchung.

#### 2.3.2.2 Versuchsdesign

Auch das Versuchsdesign war nahezu identisch zum Experiment „Herannahendes Fahrzeug“. Einziger Unterschied liegt im Verzicht auf die Hintergrundgeräusche „sehr leise“ und „laut“, da die Ergebnisse bei diesen beiden Hintergründen sehr ähnlich den Ergebnissen für die Hintergründe „leise“ und „mittellaut“ waren (Bilder 16 bis 19). Im Folgenden werden also Annäherungsgeräusche



**Bild 34:** Probandenkollektiv des Hörversuchs: Herannahendes Fahrzeug mit erweiterter Datenbank

nur gegenüber den Hintergrundgeräuschen „leise“ und „mittellaut“ bewertet. Beim wieder zu Beginn durchgeführten Training lag der Fokus verstärkt auf der Darbietung der „neuen“ synthetischen Geräusche.

#### 2.3.2.3 Ergebnisse

Die Bilder 35 und 36 zeigen die Erkennungszeiten der Probanden im Hörversuch bis zur Erkennung der jeweiligen Signale vor den beiden Hintergrundgeräuschen. Bei den „großen“ roten und grünen Symbolen handelt es sich um die Mittelwerte aller Versuchspersonen. Die türkisfarbenen Quadrate repräsentieren dagegen nur die Mittelwerte der Blinden und Sehbehinderten. Nur die Originalgeräusche der Verbrennungsfahrzeuge und die synthetischen Geräusche mit den Ursprungspegeln sind vollfarbig dargestellt. Die nur umrandeten Symbole stehen bei den Verbrennern für Filtervarianten und bei den synthetischen Geräuschen für Pegelreduktionen von 6 dB und 10 dB.

Bild 35 zeigt die Erkennungszeiten für den „leisen“ Hintergrund. Die Erkennungszeiten für die Originalgeräusche der Verbrenner liegen zwischen 0,85 s und 1,25 s in einem akzeptablen Bereich. Erwartungsgemäß erkannten die Probanden die mit einer 1-kHz-Bandsperre belegten Geräusche am zweit-schnellsten (Dreiecke). Mit der Bandsperre wurden gerade die Spektralanteile eliminiert, welche auch am stärksten das Hintergrundgeräusch prägen und somit ohnehin mehr verdeckt würden. Beim Audi-A8-Geräusch erfolgte die Erkennung allerdings deutlich später als bei den anderen drei Geräuschen, da die Erkennung aufgrund mangelnder tieffrequenter Motorordnungen verstärkt auf den Frequenzbereich um 1 kHz angewiesen ist. Wenig später als bei der Bandsperre erfolgte die Erkennung der Geräusche mit einem 400 Hz-Tiefpass (außer beim A8-Geräusch). Bei den tiefpassgefilterten Geräuschen basiert die Erkennung nahezu ausschließlich auf den tieffrequenten Motorordnungen, welche bei den ersten drei Geräuschen gut ausgebildet sind.

Die Erkennung der Sinus-Sweeps erfolgte auf einem ähnlichen Niveau wie bei den Verbrennungsgeräuschen. Die im Vorversuch gewählten Ausgangspegel wurden durch die Versuchspersonen bestätigt.

Im Bild 36 sind die Erkennungszeiten für den „mittellauten“ Hintergrund dargestellt.

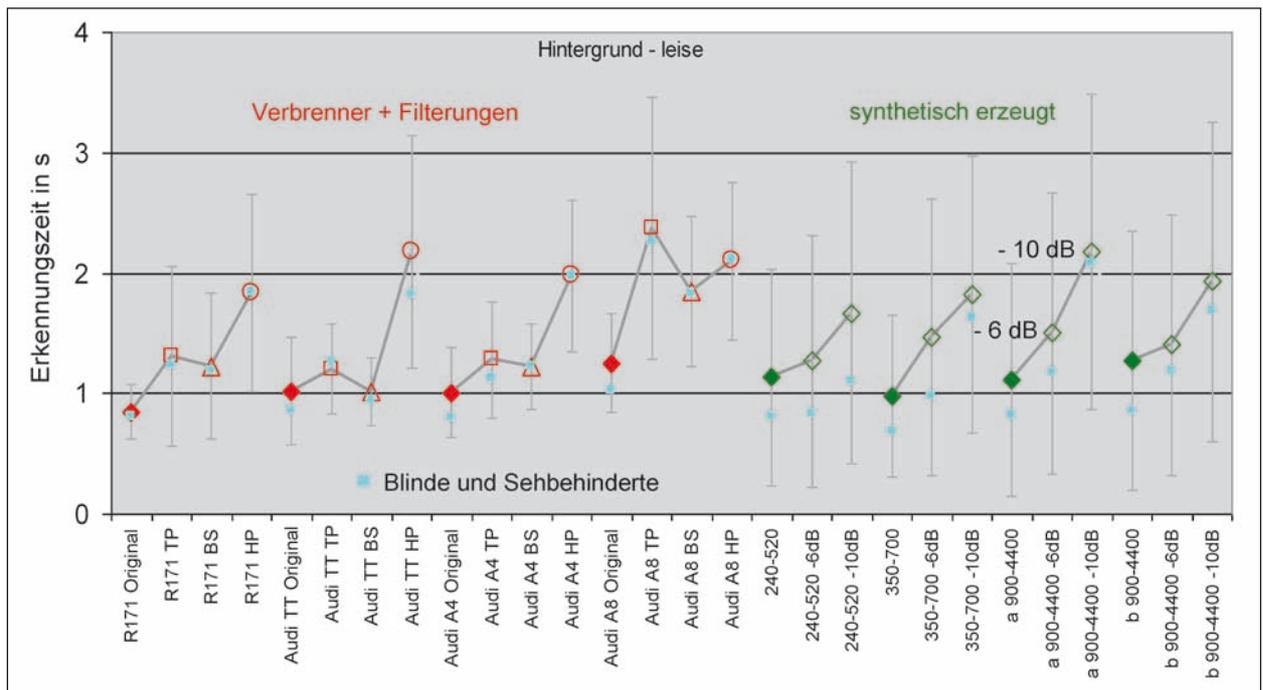


Bild 35: Erkennungszeiten von Verbrennungsfahrzeuggeräuschen im Original und Filterungen (Rot) und für synthetische Geräusche (Grün) beim Hintergrund „leise“

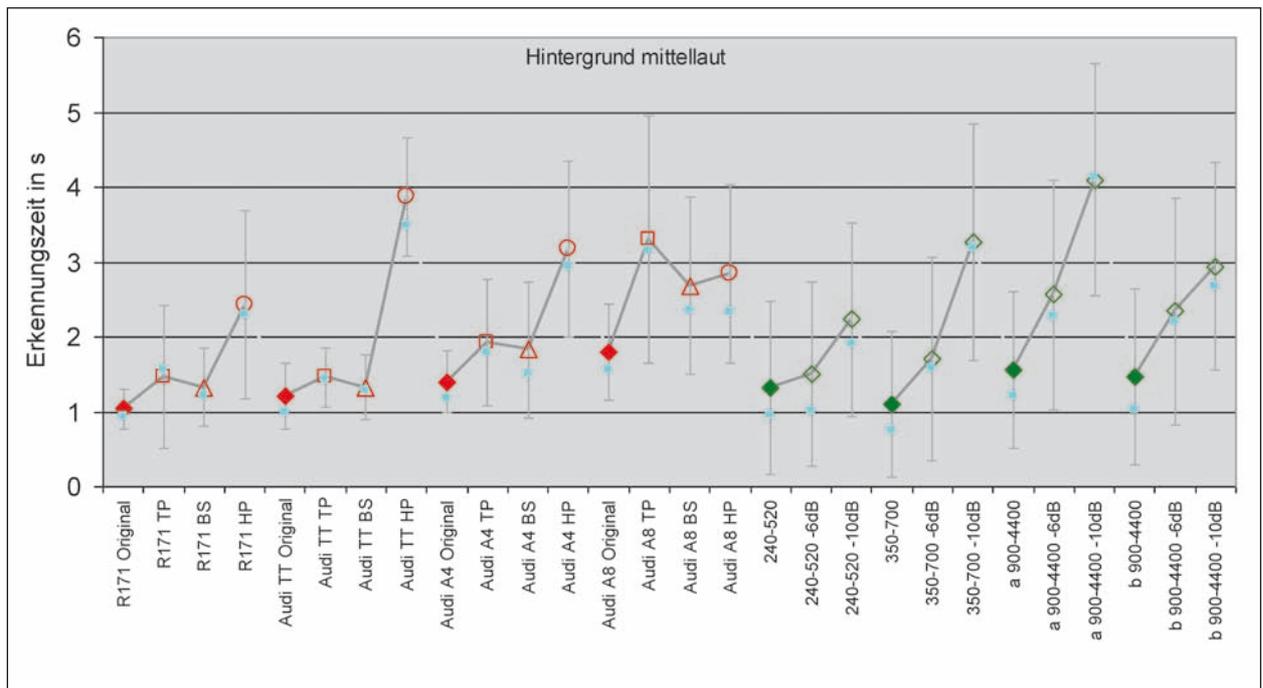


Bild 36: Erkennungszeiten von Verbrennungsfahrzeuggeräuschen im Original und Filterungen (Rot) und für synthetische Geräusche (Grün) beim Hintergrund „mittellaut“

Die qualitativen Kurvenverläufe entsprechen denen vom „leisen“ Hintergrund. Die Reaktionen erfolgen, insbesondere bei den schlechter erkennbaren Geräuschen, später. Sehr auffällig in beiden Diagrammen ist die große Streuung der Probandenreaktionen – speziell beim leisen Hintergrund. Bild 37 zeigt die Erkennungszeit-Verläufe der Versuchsteilneh-

mer beim Hintergrund „leise“. Die einzelnen Bewertungsergebnisse zeigen, dass die große Standardabweichung zu einem wesentlichen Teil aus absoluten Bewertungsunterschieden der Probanden resultiert. In der Bewertung der Relationen zwischen den Geräuschen bestand weitgehend Übereinstimmung.



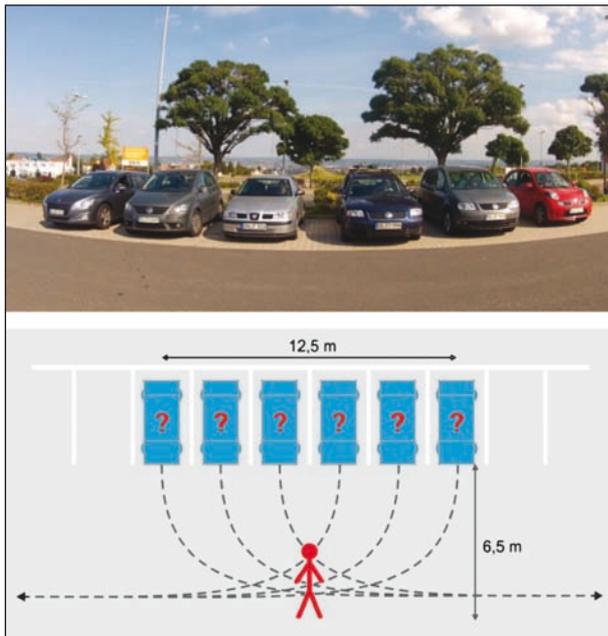


Bild 40: Parkplatzzszenen (real und schematisch)

zierten Fahrzeuge parken nach links aus und die linken Fahrzeuge nach rechts.

Im Experiment wurde die auditive Wahrnehmung von folgenden fünf Anfahrgeräuschen bestimmt:

- Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (VW Passat 2.0 TDI) aus dem Leerlauf heraus, „V-LL“,
- Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (VW Passat 2.0 TDI) nach Motorstart, „V-MS“,
- Elektrofahrzeug Mitsubishi IMiev (ohne Soundgenerator), „E-Fz“,
- synthetisches Anfahrgeräusch aus einem synthetischen Leerlaufgeräusch heraus „Syn-LL“,
- synthetisches Anfahrgeräusch ohne vorheriges Leerlaufgeräusch „Syn“.

Kriterium für die Wahrnehmungsqualität war, wie schon in vorherigen Experimenten, die Erkennungszeit der Probanden für die Erkennung der Geräusche. Neben einer schnellen auditiven Wahrnehmung ist auch die Ortsbestimmung des Fahrzeuggeräusches sicherheitsrelevant. Nach der Erkennungsreaktion wurden die Versuchspersonen nach der Ausgangsposition des jeweiligen Fahrzeuges befragt.

#### 2.4.1 Geräuschaufnahmen

Die Anfahrgeräusche des Verbrennungs- und des Elektrofahrzeuges wurden auf einem Großpark-

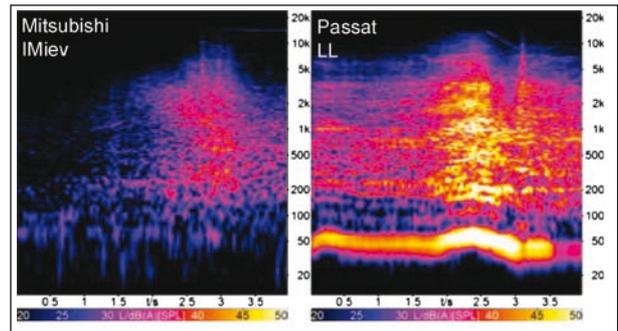


Bild 41: Spektrogramme der ersten 4 s des Anfahrgeräusches (links IMiev, rechts Passat)

platz (Real und Obi) in Dresden-Bannewitz mit einem  $\frac{1}{2}$ -Messmikrofon (Kugelcharakteristik) aufgenommen. Es wurde ein Parkplatzareal ausgewählt, welches in allen Richtungen große Abstände zu reflektierenden Gebäuden besitzt. Um die Geräusche in relativ ungestörter Umgebung aufzunehmen, erfolgte die Messung an einem windstillen Sonntag.

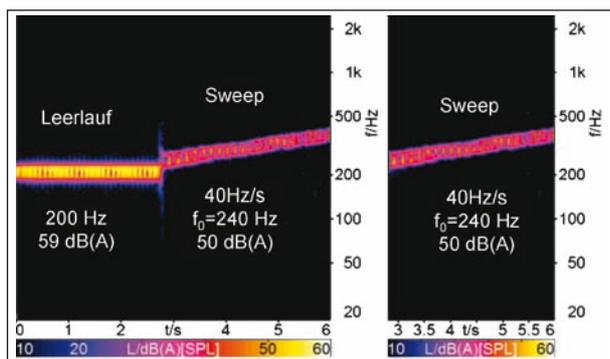
Bild 41 zeigt beispielhaft die Spektrogramme der aufgenommenen Anfahrgeräusche eines Elektro- und eines Verbrennungsfahrzeuges.

Aufgenommen wurden die Anfahrgeräusche der „realen“ Fahrzeuge aus allen 6 Positionen (Bild 40 unten).

#### 2.4.2 Stimuli für Hörversuch

Aus den Aufnahmen des VW Passat (nach Leerlauf bzw. Motorstart) und des Mitsubishi IMiev aus den jeweils 6 Positionen wurden 18 Stimuli mit einer Länge von 6 s geschnitten.

Zusätzlich zu den realen Fahrzeuggeräuschen wurde ein beispielhaftes synthetisches Anfahrgeräusch erzeugt. Dieses Geräusch besteht, wie schon die Geräusche aus Kapitel 2.3, aus der Überlagerung von 7 Sinus-Sweeps, jeweils mit einem Frequenzabstand von  $\pm 2,5\%$ ,  $\pm 5\%$  und  $\pm 7,5\%$  zur Mittenfrequenz. Die Frequenz beginnt bei 240 Hz und steigt mit 40 Hz pro Sekunde an. Dem synthetischen Anfahrgeräusch wurde ein synthetisches Leerlaufgeräusch aus wieder 7 Sinus-Signalen mit den gleichen Abständen vorangestellt. Die Mittenfrequenz für den „Leerlauf“ wurde mit 200 Hz etwas tiefer als die Sweep-Startfrequenz gelegt, um eine bessere Abgrenzung beider Betriebszustände zu gewährleisten. Ursprünglich wurden der Leerlauf- und der Sweep-Pegel auf 50 dB (A) festgelegt. Im Experiment war das syn-



**Bild 42:** Spektrogramme des Anfahrgeräusches aus dem Leerlauf heraus (links) und ohne Leerlaufgeräusch (rechts)

thetische Leerlaufgeräusch, insbesondere bei dem lauterem Hintergrundgeräusch, schlecht wahrzunehmen, worauf es auf 59 dB (A) erhöht wurde. Stimuli des synthetischen Anfahrgeräusches wurden sowohl mit als auch ohne Leerlauf erzeugt. Die Spektrogramme beider Stimuli zeigt Bild 42.

Ergänzt wurden die 5 Stimuli mit 2 als Distraktoren verwendeten Geräuschen in Form eines Leerlauf- und eines Motorstartgeräusches des Verbrennungsfahrzeuges VW Passat. Genutzt wurden die Distraktoren als auditive Ablenkung auf ein Fahrzeug, welches im jeweiligen Versuchsstimulus aber nicht anfährt.

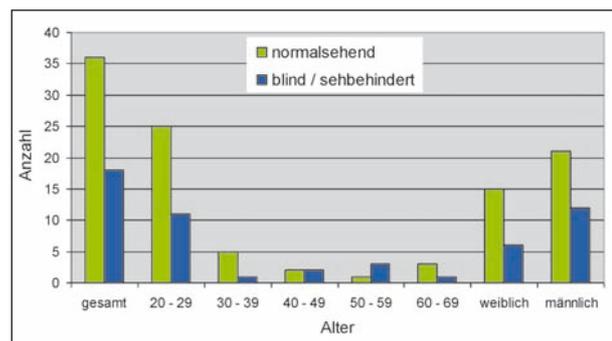
Als Hintergrundgeräuschstimuli wurden die Hintergründe „leise“ und „mittellaut“ verwendet. Der Pegel des mittellauten Hintergrunds wurde in Anlehnung an HASTING u. a. (2012)<sup>1</sup> auf 55 dB (A) und des leisen Hintergrunds auf 49 dB (A) festgelegt.

### 2.4.3 Erkennungszeitmessung

Ziel des Experimentes war die Messung der Erkennungszeit, die eine Versuchsperson benötigt, um auf die auditive Erkennung eines anfahrenden Fahrzeuges gegenüber einem Hintergrundgeräusch zu reagieren.

#### 2.4.3.1 Probanden

Am Hörversuch Erkennungszeitmessung „Anfahrendes Fahrzeug“ nahmen 53 Probanden (33 männlich, 20 weiblich) teil. 36 Personen der Grup-



**Bild 43:** Probandenkollektiv des Hörversuchs: Anfahrendes Fahrzeug (und auch anhaltendes Fahrzeug, Kapitel 2.5)

pe sind normalsehend, 7 Personen sind blind und 10 Personen sind sehbehindert (5 bis 40 %). Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 32 Jahre. Die Altersgruppenverteilung zeigt Bild 43.

#### 2.4.3.2 Versuchsdesign

Der Versuch fand im Multimodalen Messlabor des Lehrstuhls Kommunikationsakustik statt. In diesem Labor befindet sich eine Wellenfeldsynthese-Anlage (WFS), mit welcher es möglich ist, akustische Quellen auf beliebigen Pfaden in der Horizontalebene im oder außerhalb des Raumes zu bewegen. Das ist die ideale Voraussetzung für eine realistische Geräuschdarbietung der Parkplatzszenen nach Bild 40.

Da die Ergebnisse dieser auditiven Untersuchungen mit denen der audio-visuellen Untersuchungen verglichen werden sollten, mussten auch die geometrischen Verhältnisse übereinstimmen. Die Winkel der Fahrzeugpositionen zum Betrachter mussten bei der Wiedergabe herunterskaliert werden (Bild 44), da sonst der zulässige Winkelbereich des für die visuellen Experimente verwendeten Blickbewegungssystems überschritten worden wäre.

Während des Hörversuchs saßen die Probanden auf einem Fahrzeugsitz in der Raummitte. Vor ihnen, in einer Entfernung von ca. 3 m, hing eine 3,5 m breite Leinwand, auf der die simulierten Fahrzeugpositionen und die Aufgabenstellung abgebildet waren (Bild 45). Im späteren Experiment der audio-visuellen Wahrnehmung wurde die gleiche Anordnung (mit zusätzlicher Videopräsentation) verwendet.

Hinter der Leinwand befand sich die Lautsprecher der vorderen Wand (Bild 46). Alle übrigen der 468

<sup>1</sup> In diesem Bericht der NHTSA gibt es Angaben bezüglich der minimalen erforderlichen Frequenzänderung zur Beschleunigungserkennung, welche auf Expertenmeinung und theoretischen Modellen basieren (S. 46, 47 und 48).

Lautsprecher der WFS-Anlage waren unsichtbar hinter den Wandverkleidungen der anderen drei Wände verbaut.

Das jeweilige Hintergrundgeräusch wurde als ebene Welle von vorn über die gesamte Raumbreite abgestrahlt.

Aus der Kombination von 5 Geräuschen, 6 Positionen, 2 Hintergrundgeräuschen entstanden 60 Stimuli. Diese 60 Stimuli wurden jeweils einmal mit und einmal ohne einen Distraktor dargeboten. Daraus ergaben sich 120 Stimuli pro Sitzung. Sowohl die Reihenfolge der Paarungen aus Anfahrt und Hintergrundgeräusch als auch die Anfahrzeitpunkte der Fahrzeuge wurden randomisiert wiedergegeben. Ebenso erfolgten die Arten (Motorstart oder Leerlauf) und die Positionen der Dis-

traktoren zufällig. Die Versuchspersonen reagierten auf die Erkennung des wahrgenommenen Fahrzeuggeräusches im Versuch per Mausklick. Unmittelbar nach dem Mausklick wurde die Sequenz abgebrochen und der Proband bestimmte die wahrgenommene Startposition auf der Bewertungsoberfläche (Bild 45).

Dem eigentlichen Versuch wurde wieder ein Training vorangestellt, in dem sich die Probanden an die Versuchsumgebung gewöhnen konnten. Für die Gruppe der Blinden und Sehbehinderten wurden die simulierten Fahrzeugpositionen durch Abspielen eines Motorstartgeräusches mehrfach getestet, bis die Probanden in der Lage waren, die 6 Positionen (Bild 45) sicher auseinanderzuhalten.

#### 2.4.3.3 Ergebnisse

In der ersten Ergebnisdarstellung (Bild 47) wurde die Erkennungszeit als Mittelwert über alle Fahrzeugpositionen mit und ohne Distraktor gebildet. Die Probandenreaktion erfolgte bei den Verbrennungsfahrzeugen nach etwa einer Sekunde. Dabei wurde das aus dem Leerlauf anfangende Fahrzeug etwas früher erkannt (bei 0,82 s) als das nach dem Motorstart anfangende Fahrzeug (1,04 s). Demgegenüber benötigten die Versuchspersonen im Mittel 3,08 s für die Reaktion auf die Erkennung des Elektrofahrzeuges. Die Erkennungszeiten auf das synthetische Geräusch erfolgte nach etwa 1,3 s (mit Leerlaufgeräusch 1,24 s, ohne 1,31 s). Auffällig zeigt sich die deutlich geringere Streuung der Verbrennungsfahrzeuggeräusche gegenüber den (ungewohnteren) synthetischen- und Elektrofahrzeuggeräuschen. Die um 6 dB verschiedenen Hintergrundpegel haben nur einen sehr geringen Einfluss auf die Erkennungszeiten. Der Unterschied liegt zwischen 50 ms bei den Verbrennern und 200 ms beim E-Fahrzeug.

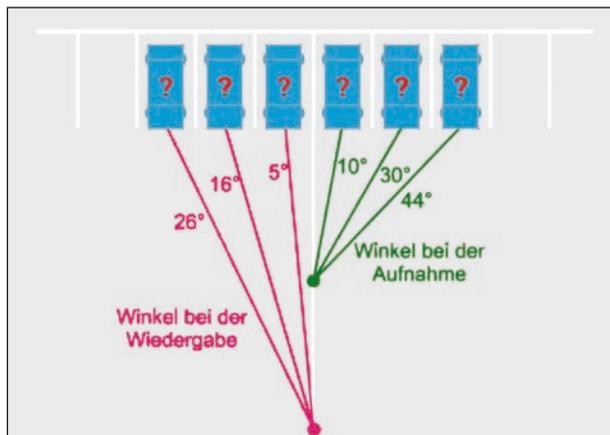


Bild 44: Winkelverhältnisse Aufnahme – Wiedergabe

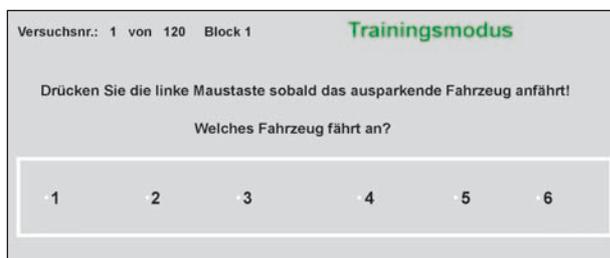


Bild 45: Versuchsoberfläche – Parkplatzsituation

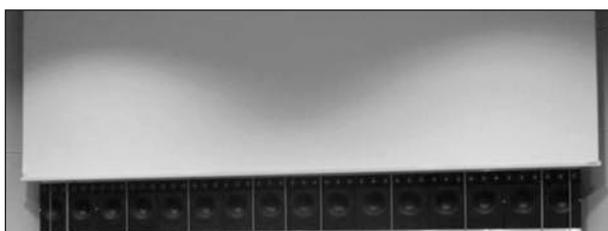


Bild 46: Vordere Lautsprecher hinter der hochgefahrenen Leinwand

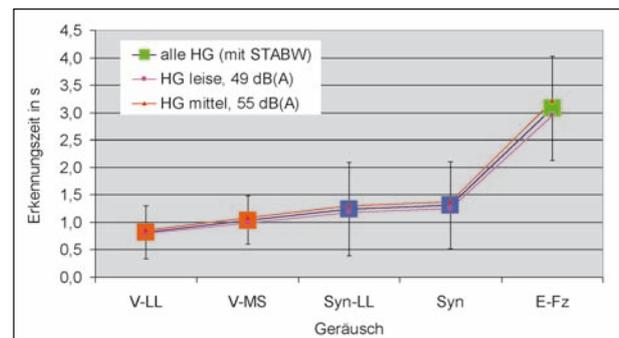
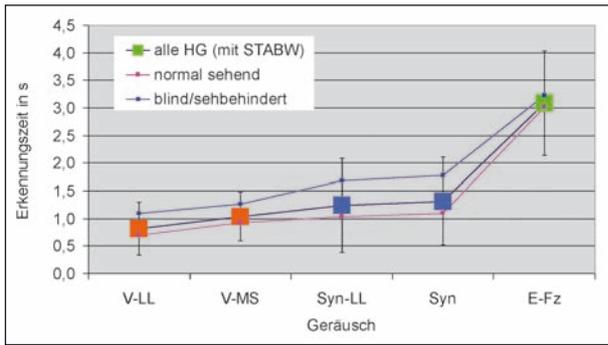


Bild 47: Erkennungszeiten – in Abhängigkeit der Hintergrundgeräusche



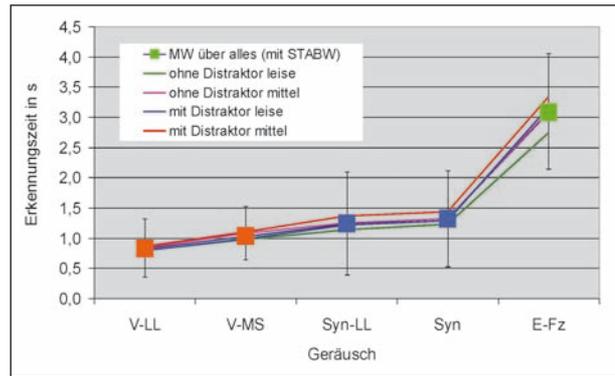
**Bild 48:** Erkennungszeiten – getrennt für Normalsehende und Blinde/Sehbehinderte

Bild 48 zeigt die Erkennungszeiten, wieder gemittelt über alle Positionen und Distraktoren, getrennt für die Gruppen „normalsehend“ und „blind/sehbehindert“. In allen bisherigen Experimenten reagierten die Blinden/Sehbehinderten schneller als die Normalsehenden. Im Unterschied zu den vorangegangenen Situationen kommen die Geräusche bei der Parkplatzsituation aus verschiedenen Richtungen. Einige der blinden/sehbehinderten Probanden gaben auch an, Probleme mit der Orientierung in so einer komplexen Situation zu haben. Vermutlich benötigen sehbehinderte Menschen eine größere Sicherheit für die Erkennungsreaktion. Die größte Zeitdifferenz (0,7 s) besteht bei der Bewertung der synthetischen Signale. Ein weiterer Grund für eine spätere Reaktion könnte die Tatsache sein, dass im selben Versuch auch die Ausgangsposition des anfahrens Fahrzeuges abgefragt wurde, was den blinden Probanden, aufgrund ihrer schlechteren räumlichen Orientierung, schwerer fiel.

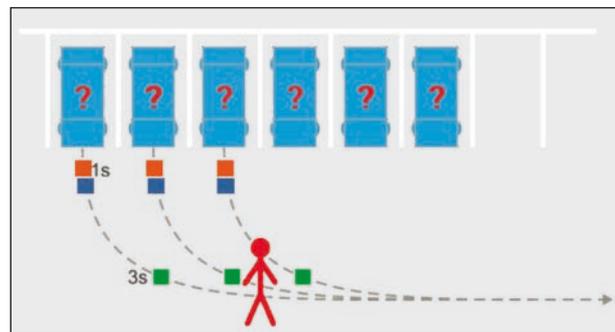
Die Abhängigkeiten der Erkennungszeiten mit und ohne ablenkenden Distraktor sind für beide Hintergrundgeräusche im Bild 49 dargestellt.

Auf die Erkennung der Verbrennungsfahrzeuggeräusche hat ein zusätzlich existierendes Leerlauf- oder Motorstartgeräusch eines nicht anfahrens Fahrzeuges nahezu keinen Einfluss. Die Reaktion auf die synthetischen Geräusche wird durch die Anwesenheit eines Distraktors um etwa 100 ms verzögert. Die Erkennung des Elektrofahrzeuggeräusches verzögert sich mit Distraktor beim leiseren Hintergrund um etwa 200 ms und beim mittellauten Hintergrund um etwa 400 ms.

Um aufzuzeigen, welchen Abstand ein Fahrzeug in der gewählten Szene vom „hörenden“ Fußgänger besitzt, sind die Orte der Fahrzeugstoßstangen bei der Erkennung im Bild 50 eingezeichnet. Dabei stehen die orangefarbenen Quadrate für die Erkennungsorte der Verbrennungsfahrzeuge, die blauen Quadrate für Fahrzeuge mit einem synthetischen Anfahrgeräusch und die grünen Quadrate für die Orte, an denen sich ein Elektrofahrzeug ohne Soundgenerator bei rein auditiver Erkennung befinden würde.



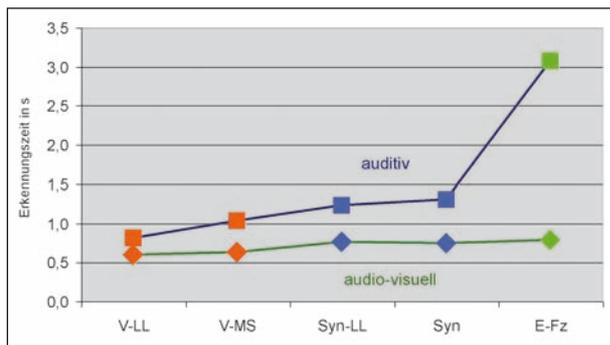
**Bild 49:** Erkennungszeiten – mit und ohne Distraktoren für beide Hintergrundgeräusche



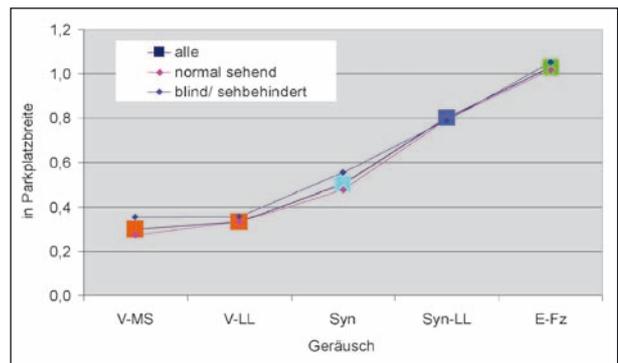
**Bild 50:** Erkennungsorte (Stoßstange) für Verbrennungsfahrzeuge (orangefarben), für Fahrzeuge mit einem synthetischen Anfahrgeräusch (Blau) und für Elektrofahrzeuge ohne Soundgenerator (Grün)

Erkennungsorte der Verbrennungsfahrzeuge, die blauen Quadrate für Fahrzeuge mit einem synthetischen Anfahrgeräusch und die grünen Quadrate für die Orte, an denen sich ein Elektrofahrzeug ohne Soundgenerator bei rein auditiver Erkennung befinden würde. Dabei wurde die Erkennungszeit über alle Stimuli der jeweiligen Gruppe gemittelt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die Orte nur für die von links kommenden Fahrzeuge eingetragen. Sinngemäß gelten die Orte/Zeiten gleichermaßen für die von rechts anfahrens Fahrzeuges. In einer derartigen Situation wird Menschen, welche nur auf ihre auditive Wahrnehmung angewiesen sind, eine sichere Orientierung ohne Zusatzgeräusche unmöglich.

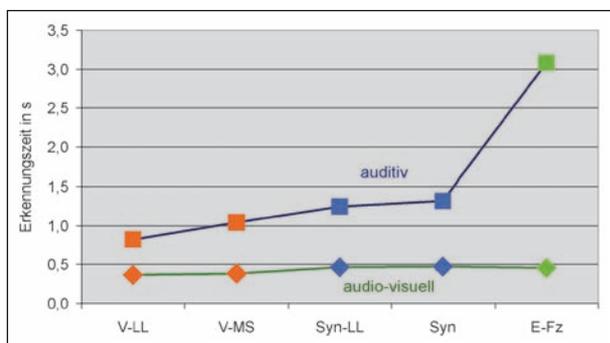
Bild 51 zeigt im Vorgriff auf den Projektteil der audio-visuellen Wahrnehmung einen Vergleich der Erkennungszeiten der rein auditiven Wahrnehmung gegenüber der kombinierten audio-visuellen Wahrnehmung. Im Bild 51 ist der Vergleich für alle Probandengruppen dargestellt. Gut sichtbar ist die Dominanz der visuellen Wahrnehmung. Wird den Versuchspersonen zusätzlich zum Ton ein Video der Szene zur Verfügung gestellt, besitzt die Art der



**Bild 51:** Vergleich der auditiven Wahrnehmung (obere Kurve) mit der audio-visuellen Wahrnehmung (untere Kurve) für alle Probanden



**Bild 53:** Ortungsfehler in Abhängigkeit des Anfahrgeräusches



**Bild 52:** Vergleich der auditiven Wahrnehmung aller Probanden (obere Kurve) mit der audio-visuellen Wahrnehmung für die Gruppe der Normalsehenden (untere Kurve)

Fahrzeuggeräusche nur noch wenig Einfluss auf die Erkennungszeit.

Noch deutlicher stellt sich die visuelle Dominanz dar, wenn für die audio-visuelle Wahrnehmung nur die Gruppe betrachtet wird, welche auch über ein uneingeschränktes Sehvermögen verfügt (Bild 52).

#### 2.4.4 Bestimmung der Ortungsfehler

Im selben Versuch mussten die Probanden nach erfolgter Erkennungsreaktion auch die Ausgangsposition des anfahrenden Fahrzeuges angeben. Dabei hatten sie die Auswahl von Position 1 (Fahrzeuge ganz links) bis Position 6 (Fahrzeug ganz rechts). Die Ortungsfehler sind im Bild 53 dargestellt.

Die Ausgangspositionen der Fahrzeuge mit einem Verbrennungsgeschwindigkeit sind sehr gut ortbar. Der Fehler liegt bei gerade mal einer Drittel-Fahrzeugbreite. Bei den synthetischen Geräuschen, besonders beim synthetischen Anfahrgeräusch aus dem synthetischen Leerlauf heraus, verringert sich die Ortungsgenauigkeit deutlich. Möglicherweise ist

der Übergang aus dem synthetischen Leerlaufgeräusch schlechter erkennbar als der Übergang aus dem „Nichts“. Warum dieser Effekt bei der Erkennungszeitmessung nicht wirksam war, ist gegenwärtig nicht erklärbar. Die Ortung der Ausgangsposition des Elektrofahrzeuggeräusches fiel den Probanden noch schwerer. Hier betrug der Ortungsfehler eine ganze Parkplatzbreite. In der Realität dürfte der Fehler noch größer sein, da die Probanden im Experiment wussten, dass von links nach rechts fahrende Fahrzeuge aus den Positionen 1, 2, 3 kommen und von rechts nach links fahrende Fahrzeuge von den Positionen 4, 5 und 6. Die reine Richtungserkennung mit einer Ratewahrscheinlichkeit führt schon zum Fehler einer Parkplatzbreite. Zwischen der Gruppe der Normalsehenden und der Gruppe der Blinden und Sehbehinderten gab es nahezu keinen Unterschied.

### 2.5 Anhaltendes Fahrzeug – Fußgängerüberweg

Eine auditiv schwer zu erfassende Situation ist der Anhaltvorgang eines Fahrzeuges. Für das sichere Überqueren eines Fußgängerüberweges sind sehbehinderte Verkehrsteilnehmer darauf angewiesen zu erkennen, ob ein Fahrzeug auch wirklich angehalten hat. Im Experiment „Fußgängerüberweg“ wurden folgenden Geräuschstimuli untersucht:

- Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (VW Passat 2.0 TDI) hält im Leerlauf an „V-LL“,
- Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (VW Passat 2.0 TDI) hält an und schaltet Motor ab, „V-MS“,
- Elektrofahrzeug Mitsubishi IMiev (ohne Soundgenerator) hält an, „E-Fz“,

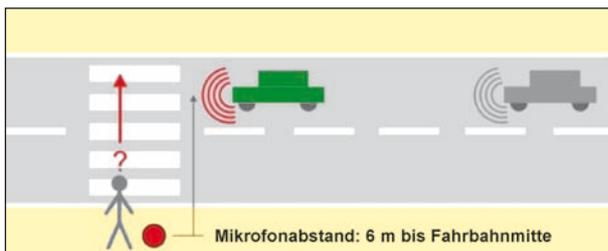


Bild 54: Anhaltesituation mit Mikrofonposition

- synthetisches Verzögerungsgeräusch mit anschließendem synthetischem Leerlaufgeräusch „Syn-LL“,
- synthetisches Verzögerungsgeräusch ohne Leerlaufgeräusch „Syn“.

Die Fahrzeugszene ist im Bild 54 dargestellt.

### 2.5.1 Geräuschaufnahmen

Die Verzögerungsgeräusche bei der Annäherung an einen Fußgängerüberweg mit anschließendem Fahrzeughalt des Verbrennungs- und des Elektrofahrzeuges wurden auf einem Großparkplatz (Real und Obi) in Dresden-Bannewitz mit einem  $\frac{1}{2}$ "-Messmikrofon (Kugelcharakteristik) aufgenommen. Es wurde ein Parkplatzareal ausgewählt, welches in allen Richtungen große Abstände zu reflektierenden Gebäuden besitzt. Um die Geräusche in relativ ungestörter Umgebung aufzunehmen, erfolgte die Messung an einem windstillen Sonntag.

### 2.5.2 Stimuli für Hörversuch

Für den Hörversuch wurden die Stimuli der drei Originalaufnahmen mit zwei synthetischen Varianten ergänzt.

Bild 55 zeigt die Spektrogramme der aufgenommenen Heranfahrgeräusche des Elektrofahrzeuges und des Verbrennungsfahrzeuges mit Motorstopp und Leerlauf sowie das synthetisch erzeugte Anhaltegeräusch. Aus Letzterem wurden ein Stimulus in der Variante ohne Leerlauf und ein Stimulus mit Leerlauf erzeugt.

Der Pegel des synthetischen Anhaltegeräusches liegt sowohl am Ende des abwärts verlaufenden Sweeps, als auch während des „Leerlaufs“ bei 50 dB (A). Das Spektrum besitzt die gleiche Zusammensetzung wie das synthetische Anfahrgeräusch aus Kapitel 2.4 (Bild 42).

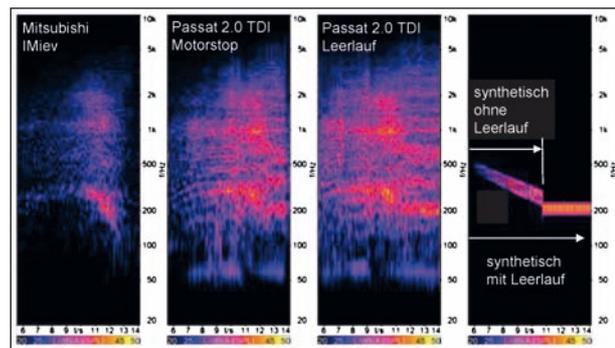


Bild 55: Spektrogramme der Fahrzeuggeräusche und des synthetisierten Geräusches beim Anhaltevorgang

## 2.5.3 Erkennungszeitmessung

Der gedanklich am Fußgängerüberweg stehende Proband sollte im Hörversuch auf den Zeitpunkt reagieren, bei dem ein herannahendes Fahrzeug zum Stillstand gekommen ist. Als Maskierer wurden die gleichen Hintergrundgeräusche wie in der Parkplatzsituation verwendet.

### 2.5.3.1 Probanden

Das Probandenkollektiv war identisch mit dem des Parkplatzexperimentes (Bild 43).

### 2.5.3.2 Versuchsdesign

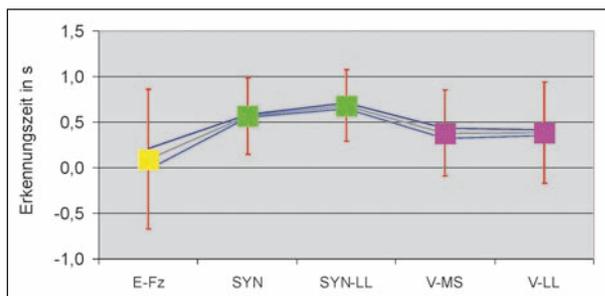
Das Experiment fand wieder im Multimodalen Messlabor unter Verwendung der Wellenfeldsynthese statt. Wie schon in der Parkplatzsituation wurden die Hintergrundgeräusche als ebene Welle frontal von vorn über die gesamte Raumbreite abgestrahlt. Die Pfade der Fahrzeugbewegung wurden über die WFS-Anlage nachgestellt, sodass die Versuchspersonen den gleichen Höreindruck wie in einer realen Situation hatten. Die 5 verschiedenen Geräusche der anhaltenden Fahrzeuge wurden bei beiden Hintergrundgeräuschen in dreifacher Wiederholung randomisiert dargeboten. Die Probanden sollten per Mausclick reagieren, wenn sie der Meinung waren, dass das Fahrzeug angehalten hat.

### 2.5.3.3 Ergebnisse

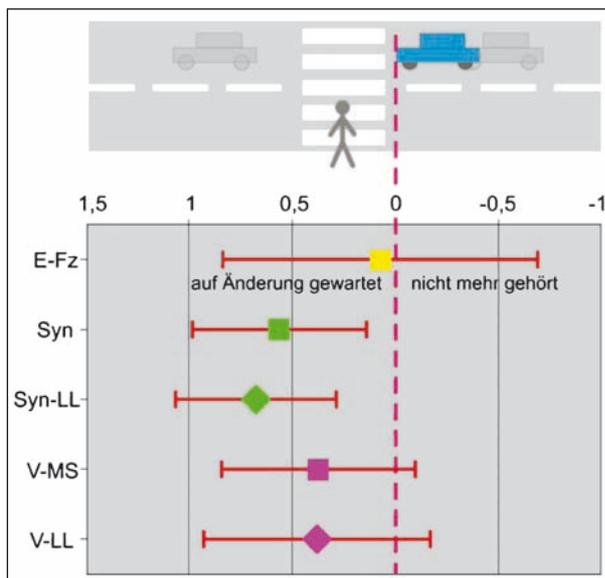
Im Bild 56 sind die Mittelwerte der Erkennungszeiten auf die Erkennung der jeweiligen Anhaltezeitpunkte und die dazugehörigen Standardabweichungen dargestellt. Die Interpretation der Einzelergebnisse erscheint aufgrund der großen Streuung, insbesondere beim Elektrofahrzeuggeräusch, nicht sinnvoll.

Besser geeignet erscheint die Bewertung der Streuung der Probandenreaktion anhand des Bildes 57. Da der Einfluss der Hintergrundgeräusche sehr gering ist, sind hier nur die Mittelwerte über beide Maskierer eingezeichnet. Zur szenenbezogenen Interpretation wurde das Diagramm aus Bild 56 gedreht dargestellt und die Zeitachse ist gespiegelt. Über dem Diagramm ist die Anhalteszene noch einmal sinnbildlich gezeigt, wobei die Fahrzeugabstände nicht maßstäblich sind.

Aus der Bewertungsstreuung für das Elektrofahrzeuggeräusch wird ersichtlich, dass einige Reaktionen deutlich zu früh und andere dagegen viel zu spät erfolgten. Das Elektrofahrzeuggeräusch ist bei der geringen Geschwindigkeit vor dem Anhalten nahezu unhörbar, was einige Probanden dazu animiert sofort sich für „Anhalten“ zu entscheiden, sobald sie kein Geräusch mehr hörten. Andere Probanden warteten offenbar deutlich länger mit ihrer



**Bild 56:** Erkennungszeiten – Anhaltesituation, große Symbole: Mittelwerte über beide Hintergründe, untere hellblaue Kurve: nur Hintergrund 49 dB (A), obere dunkelblaue Kurve: nur Hintergrund 55 dB (A), V-MS steht hier für Verbrennungsfahrzeug mit Motorstopp



**Bild 57:** Erkennungszeiten – Anhaltesituation, Mittelwerte über beide Hintergründe mit Standardabweichung

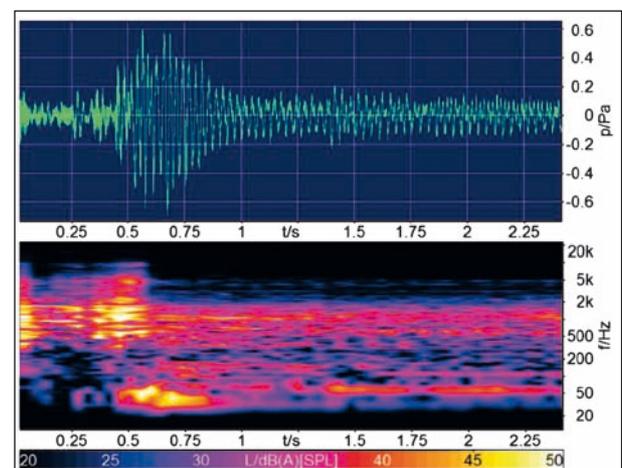
Reaktion, da sie gewohntermaßen eine Betriebszustandsänderung erwarteten, wie sie es durch einen Leerlauf oder einen Motorstopp gewohnt sind. Erst wenn sie merkten, dass keine Zustandsänderung eintrat reagierten sie auf „Anhalten“. Bei den beiden Verbrennungsgeräuschen ist die Streuung etwas niedriger, aber auch hier gibt es Urteile, welche vor dem Anhalten liegen. Im Mittel reagierten die Versuchspersonen nach 0,4 s auf den Anhaltvorgang. Ob der Motor im Leerlauf weiterläuft oder abgestellt wird, hat keinen wesentlichen Einfluss. Die Streuungen der synthetischen Geräusche liegen in einem ähnlichen Bereich, jedoch erfolgte die Erkennung des Anhaltens später, in jedem Fall nach dem Halten. Der synthetische Leerlauf nach dem Fahrzeughalt bringt für eine schnelle Erkennung keinen Vorteil. Eine sichere auditive Erkennung des Betriebszustandswechsels von Fahren zu Anhalten ist allerdings bei keinem der untersuchten Geräusche möglich.

## 2.6 Motorstart

Motorstart ist ein Betriebszustand mit einem charakteristischen instationären Verhalten. Das Motorstartgeräusch setzt sich aus Anlasser-, Ansaug- und Verbrennungsmotorgeräuschen zusammen (ALTINSOY 2010). In Bild 58 ist das instationäre Verhalten gut zu erkennen. Nach etwa einer Sekunde geht das Geräusch in den Leerlauf über.

### 2.6.1 Stimuli für Hörversuch

Die Motorstartgeräusche stammen aus einer Daimler-Datenbank. Es sind Kunstkopfaufnahmen, welche im Abstand von 3,5 m senkrecht zur Fahrer-



**Bild 58:** Typisches Motorstartgeräusch, mit Schalldruck-Zeitverlauf (oben) und Spektrogramm (unten)

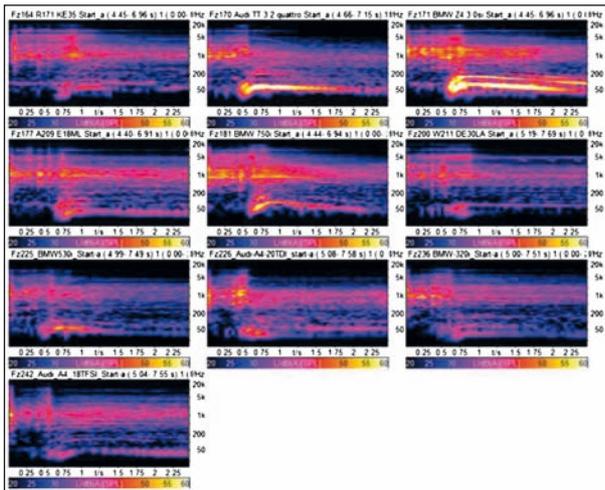


Bild 59: Spektrogramme der Motorstartgeräusche

tür (Ohrhöhe 1,65 m) aufgenommen wurden. Aus der Datenbank wurden 10 Motorstartgeräusche mit möglichst verschiedenen Charakteristika bezüglich der spektralen und zeitlichen Parameter ausgewählt (Bild 59). Für den Hörversuch wurden die Aufnahmen auf die Länge von 2,5 s geschnitten.

Die Experimente zur Erkennung von Motorstartgeräuschen erfolgten chronologisch vor den Untersuchungen des „Herannahenden Fahrzeugs mit erweiterter Datenbank“ (Kapitel 2.3). Daher wurden zu diesem Zeitpunkt auch noch alle vier Hintergrundgeräusche (Erkennungszeitmessung) und drei Hintergrundgeräusche (Mithörschwellenmessung) betrachtet. Aus didaktischen Gründen werden die Ergebnisse aber erst nach der Behandlung aller Fahrzustände diskutiert.

## 2.6.2 Erkennungszeitmessung

Ziel des Experimentes war die Messung der Erkennungszeit, die eine Versuchsperson benötigt, um auf die auditive Erkennung eines Motorstartgeräusches gegenüber einem Hintergrundgeräusch zu reagieren. Als Maskierer kamen alle vier im Kapitel 2.1.1 beschriebenen Hintergrundgeräusche zum Einsatz.

### 2.6.2.1 Probanden

Am Hörversuch Erkennungszeitmessung „Motorstartgeräusch“ nahmen 30 Probanden (19 männlich, 11 weiblich) teil. 21 Personen der Gruppe sind normalsehend, 5 Personen sind blind und 4 Personen sind sehbehindert (Sehrest 5 bis 20 %). Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 34 Jahre.

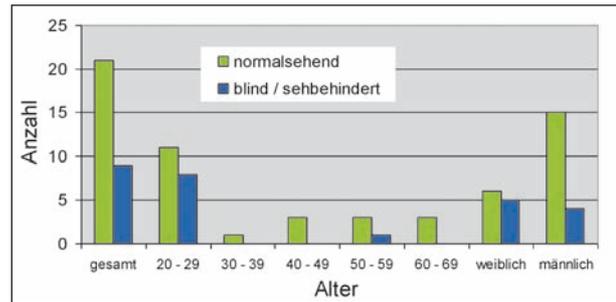


Bild 60: Probandenkollektiv des Hörversuchs: Erkennungszeitmessungen – Motorstartgeräusche

Die Altersgruppenverteilung zeigt Bild 60. Alle Versuchspersonen sind normalhörend. Bis auf wenige Ausnahmen entspricht das Probandenkollektiv dem der ersten Untersuchung (Kapitel 2.2.2).

### 2.6.2.2 Versuchsdesign

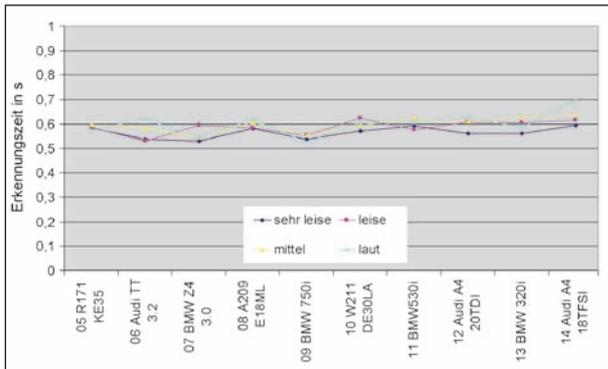
Die Messung der Erkennungszeit erfolgte in gleicher Weise wie im Hörversuch aus Kapitel 2.2.2. Die konkrete Aufgabe für dieses Experiment lautete: „Wann bemerken Sie das Motorstartgeräusch?“

### 2.6.2.3 Ergebnisse

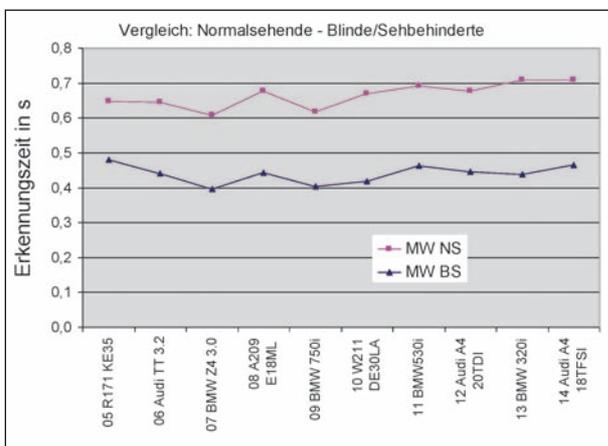
Bild 61 zeigt die Erkennungszeiten der Versuchspersonen auf die 10 gewählten Motorstartgeräusche bei allen vier Hintergründen. Wie aufgrund der Aufnahmesituation der Geräusche (Kunstkopf-abstand 3,5 m senkrecht zur Fahrertür, Ohrhöhe 1,65 m) zu erwarten war, wurde auf die Erkennung aller Motorstartgeräusche, auch unter der Bedingung des lauten Hintergrundes, im Bereich von 0,6 s reagiert. Die geringen Unterschiede der Erkennungszeiten ließen keine spezifische Interpretation der verschiedenen Startgeräusche zu. Um differenzierte Ergebnisse zu erzielen, wurden die Geräusche um 18 dB gedämpft, was einer Quellenentfernung von etwa 32 m entspricht. Ein Hörversuch mit 6 Probanden zeigte allerdings keinen Unterschied zum Versuch mit den Originalpegeln.

Leider gab es in den zur Verfügung gestandenen Datenbanken keine Aufnahmen von Motorstartgeräuschen aus einer größeren Entfernung. Um dennoch Aussagen über die Erkennungsunterschiede der einzelnen Motorstartgeräusche treffen zu können, wurde wieder eine Mithörschwellenmessung durchgeführt.

Im Erkennungszeit-Experiment konnte ein signifikanter Unterschied im Reaktionsverhalten zwi-



**Bild 61:** Erkennungszeiten auf die Motorstartgeräusche für alle 4 Hintergrundgeräusche (aufgrund der minimalen Differenzen wurde auf die Darstellung der Standardabweichung verzichtet)



**Bild 62:** Erkennungszeitunterschiede zwischen Blinden und Normalsehenden am Beispiel der Erkennung von Motorstartgeräuschen

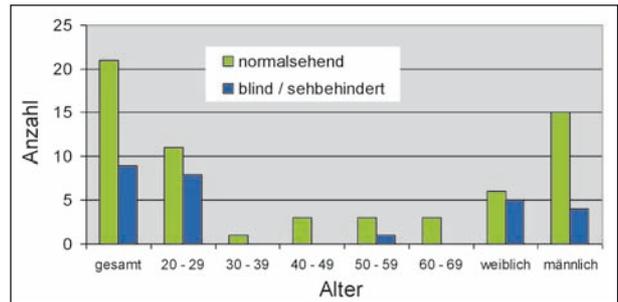
schen der Gruppe der „Normalsehenden“ und der Gruppe der „Blinden/Sehbehinderten“ festgestellt werden. Bild 62 zeigt, dass die Blinden und Sehbehinderten im Mittel etwa 200 ms früher als die Normalsehenden reagierten. Offenbar sind Blinde aufgrund ihrer Übung besser in der Lage, verschiedene Geräusche voneinander zu trennen.

## 2.6.3 Mithörschwellenmessung

Die Mithörschwellenmessung erfolgte analog zum Experiment aus Kapitel 2.2.3. Ziel der Messung ist die Bestimmung erkenntnisrelevanter Signalanteile von Motorstartgeräuschen.

### 2.6.3.1 Probanden

Am Hörversuch Mithörschwellenmessung „Motorstartgeräusch“ nahmen 30 Probanden (19 männlich, 11 weiblich) teil. 21 Personen der Gruppe sind normalsehend, 5 Personen sind blind und



**Bild 63:** Probandenkollektiv des Hörversuchs: Mithörschwellenmessungen – Motorstartgeräusche

4 Personen sind sehbehindert (Sehrest 5 bis 20 %). Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 34 Jahre. Die Altersgruppenverteilung zeigt Bild 63. Alle Versuchspersonen sind normalhörend. Das Probandenkollektiv ist identisch mit dem der Erkennungszeitmessung aus Kapitel 2.6.2.

### 2.6.3.2 Versuchsdesign

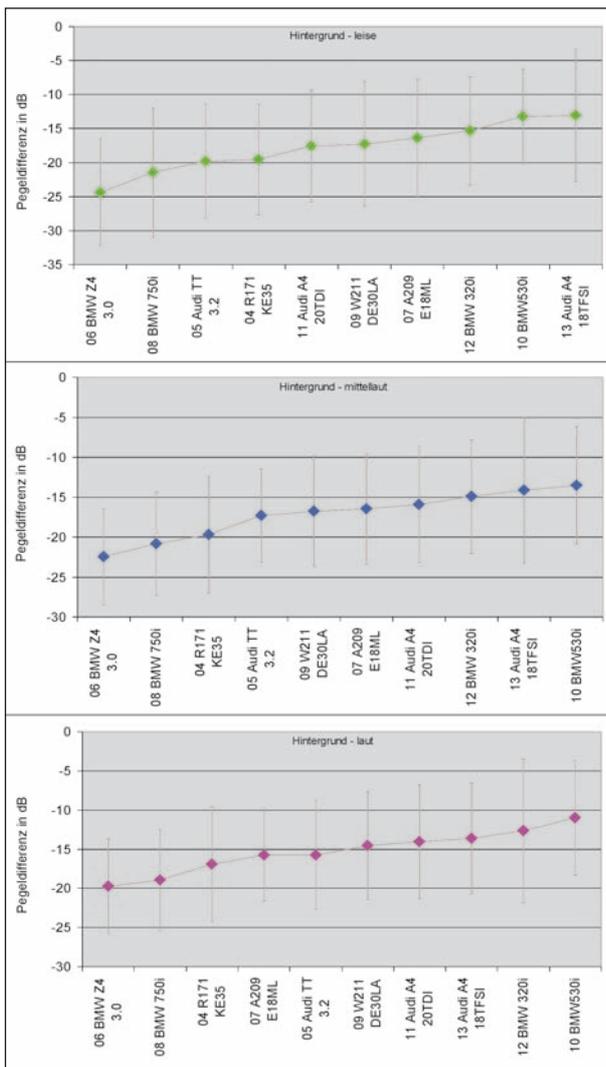
Die Mithörschwellenmessung erfolgte in gleicher Weise wie im Hörversuch aus Kapitel 2.2.3.2. Die Aufgabe lautete: „Stellen Sie die Lautstärke des Motorstartgeräusches so ein, dass Sie es gerade noch aus der Umgebung heraushören.“

### 2.6.3.3 Ergebnisse

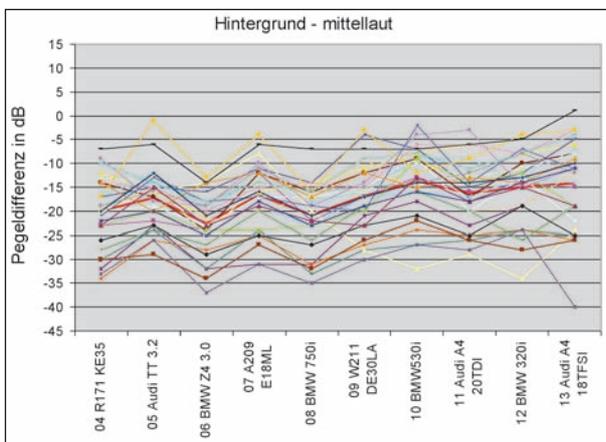
Aufgrund der sehr guten Erkennbarkeit der Motorstartgeräusche im Originalpegel ist es nicht verwunderlich, dass die Probanden die Geräusche, je nach Hintergrund, zwischen 10 dB und 25 dB leiser einstellten. Bild 64 stellt die Ergebnisse der Pegeldifferenzen für die drei Hintergrundgeräusche „leise“, „mittellaut“ und „laut“ dar.

Es zeigt sich, dass die Versuchspersonen zwischen den verschiedenen Startgeräuschen relativ stark differenzierten. Die Pegelunterschiede lagen für alle Maskierer bei etwa 10 dB. Die sehr großen Standardabweichungen werden auf die individuelle Risikobereitschaft der Probanden zurückgeführt. Offenbar besteht bei den Versuchspersonen keine Übereinstimmung in der Bedeutung „ein Motorstartgeräusch gerade noch aus dem Umgebungsgeräusch heraushören“. Bild 65 zeigt die Pegeldifferenzen aller Versuchsteilnehmer beim Hintergrund „mittellaut“.

Die einzelnen Bewertungsergebnisse zeigen, dass die großen Standardabweichungen zu einem wesentlichen Teil aus absoluten Bewertungsunter-



**Bild 64:** Eingestellte Pegeldifferenzen der Motorstartgeräusche für die Hintergründe „leise“, „mittellaut“ und „laut“



**Bild 65:** Alle Probandenbewertungen der Mithörschwellenmessung der Motorstartgeräusche am Beispiel des mittellauten Hintergrundes

schieden der Probanden resultierten. In der Bewertung der Relationen zwischen den Geräuschen besteht weitgehend Übereinstimmung.

Die Tatsache, dass die untersuchten Motorstartgeräusche auch nach einer Pegelreduzierung zwischen 10 dB und 25 dB noch ausreichend erkennbar sind, zeigt das große Potenzial der Geräuschgestaltung dieses Betriebszustandes. Auch in Verbindung mit den Ergebnissen aus Kapitel 2.5.3.3, wonach das Anhalten eines Fahrzeuges nach Motorstopp nicht besser wahrgenommen wird als ein Anhalten im Leerlaufgeräusch (Bild 57), wäre eine spezielle Untersuchung der Start-Stopp-Problematik in einem Folgeprojekt wünschenswert. Hier könnte geklärt werden, welche akustische Differenz ein Geräusch aufweisen muss, um vom Vorgänger- oder Folgebetriebszustand auditiv unterscheidbar zu sein.

## 2.7 Betriebszustandserkennung „Beschleunigung“ – „Bremsen“

Die auditive Erkennung von unterschiedlichen Fahrzeug-Betriebszuständen ist eine wesentliche Voraussetzung für das zielgerichtete Handeln von Fußgängern. Dies gilt in besonderer Weise für sehbehinderte und blinde Verkehrsteilnehmer. Wichtig für die Entscheidungsfindung in vielen Situationen, ist die Unterscheidung, ob ein Fahrzeug bremsen oder ob es beschleunigt. Gewohnheitsgemäß gehen Fahrzeugbeschleunigungen mit einer Erhöhung des Spektrums und des Pegels eines Fahrzeuggeräusches einher (ALTINSOY & JEKOSCH 2012). Dies gilt aber uneingeschränkt nur für Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Für Elektrofahrzeuge müssen möglicherweise Ersatzgeräusche geschaffen werden. In diesem Kapitel wird untersucht, welche grundsätzlichen Eigenschaften ein Geräusch besitzen muss, um als „Bremsen“ oder „Beschleunigen“ interpretiert zu werden. Dabei werden folgende Annahmen getroffen. Der Betriebszustand eines Fahrzeuges soll in einem Abstand von ungefähr 30 Metern erkannt werden. Die richtige Erkennung soll in einer Zeitspanne von einer Sekunde möglich sein.

Als Beispiel für eine Fahrzeugbeschleunigung sind im Bild 66 Spektrum, Pegel und Drehzahl über der Zeit dargestellt.

Es ist der Ausschnitt aus einer Aufnahme einer Teillast-fern-Fahrt in einer Entfernung, in der eine abstandsbedingte Pegelerhöhung während der halben Sekunde keine Rolle spielt. Die Pegelerhöhung ist also nur durch den Betriebszustand „Beschleunigung“ begründet.

Im realen Fall einer Annäherungsfahrt entsteht, unabhängig vom Betriebszustand, eine entfernungsbezogene Pegelerhöhung. Für eine Annäherungsfahrt mit 30 km/h beträgt die Pegelerhöhung im Abstandsbereich von 30 Metern während einer Sekunde etwa 3 dB. Diese abstandsabhängige Pegeländerung ist von einer betriebszustandsabhängigen Pegeländerung nicht zu unterscheiden. Ein Betriebszustand sollte also nicht durch eine Pegeländerung codiert werden. Die Frequenzänderung ist dem gegenüber gut zur Betriebszustandscodierung geeignet, da sie auch der Erfahrung: Drehzahlerhöhung = Geschwindigkeitserhöhung = Frequenzenerhöhung entspricht.

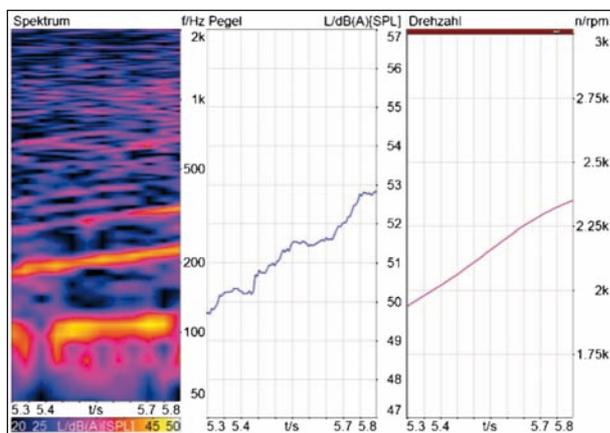
Die Szene, welche als Grundlage für das Experiment gewählt wurde, ist schematisch im Bild 67 gezeigt.

Für den Hörversuch wurden synthetische Signale in Form von Sweeps generiert, welche verschiedene Frequenzbereiche überdecken und unterschiedliche Steigungen aufweisen. Auf andere mögliche Signalvariationen, wie Frequenz- oder Amplitudenmodulationen, wird in dieser Untersuchung nicht eingegangen. Ziel des Experimentes war es herauszufinden, in welchem Frequenzbereich die Er-

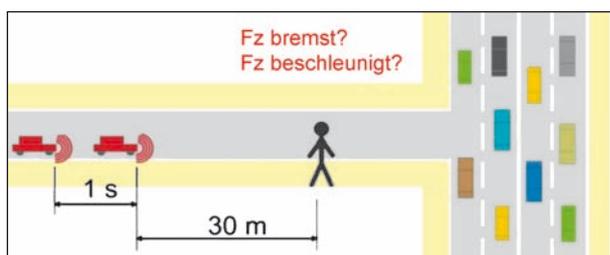
kennung am besten funktioniert und wie groß die Frequenzänderung sein muss, damit der Sweep richtig als „aufwärts“ oder „abwärts“ erkannt wird. Der Versuch wurde sowohl ohne Hintergrundgeräusch als auch mit einem Hintergrundgeräusch von 55 dB (A) durchgeführt.

### 2.7.1 Synthetische Signalerzeugung

Der Frequenzbereich für die Stimuli wurde auf (100 ... 4.000) Hz begrenzt. Der Bereich oberhalb von 4 kHz wurde aufgrund der erhöhten Lästigkeit nicht betrachtet. Als Startfrequenzen für die Sinus-Sweeps wurde jede zweite Terzmittenfrequenz zwischen 100 Hz und 4 kHz gewählt. Da eine Erkennungszeit von etwa einer Sekunde angestrebt wird, wurde die Signallänge auf 2 s festgelegt. Es wurden Frequenzänderungsraten von 10 %, 20 %, 40 % und 80 %, bezogen auf die Startfrequenz, generiert. In einem späteren Experiment wurden die Änderungsraten mit 160 % und 320 % erweitert. Die Sinus-Sweeps wurden aufwärts für „Beschleunigen“ und abwärts für „Bremsen“ erzeugt. So entstanden für jeden der beiden Betriebszustände 36 Stimuli. Der Summenpegel jedes Sweeps betrug 50 dB (A).



**Bild 66:** Spektrum, Pegel und Drehzahl über der Zeit eines Ausschnittes der Beschleunigungsphase (Länge 500 ms) eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor



**Bild 67:** Szene für das Experiment Betriebszustandserkennung

### 2.7.2 Erkennungszeitmessung

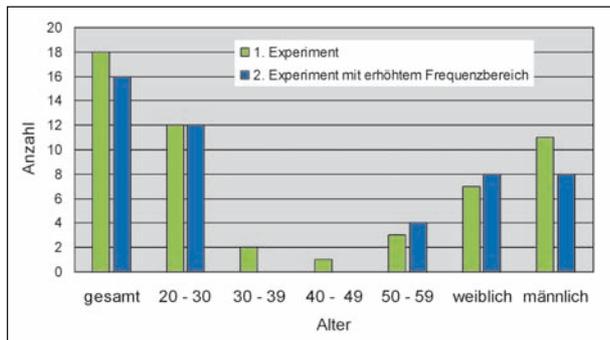
Als Kriterium für eine effiziente Erkennung wurde wieder die Zeit der Probanden gemessen, welche bis zur Reaktion auf die Zustandserkennung verging. Die Reaktion erfolgte durch Drücken der Cursor-Tasten → für „Beschleunigen“ und ← für „Bremsen“, wodurch auch bestimmt werden konnte, ob die Versuchspersonen den richtigen Betriebszustand erkannten. Die Cursor-Tasten sind als Eingabegerät zwar nicht optimal geeignet, aber für dieses Experiment ausreichend, da das Interesse mehr auf den Relationen der Stimuli untereinander liegt als auf den Absolutzeiten.

#### 2.7.2.1 Probanden

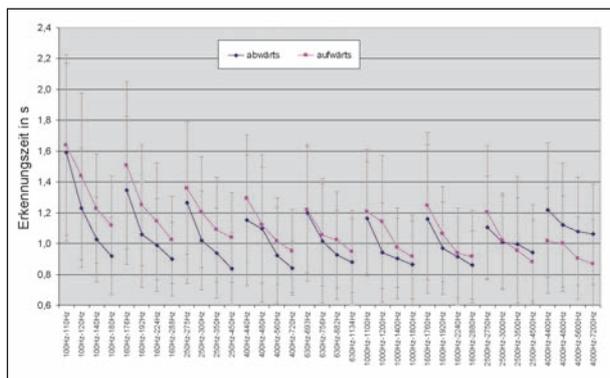
Am Hörversuch „Betriebszustandserkennung“, Experiment 1 nahmen 18 Probanden (11 männlich, 7 weiblich) und am 2. Experiment (mit erhöhtem Frequenzbereich) nahmen 16 Probanden (8 männlich, 8 weiblich) teil. Alle Personen der Gruppe sind normalsehend. Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 31 Jahre. Die Altersgruppenverteilung zeigt Bild 68. Alle Versuchspersonen sind normalhörend.

### 2.7.2.2 Versuchsdesign

Im Versuch wurden die 72 synthetischen Geräusche in 6-facher Wiederholung randomisiert über Kopfhörer dargeboten. Im ersten Experiment wur-



**Bild 68:** Probandenkollektiv für den Hörversuch Betriebszustandserkennung



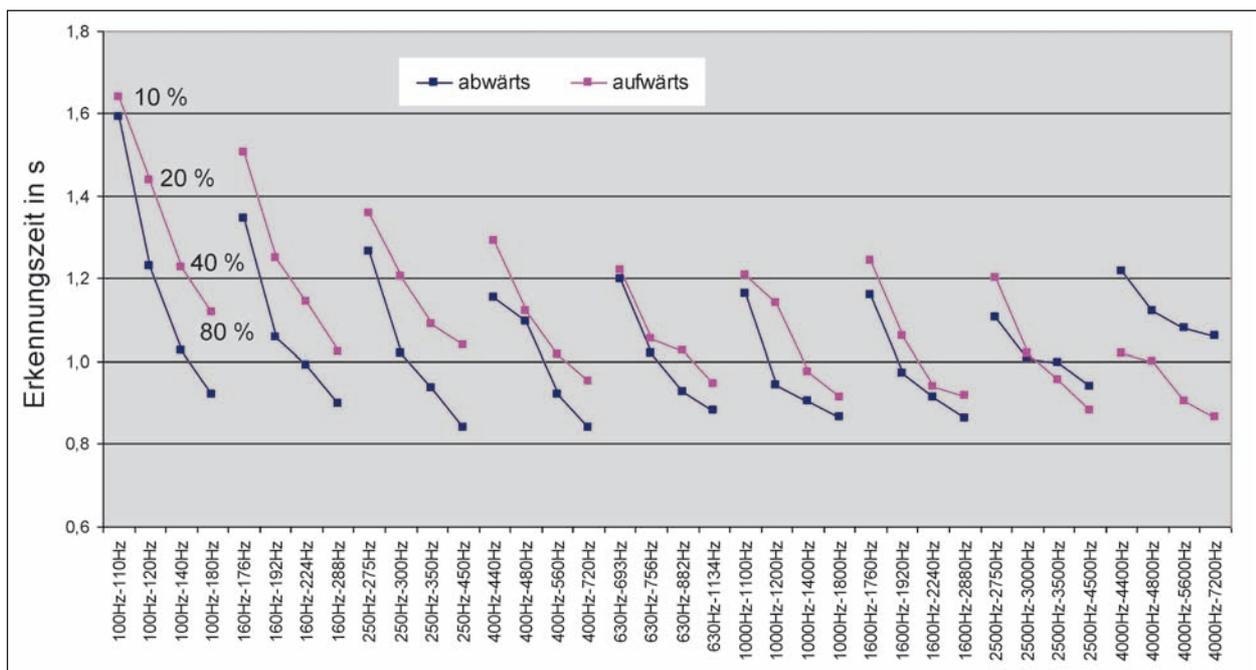
**Bild 69:** Erkennungszeiten mit Standardabweichungen

den Frequenzänderungen von 10 %, 20 %, 40 % und 80 % und im zweiten Experiment Änderungsraten von 40 %, 80 %, 160 % und 320 % untersucht. Im dritten Experiment wurden die Sweeps mit den Änderungsraten von 40 % bis 320 % mit einem mittellauten Hintergrundgeräusch getestet.

### 2.7.2.3 Ergebnisse

Im Bild 69 sind die Erkennungszeiten auf die Erkennung „Aufwärts-Sweep“ oder „Abwärts-Sweep“ für alle Stimuli mit Frequenzänderungen von 10 %, 20 %, 40 % und 80 % einschließlich der Standardabweichungen dargestellt. Die Streuung der Probanden-Erkennungszeiten ist in diesem Experiment relativ hoch. Das liegt, wie schon in den vorangegangenen Experimenten, an der individuellen Reaktions- und Erkennungsfähigkeit. Da die Standardabweichungen keine weiteren Erkenntnisse liefern, wurden sie in den folgenden Ergebnisdigrammen zugunsten einer besseren Übersichtlichkeit weggelassen.

Den Diagramminhalt ohne Standardabweichungen zeigt Bild 70 in einer größeren Darstellung. Die Abszissenbeschriftungen der Diagramme bezeichnen jeweils die Frequenzbereiche der Aufwärts-Sweeps. Für die Abwärts-Sweeps gilt der Frequenzverlauf in umgekehrter Reihenfolge. Die Frequenzänderung bezieht sich in jedem Fall auf eine Länge von 2 s.



**Bild 70:** Erkennungszeiten auf die Erkennung „abwärts“ oder „aufwärts“ der Sweeps, mit Frequenzänderungsraten von 10 %, 20 %, 40 % und 80 % (bezogen auf eine Länge von 2 s), ohne Hintergrundgeräusch

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluss der Frequenzänderungsrate. Insbesondere bei tiefen Frequenzen wird ein steilerer Anstieg bzw. Abfall der Sinus-Sweeps für eine schnellere Erkennung benötigt. Beim Aufwärts-Sweep (pinkfarben) verringern sich die Erkennungszeiten mit steigender Frequenz. Für den Abwärts-Sweep (blau) ist ein ähnlicher Verlauf zu sehen, allerdings steigt die Erkennungszeit ab einer Frequenz von 4 kHz wieder leicht an. Die schnellere Erkennung der Abwärts-Sweep entsteht aufgrund der höheren Startfrequenz gegenüber dem Aufwärts-Sweep. Das Diagramm im Bild 70 liefert nur Aussagen zur Erkennungszeit – es sagt nichts zur richtigen Erkennung aus. Im Bild 71 sind die Erkennungsfehler (Proband erkennt die Anstiegsrichtung des Sweeps falsch) aufgezeigt. 16 % der Antworten für einen Aufwärts-Sweep von 100 Hz bis 110 Hz lauteten „abwärts“. Ähnlich groß war der Fehler beim 10%-Anstieg für die Startfrequenz von 160 Hz. Für den Abwärts-Sweep gibt es einen ähnlich großen Fehler nur für die Startfrequenz 110 Hz. Ab einem Frequenzbereich von etwa 1 kHz steigen die Erkennungsfehler für den Abwärts-Sweep mit 10 % Frequenzänderung wieder von 7 % bis 14 % an.

Die Diagramme in den Bildern 72 und 73 zeigen die Erkennungsleistungen getrennt nach dem Alter der Versuchspersonen. Die Reaktionen der über 50-Jährigen erfolgte beim Aufwärts-Sweep etwas später als die Reaktion der jüngeren Versuchspersonen. Die Differenz liegt mit etwa 100 ms in einem

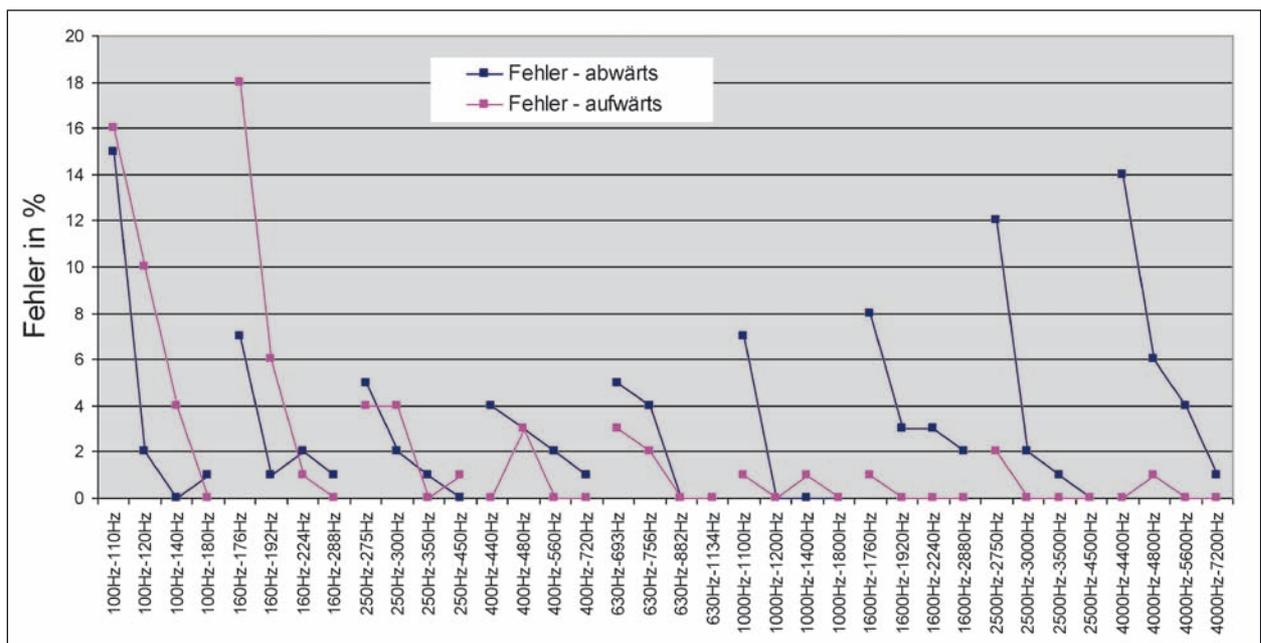
noch akzeptablen Bereich. Die Abweichungen beim Abwärts-Sweep liegen dagegen mit bis zu 300 ms deutlich höher. Besonders bei den Stimuli mit nur 10 % Frequenzänderung fiel den älteren Probanden die Erkennung deutlich schwerer.

Grundsätzlich verbessert sich die Erkennung mit der Steilheit des Frequenzanstieges bzw. -abfalls. Die Kurvenverläufe aus Bild 70 lassen erahnen, dass die Erkennungszeit mit noch größeren Frequenzänderungsraten weiter sinken könnte. Interessant wären Aussagen zum maximalen Anstieg, ab welchem keine Verbesserung der Erkennung mehr möglich ist.

In einem weiteren Versuch wurden die schlecht erkennbaren Frequenzänderungsraten von 10 % und 20 %, durch 160 % und 320 % ersetzt.

Im Bild 74 sind die Erkennungszeiten auf die Sweeps mit den größeren Frequenzänderungsraten dargestellt. Um die Vergleichbarkeit zum vorherigen Hörversuch zu gewährleisten, wurden die Änderungsraten von 40 % und 80 % wiederholt getestet.

Bei den Erkennungszeiten auf die Sweeps mit den großen Frequenzänderungsraten wird in vielen Frequenzbereichen die minimal mögliche Erkennungszeit erreicht. Lediglich im Bereich zwischen 250 Hz und 630 Hz könnten noch steilere Frequenzänderungen einen Vorteil bringen.



**Bild 71:** Erkennungsfehler „abwärts“ oder „aufwärts“ der Sweeps, mit Frequenzänderungsraten von 10 %, 20 %, 40 % und 80 %, ohne Hintergrundgeräusch

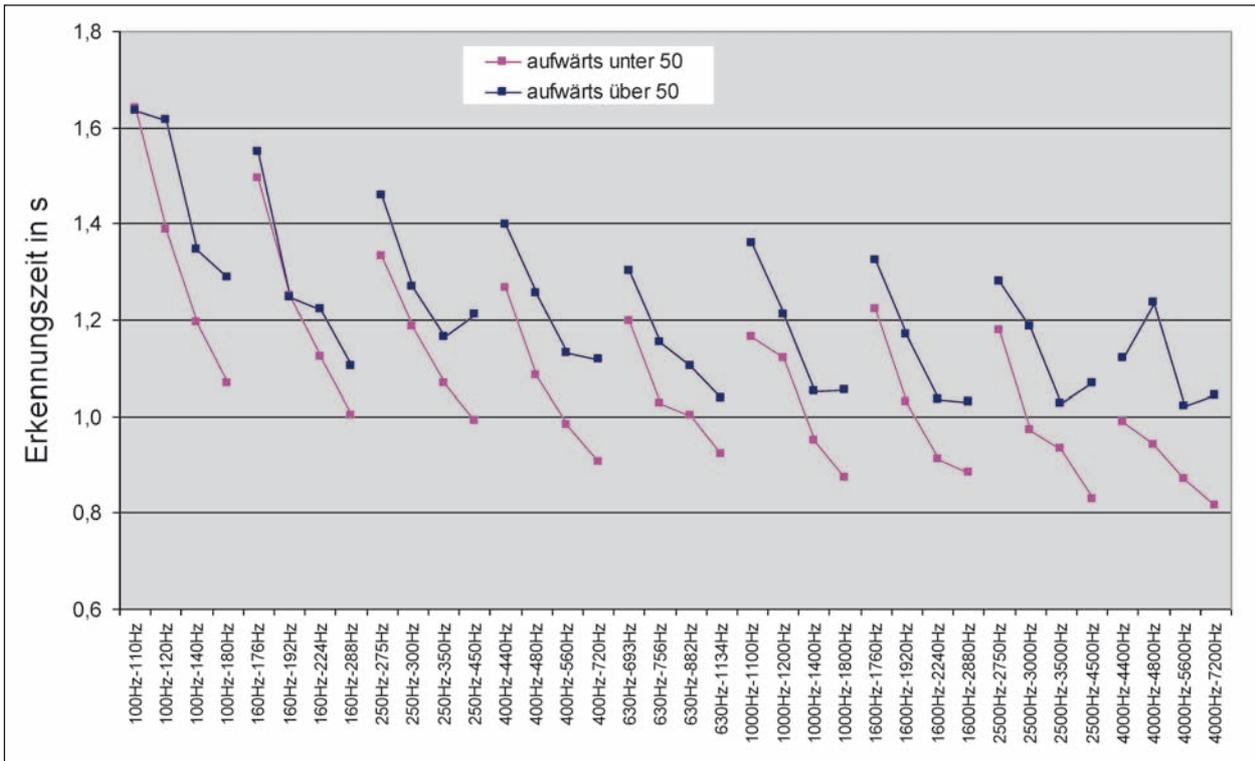


Bild 72: Erkennungszeiten auf die Erkennung „aufwärts“ getrennt nach Alter, ohne Hintergrundgeräusch

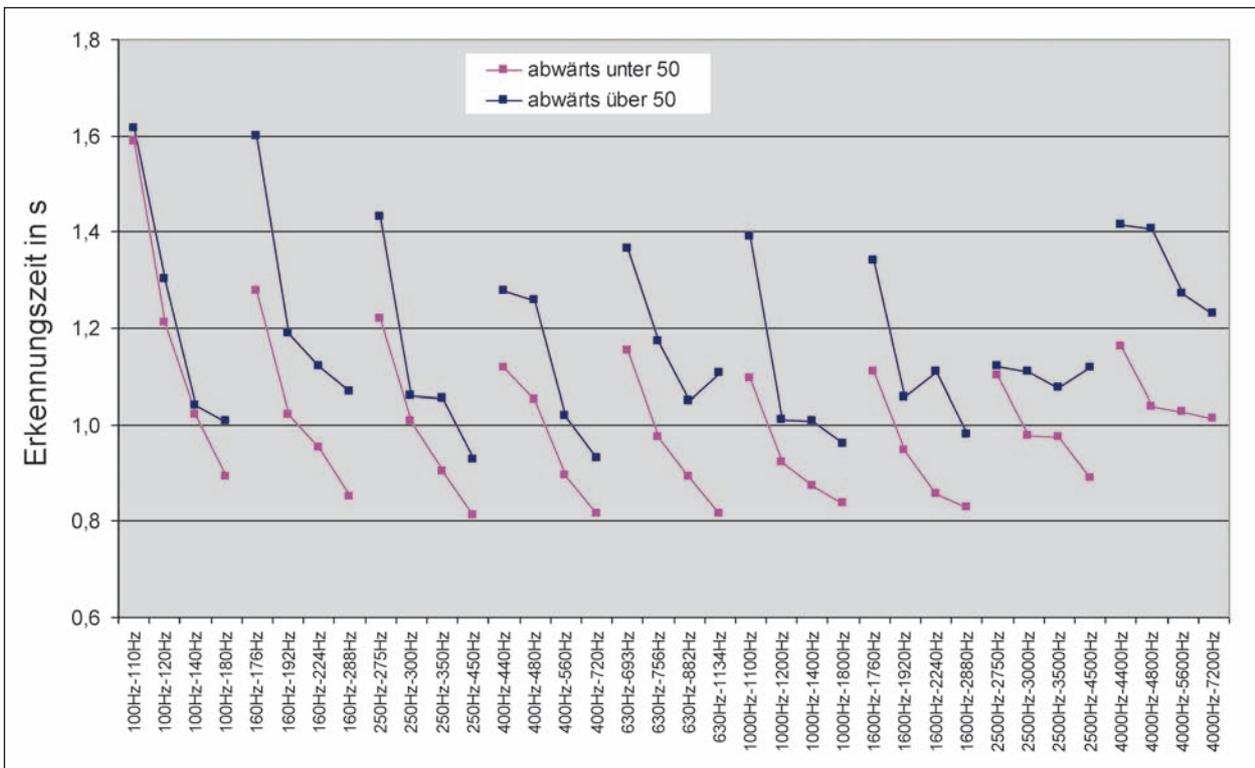
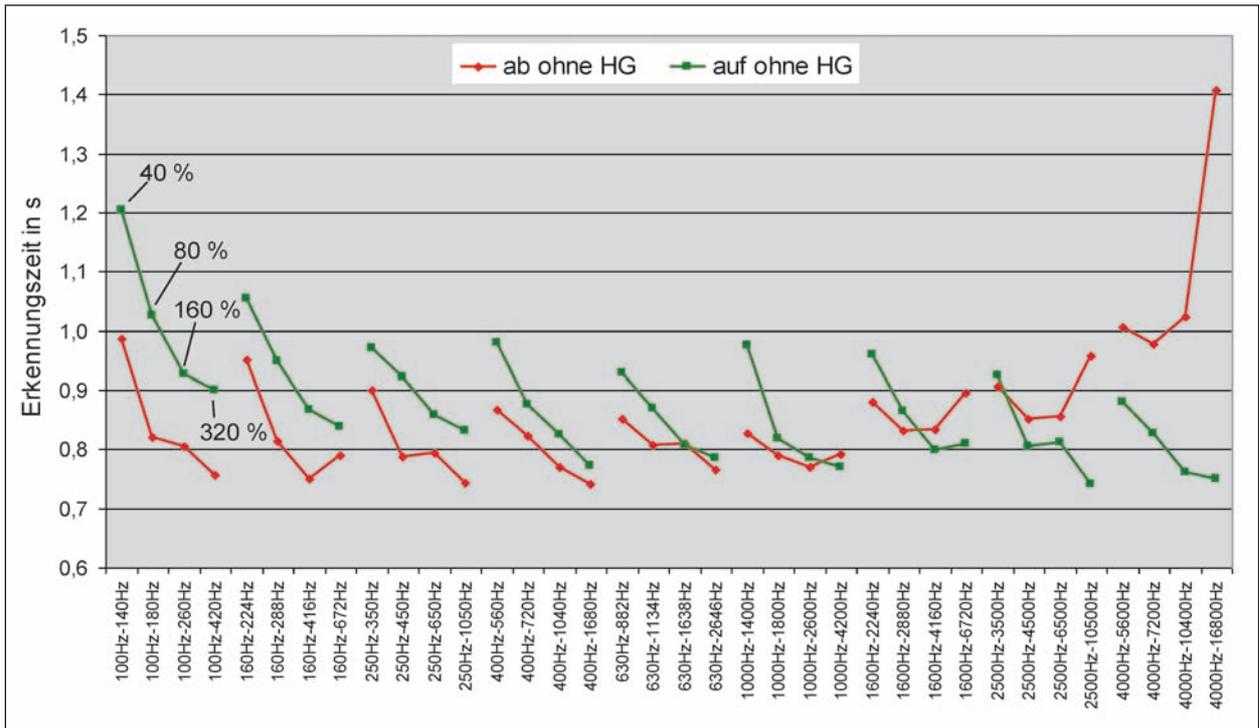
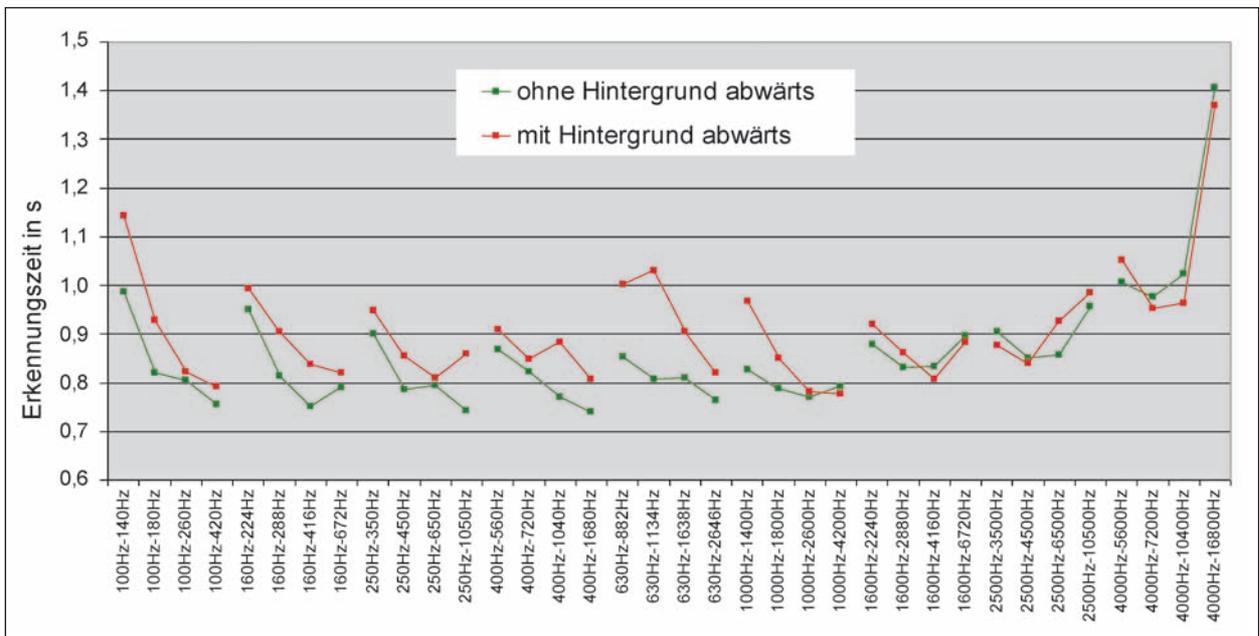


Bild 73: Erkennungszeiten auf die Erkennung „abwärts“ getrennt nach Alter, ohne Hintergrundgeräusch



**Bild 74:** Erkennungszeiten auf die Erkennung „abwärts“ und „aufwärts“ mit erhöhten Frequenzänderungsraten, ohne Hintergrundgeräusch



**Bild 75:** Erkennungszeiten auf die Erkennung „abwärts“ mit erhöhten Frequenzänderungsraten, mit und ohne Hintergrundgeräusch

Im nächsten Experiment wurde den Sinus-Sweeps ein Hintergrundgeräusch mit einem Schalldruckpegel von 55 dB (A) überlagert. Die Bilder 75 und 76 zeigen die Erkennungszeiten für „abwärts“ und „aufwärts“ mit und ohne Hintergrundgeräusch. Überraschenderweise verschlechtert sich die Er-

kennung der Sinus-Sweeps durch das Hintergrundgeräusch nicht maßgeblich. Die Reaktion auf den Abwärts-Sweep (Bild 75) verschlechtert sich nur im Bereich um 100 Hz und zwischen etwa 800 Hz und 1.200 Hz. In diesen Frequenzbereichen liegen auch die höchsten Pegel des Hintergrundspektrums.

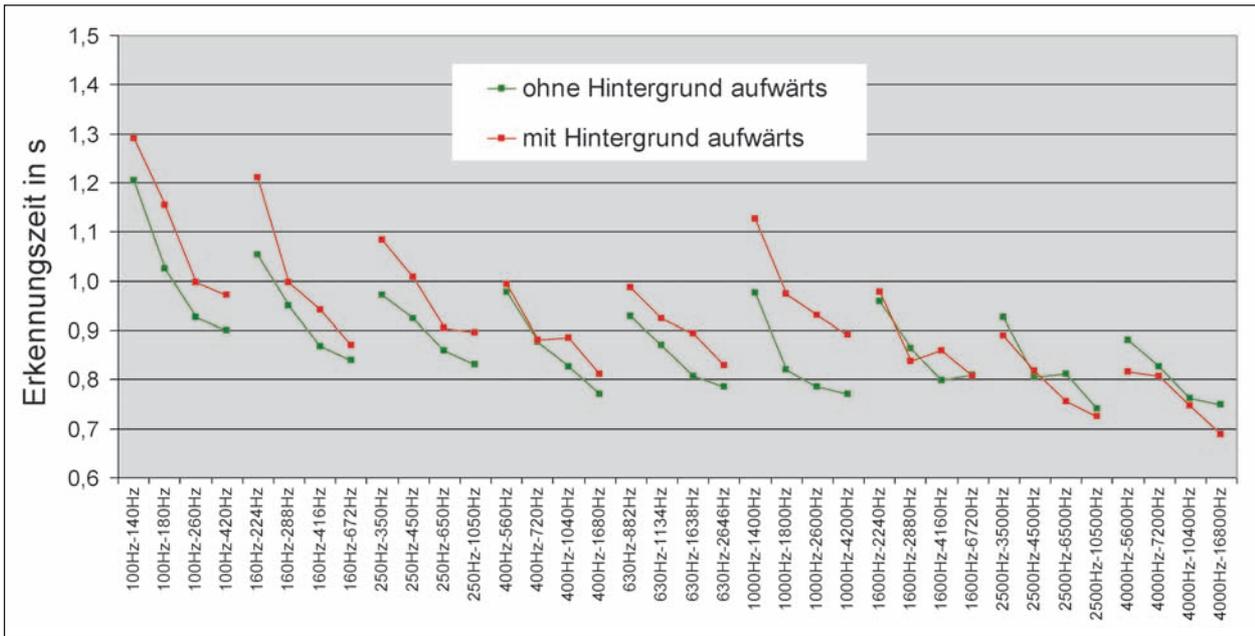


Bild 76: Erkennungszeiten auf die Erkennung „aufwärts“ mit erhöhten Frequenzänderungsraten, mit und ohne Hintergrundgeräusch

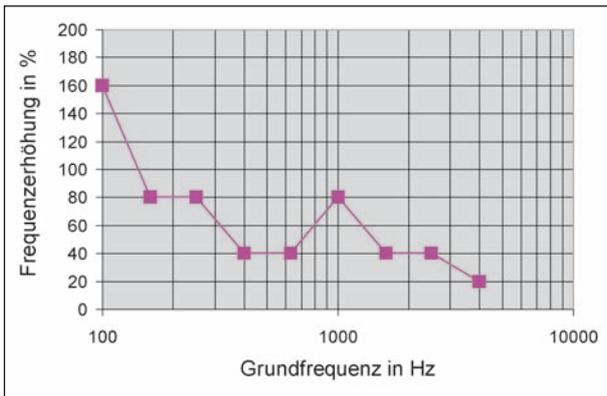


Bild 77: Zur Erkennung notwendige Frequenzerhöhung über der Grundfrequenz (für Aufwärts-Sweeps)

Ganz ähnlich verhält sich die Erkennungswahrnehmung des Aufwärts-Sweeps. Die größten Verschlechterungen ergaben sich hier bei etwa 200 Hz und etwa 1.200 Hz.

Möchte man also einen Sinus-Sweep mit einem Mittelungspegel von 50 dB (A) aus einem Hintergrundpegel von 55 dB (A) heraushören, so gelten für einen Aufwärts-Sweep die Verhältnisse aus Bild 77.

Die Frequenzerhöhung bezieht sich wieder auf 2 Sekunden. Benötigt man für die Erkennung eines Sweeps mit 100 Hz Grundfrequenz noch eine Erhöhungsraten von 160 %, so genügen für die Grundfrequenzen von 400 Hz und 630 Hz schon Erhöhungsraten von 40 %. Im Bereich der Dominanz des Hintergrundspektrums bei 1 kHz sind 80 % not-

wendig. Bei den höheren Frequenzen 1,6 kHz und 2,5 kHz genügen wieder 40 % und für die Grundfrequenz von 4 kHz wird nur noch eine Änderungsrate von 20 % benötigt. Aus Gründen der Akzeptanz der Geräusche favorisieren die Autoren den Bereich zwischen 250 Hz und 400 Hz.

## 2.8 Diskussion der auditiven Versuche

Bisherige Untersuchungen aus der Literatur zur Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen basieren auf dem Betriebszustand Konstantfahrt (konstante Geschwindigkeiten) (z. B. KERBER & FASTL 2007, KERBER & FASTL 2008 oder YAMAUCHI u. a. 2011). Nur wenige Autoren beschäftigten sich mit anderen Betriebszuständen (PARIZET u. a. 2013, PARIZET u. a. 2014). So finden sich in der Literatur auch keine Untersuchungen, die sich mit den Verkehrssituationen wie Motorstart, Parkplatz oder Anhalte-Situation beschäftigen.

Die Ergebnisse dieser Studie für die Verkehrssituation „Herannahendes Fahrzeug mit Teillast Beschleunigung“ zeigen, dass Fußgänger Annäherungsgeräusche von Elektrofahrzeugen deutlich später wahrnehmen. Wird ein herannahendes Fahrzeug mit Verbrennungsmotor im Mittel in einer Entfernung von 36 m wahrgenommen, so wird ein gleich schnelles Elektrofahrzeug im Mittel erst im Abstand von 13 m wahrgenommen. Für die Erken-

nung von Fahrgeräuschen gegenüber einem Hintergrundgeräusch genügt es, wenn nur einzelne Terzpegel aus dem Hintergrundspektrum herausragen. Besonders geeignet sind Signalanteile, welche ähnlich geartet sind wie tieffrequente Motorordnungen. Es besteht keine Korrelation zwischen der Erkennungszeit und dem zur Erkennung benötigten Pegel. Diese Ergebnisse stimmen sehr gut mit den Ergebnissen aus der Literatur überein (MISDARIJS u. a. 2013, GENUIT & FIEBIG 2013, PARIZET u. a. 2014). Die Ergebnisse der Situation „Anfahrendes Fahrzeug – Parkplatz“ belegen, dass Verbrennungsfahrzeuge etwa nach einer Sekunde nach dem Anfahren erkannt werden. Dies gilt für Fahrzeuge, welche aus dem Leerlauf anfahren, ebenso wie für das Anfahren mit Motorstart. Elektrofahrzeuge können dem gegenüber erst nach etwa 3 s erkannt werden. Das entspricht in der Bewertungssituation einem Zeitraum, in welchem, schon eine Kollision stattfinden kann. Für die Situation „Anhaltendes Fahrzeug – Fußgängerüberweg“ sind die Ergebnisse schwieriger zu interpretieren. Ob ein Elektrofahrzeug (ohne zusätzlichen Sound) am Fußgängerüberweg angehalten hat, ist rein auditiv nicht sicher zu erkennen. Der Erkennungszeitpunkt streut von 0,7 s zu früh bis 0,8 s zu spät. Auch die Geräusche von Verbrennungsfahrzeugen und die synthetischen Geräusche streuen erheblich. Allerdings erfolgt die Erkennung im Regelfall nicht zu früh. Die Untersuchungen zum „Motorstart“ haben ergeben, dass Motorstartgeräusche in 3,5 m Entfernung auch noch nach Pegelreduktionen zwischen 10 und 25 dB wahrgenommen werden können. Dies prognostiziert den großen „Spielraum“ für diesen Betriebszustand.

### 3 Audio-visuelle Wahrnehmung von Fahrzeugaußen-geräuschen

#### 3.1 Versuchsanordnung

##### 3.1.1 Versuchsumgebung und Versuchsablauf

Die Untersuchung fand im Multimodalen Messlabor am Lehrstuhl für Kommunikationsakustik der TU Dresden statt. Dieses Forschungslabor eignet sich für die realitätsnahe Wiedergabe akustischer Stimuli mit sehr guter räumlicher Auflösung. Hierfür ist ein hochwertiges Wellenfeldsynthesesystem aus 468 Lautsprechern (348 Hochtöner, 116 Mitteltöner und 4 Subwoofer) verbaut. Die Lautsprecher sind

umlaufend auf Kopfhöhe montiert und können alle separat angesteuert werden. So ist es möglich, mehr als 32 Geräuscheinzelquellen beliebig im oder außerhalb des Raumes verteilt darzustellen. Die Positionen der Quellen können während der Wiedergabe in Echtzeit verändert werden. Bewegte Quellen können kontinuierlich akustisch wahrgenommen werden. Die Lautsprecher sind hinter Wandpanelen verborgen, um die Probanden nicht von der dargebotenen Szene abzulenken.

Optische Stimuli werden über einen Beamer (Auflösung HD) auf einer akustisch transparenten Leinwand präsentiert. Die ebenfalls im Raum installierte Bewegungsplattform (Hexapod) wurde für die Untersuchungen nicht zur Beschleunigungs- und Vibrationswiedergabe genutzt (Bild 78).

Der Ablauf der Untersuchungen beinhaltete für die Probanden nach der Begrüßung und einem einleitenden Vorgespräch zunächst die Erhebung des Visus in Anlehnung an die Sehschärfeprüfung gemäß DIN 58220 unter Verwendung von Normsehzeichen gemäß DIN EN ISO 8596. In ausreichend beleuchteter Umgebung kamen normgemäße Prüftafeln in der Prüferentfernung von fünf Metern bzw. für die geringen Sehschärfestufen einem Meter zur Anwendung. Nachfolgend gingen die Probanden in den Versuchsraum, nahmen auf dem Probandensitz Platz, der Versuch wurde erläutert und das Blickaufzeichnungssystem kalibriert. Nach mehreren Probedurchläufen zur Gewöhnung an die geforderte Reaktion folgte der erste Versuchsteil (Parkplatzsituation mit anfahrenen Fahrzeugen). Als Abschluss wurden die Darstellungen des Versuchsteils „Anhaltesituation“ präsentiert. Im Versuchsablauf waren je nach Bedarf des einzelnen Probanden Pausen enthalten.



Bild 78: Multimodales Messlabor

### 3.1.2 Probandenkollektiv

Bei der Untersuchung waren vor dem oben umrissenen Hintergrund Personen mit Einschränkungen des Sehvermögens sowie normalsichtige Personen zu berücksichtigen. Prinzipielle Einschränkungen hinsichtlich des Alters und der Geschlechtsverteilung bestanden nicht, es wurde jedoch auf diesbezügliche Ausgewogenheit geachtet. Es wurden nur erwachsene Personen untersucht. Die Personen wurden über Probandenlisten und bestehende Kontakte der beteiligten Lehrstühle sowie Bekanntmachungen (Aushänge, Anzeigen) akquiriert. Durch diese Gelegenheitsstichprobe wurden somit in nicht experimenteller Variation die Personenvariablen Sehvermögen, Geschlecht und Alter realisiert.

Die untersuchte Gesamtstichprobe umfasst 55 Personen. Es zeigt sich hinsichtlich der Personenvariablen Sehvermögen und Geschlecht eine belastbare Verteilung. Unter den Probanden befanden sich mit 58 % etwas mehr Männer als Frauen (42 %). Normalsichtige Personen mit einem Visus von mindestens  $V = 0,9$  stellten die Mehrheit (74 %), Personen mit eingeschränktem Sehvermögen waren zu einem Viertel vertreten. Die Altersverteilung weist einen Schwerpunkt im Bereich unter 30-jähriger Personen auf (Bild 79).

### 3.1.3 Experimentelle Variation

#### 3.1.3.1 Versuch Parkplatzsituation

Fokus des Untersuchungsteiles „Parkplatzsituation“ waren Fahrzeuge, die aus dem Stand einer parkenden Position (Parkbuchten mit Senkrechtaufstellung) anfahren. Hierzu wurden mit sechs jeweils direkt nebeneinander stehenden Fahrzeugen Videosequenzen in realer Verkehrsumgebung aufgezeichnet. Die Position jedes der sechs Fahrzeuge wurde mehrfach variiert aufgezeichnet (drei Videoversionen). In jeder Sequenz fuhr nach einer Wartezeit von mehreren Sekunden eines der dargestellten Fahrzeuge an und in der Fahrgasse an der Position des Beobachters (Videokamera) vorbei aus dem Bild.

Mit dem so gewonnenen Videomaterial wurden durch Kombination mit den akustischen Stimuli insgesamt 120 Versuchssituationen mit Variation der Merkmale Fahrzeugposition, Fahrzeuggeräusch, Hintergrundgeräusch sowie Störgeräusch (Distraktor) in mehreren Submerkmalen (Art und Position) erzeugt. Diese Situationen wurden den Probanden in individuell randomisierter Reihenfolge dargeboten.

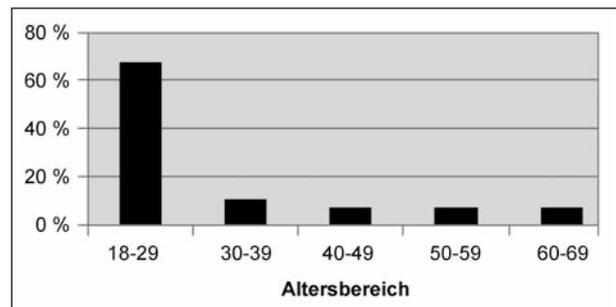


Bild 79: Altersverteilung der untersuchten Personen (N = 55)



Bild 80: Aufstellvarianten (Videoversionen) der untersuchten Parkplatzsituation (P = Position)

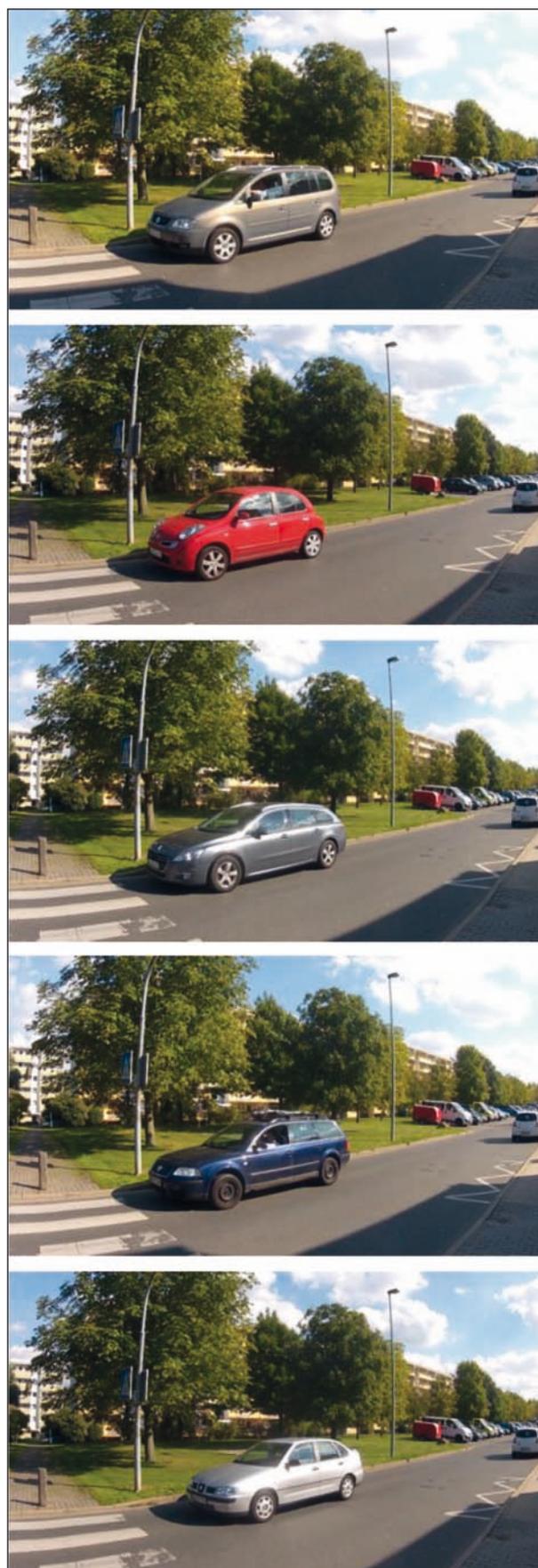
Die Variation der Fahrzeugposition erfolgte in den sechs dargestellten Positionen (Bild 80). Innerhalb der 120 Darbietungen startete je 20-mal ein Fahrzeug aus jeder der sechs Parkstände. Als Fahrzeuggeräusch für die Sequenz des Anfahrens und die Vorbeifahrt am Probanden kamen fünf verschiedene akustische Stimuli zur Anwendung, die ebenfalls vollständig über die 120 Darbietungen variiert wurden (je 24). Es handelte sich um das Fahrgeräusch eines Elektrofahrzeuges, ein synthetisch erzeugtes Fahrgeräusch, ein synthetisch erzeugtes Fahrgeräusch mit synthetischem Leerlaufgeräusch sowie zwei Geräusche eines Ver-

brennungsmotors (Dieselmotor, einmal mit Leerlauf und einmal mit Motorstartgeräusch des Anlassvorgangs). Die Leerlaufgeräusche starteten bereits mit Beginn der dargestellten Sequenz. Die Geräusche der anfahrenden Fahrzeuge wurden der im Video dargestellten Fahrzeugposition und Geschwindigkeit angepasst (akustische Detailbeschreibung der verwendeten Geräusche siehe Kapitel 2.4.1 und Kapitel 2.4.2 für die Parkplatzsituation sowie Kapitel 2.5.1 und Kapitel 2.5.2 für die Anhaltesituation).

In jeder Sequenz wurde ein in realer Verkehrsumgebung aufgezeichnetes Hintergrundgeräusch präsentiert. Je 60 Darbietungen erfolgten mit leiserem Hintergrundgeräusch bei einem Schalldruckpegel von 49 dB (A) bzw. lauterem Hintergrundgeräusch von 55 dB (A). Bei der Hälfte der Situationen (60 von 120) wurde ein Störgeräusch (Distraktor) präsentiert. Es handelte sich dabei je zur Hälfte (je 30) um das Leerlauf- bzw. Motorstartgeräusch des Verbrennungsmotors. Hierdurch wurde die Situation eines zweiten akustisch wahrnehmbaren Fahrzeuges unter den sechs dargestellten Fahrzeugen erzeugt, wobei jedoch dieses zweite Fahrzeug nicht anfuhr, sondern im Leerlauf verblieb (akustisch und visuell stehend). Die Position dieses Störfahrzeuges wurde ebenfalls variiert. Aufgrund der ansonsten stark ansteigenden Anzahl notwendiger Situationen wurde die Position des Störgeräusches in Relation zur Position des anfahrenden Fahrzeuges unvollständig variiert. Es wurde allerdings darauf geachtet, dass eine gleichmäßige Verteilung zwischen rechts bzw. links benachbartem Störgeräusch vorlag. In einem Drittel der Fälle mit Störgeräusch (20 Situationen) wurde das neben dem anfahrenden Fahrzeug direkt benachbarte Fahrzeug als Distraktor verwendet. In je einem Sechstel der Situationen mit Störgeräusch (je 10 Situationen) betrug der Abstand zwischen anfahrendem Fahrzeug und Störfahrzeug zwei, drei, vier bzw. fünf Fahrzeuge.

### 3.1.3.2 Versuch Anhaltesituation

Gegenstand des Versuchsteils „Anhaltesituation“ waren Fahrzeuge, die aus Annäherung mit konstanter Geschwindigkeit von etwa 30 km/h an einem Fußgängerüberweg für den dort wartenden Fußgänger (Egoposition entsprechend Videoblickwinkel) anhalten (Bild 81). Aufgezeichnet wurden die Anhaltevorgänge mit den sechs verschiedenen Fahrzeugen (sechs Videoversionen), die auch im Teil „Parkplatzsituation“ Verwendung fanden. Zu-



**Bild 81:** Fahrzeugvarianten (Videoversionen) für die Anhaltesituation

sätzlich wurde die Durchfahrt von zwei Fahrzeugen aufgezeichnet, um für die Probanden eine gewisse Unsicherheit in der Situationsentwicklung zu bieten und die Motivation zur tatsächlichen Wahrnehmung aufrechtzuerhalten.

Mit diesem Videomaterial wurden unter Verwendung der akustischen Variation des Fahrzeuggeräusches und des Hintergrundgeräusches insgesamt 38 Untersuchungssituationen erzeugt. Dabei kamen die fünf Fahrzeuggeräusche E-Fahrzeug bei Fahrt, synthetisch erzeugtes Fahrgeräusch, synthetisch erzeugtes Fahrgeräusch mit synthetischem Leerlaufgeräusch, Verbrennungsmotor mit Leerlauf und Verbrennungsmotor mit Motorstopp zum Einsatz. Als Hintergrundgeräusch kamen die beiden oben beschriebenen Hintergrundgeräusche in je der Hälfte der Fälle zur Anwendung. Unter den insgesamt 38 Situationen befanden sich 30 Situationen mit anhaltendem Fahrzeug und in acht Situationen hielt das Fahrzeug visuell nicht an, es wurde jedoch das Geräusch eines anhaltenden Fahrzeuges verwendet (beide Verbrennungsmotorgeräusche zu gleichen Anteilen).

### 3.1.4 Verhaltensparameter

#### 3.1.4.1 Reaktionsverhalten

Die Aufgabe der Probanden bestand im Versuchsteil „Parkplatzsituation“ darin, die linke Taste einer am Probandensitz befindlichen Computermaus zu drücken, wenn sie das ausparkende Fahrzeug bemerken. Der für diese Bedienhandlung individuell präferierte Finger sollte auf oder unmittelbar neben der Taste liegen. Anschließend hatten sie dem Versuchsleiter mitzuteilen, um welches Fahrzeug in der Reihe es sich gehandelt hatte. Im Versuchsteil „Anhaltesituation“ bestand die Reaktionsaufforderung an die Probanden darin, die linke Maustaste zu drücken, sobald sie sich sicher waren, dass das ankommende Fahrzeug steht. In beiden Untersuchungsteilen sollten die Probanden so richtig und so schnell wie möglich reagieren.

Die Auswertung des Reaktionsverhaltens beinhaltete die beiden Parameter Reaktionsgeschwindigkeit und Reaktionsgüte. Die Reaktionsgeschwindigkeit ergab sich aus dem Zeitpunkt des Drückens der linken Maustaste und wurde für die Auswertung als relative Reaktionszeit in Beziehung zum Moment des gemeinten Ereignisses (tatsächlicher Bewegungsbeginn bzw. Stillstand des Fahrzeuges) gesetzt.

Die Reaktionsgüte ergab sich im Versuchsteil „Parkplatzsituation“ aus dem Vergleich zwischen dem vom Probanden als anfahrend benannten Fahrzeug mit dem tatsächlich im Video anfahrenen Fahrzeug. Im Anhalteversuch ergab sich die Reaktionsgüte indirekt aus der Reaktion des Probanden über die Maustaste. Wurde diese in einem Zeitfenster von weniger als 3 Sekunden vor oder nach dem tatsächlichen Halt eines Fahrzeuges gedrückt, wurde die Reaktion als richtig eingestuft. Erfolgte die Reaktion zu früh, zu spät oder bei einem durchfahrenden Fahrzeug, wurde dies als Fehler registriert.

#### 3.1.4.2 Blickverhalten

Bei der Blickregistrierung werden Abfolgen von Blickpositionen auf der Zielebene (hier die Projektionsfläche) in einem festen Zeitraster (hier 50 Hz, entsprechend einer Position alle 20 ms) aufgezeichnet. Die Blickpositionen wurden über ein berührungslos operierendes Blickregistrierungsgerät SMI RED der Firma SensoMotoric Instruments detektiert. Vor der Aufzeichnung jedes Probanden erfolgte eine Kalibrierung des Systems auf die individuellen Augenbewegungen und die Kopfposition in Relation zur präsentierten Projektion. Nach jeweils zehn Situationen erfolgte eine Nachkalibrierung zum Ausgleich eventueller Positionsveränderungen.

Die Auswertung der Positionenabfolge als Blickpfad ergibt in Abhängigkeit der daraus ermittelten Bewegungsgeschwindigkeit (Winkelgeschwindigkeit) die grundlegende Unterscheidung in Blicksprünge (Sakkaden) und Betrachtungen (Fixationen). Die visuelle Wahrnehmung erfolgt während der Fixationen, die bei bewegten Objekten auch langsame Folgebewegungen des betrachtenden Auges einschließen können. Während der Blicksprünge ist keine visuelle Wahrnehmung möglich (sakkadische Suppression), daher werden diese Anteile des Blickverhaltens in den nachfolgenden Auswertungen nicht berücksichtigt.

Um das Blickverhalten beschreiben und auswerten zu können, wurden Aufmerksamkeitsfelder (Area of Interest, AOI, farbig markierte Bereiche in Bild 82) in den präsentierten Videosequenzen codiert, die jeweils eine inhaltliche Bedeutung erfahren. Auf Basis dieser Aufmerksamkeitsbereiche ist das Auswertesystem in der Lage, das Blickverhalten diesen Bereich betreffend in Form von standardisierten Kennwerten auszugeben. Im Rahmen der Parkplatzsituation wurde jedes der jeweils sechs darge-



**Bild 82:** Aufmerksamkeitsfelder (AOI) in den untersuchten Situationen

stellten Fahrzeuge mit einem eigenen AOI kodiert. Für das anfahrende Fahrzeug wurde das Aufmerksamkeitsfeld in der Bewegung mitgeführt.

Beim Anhalteversuch wurden für jedes der dargestellten Fahrzeuge vier AOI angelegt. Es handelte sich dabei um den großen Bereich des gesamten Fahrzeuges ab dem Moment des Erscheinens sowie die drei Subbereiche Autofront, Fahrerfenster sowie linker Vorderreifen, die aufgrund der projizierten Größe erst ab einer Entfernung von ca. 30 m vor dem Halt angelegt wurden. Alle vier AOI wurden kontinuierlich in Größe, Position und Form dem sich annähernden Fahrzeug angepasst.

Als Blickverhaltensindikatoren wurden über alle oben beschriebenen Auswertebereiche (AOI) jeweils vier verschiedene Blickkennwerte ermittelt. Der Kennwert „Fixations Count“ beinhaltet die Anzahl der Fixationen (räumliche Einzelbetrachtungen) innerhalb des jeweiligen Fahrzeuges bzw. Fahrzeugdetails und gibt somit Aufschluss über die Betrachtungshäufigkeit. Der zweite Parameter „Net Dwell Time“ gibt die Verweildauer des Blickes auf dem jeweiligen Fahrzeug/Detail an und kennzeichnet somit die Betrachtungsintensität.

Als dritter Kennwert wurde die Anzahl der Blicke zum jeweiligen AOI ausgewertet. Dieser Parameter gibt Aufschluss darüber, wie häufig der Blick von anderen Positionen außerhalb des jeweiligen Fahr-

zeuges bzw. Fahrzeugdetails zu diesem zurückkehrt. Als vierter und letzter Parameter wurde schließlich die „Entry Time“ ausgewertet. Diese gibt die Dauer zwischen dem Start der Sequenz und der ersten Blickzuwendung auf das jeweilige Fahrzeug bzw. Detail an.

## 3.2 Ergebnisse Parkplatzsituation

### 3.2.1 Ergebnisübersicht Reaktionsverhalten

#### 3.2.1.1 Reaktionsgüte

Das Reaktionsverhalten gliedert sich in Reaktionsgüte und Reaktionsgeschwindigkeit. Für die Auswertungen des Reaktionsverhaltens wurden die Reaktionen von  $N = 40$  normalsichtigen Probanden ( $Visus \geq 0,9$ ) und  $N = 13$  nicht normalsichtigen Probanden ( $V < 0,6$ ) herangezogen. Somit sind zwei Personen nicht in die Auswertungen eingegangen und es werden die Ergebnisse für die verbleibenden 53 Personen berichtet. Eine Person mit erheblichen, nicht nur visuell begründeten Orientierungsproblemen und eine blinde Person gänzlich ohne visuelle Wahrnehmung wurden für die nachfolgend berichteten Auswertungen ausgeschlossen.

Über alle Probanden wird eine sehr hohe Reaktionsgüte erreicht. Unter den insgesamt 6.360 abgegebenen Antworten zur Position des anfahrenden Fahrzeuges befanden sich 53 falsche Einschätzungen (99,2 % richtige Antworten). Die Mehrheit der falschen Antworten (41 von 53) wurde von nicht normalsichtigen Probanden gegeben. Somit ergibt sich ein Fehleranteil von 2,6 % unter den nicht normalsichtigen Probanden (0,3 % unter den normalsichtigen Personen). Es zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Reaktionsgüte und dem Sehvermögen.

An dieser Stelle ist der Zusammenhang der verschiedenen Bedingungen und Variablen mit der Reaktionsgüte von Interesse. Hierzu kann eine direkte Gegenüberstellung der richtigen mit den falschen Antworten unter Berücksichtigung der Untersuchungsbedingungen jedoch nicht erfolgen, da aufgrund der großen Mengenungleichheit der beiden Gruppen inferenzstatistische Aussagen (Signifikanztest) zu keinen belastbaren Aussagen führen. Um dennoch Hinweise auf Einflüsse ableiten zu können, werden nachfolgend die Zusammenhänge der wenigen falschen Reaktionen mit den experimentell variierten Bedingungen sowie den weiteren Personenvariablen berichtet.

### 3.2.1.2 Analyse der falschen Reaktionen

Die Mehrheit der beobachteten falschen Antworten entfällt auf zwei nicht normalsichtige männliche Probanden mit stark reduziertem Sehvermögen ( $Visus < 0,1$ ). Diese beiden Probanden gaben 35 der 53 falschen Antworten (66 %). Bei den übrigen Fehlern handelt es sich im Wesentlichen um individuelle Einzelereignisse (ein oder zwei Fehler pro Versuchsperson). Aus diesem Grund sind verallgemeinernde Interpretationen der nachfolgend berichteten Zusammenhänge nicht umfassend belastbar.

Es zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Fahrzeugposition ( $X^2 = 22,283$ ,  $df = 5$ ,  $N = 53$ ,  $p < 0,001$ ). Dabei ist die Position „rechts 2“, somit das mittlere der drei auf der rechten Seite gezeigten Fahrzeuge, gegenüber allen anderen Positionen auffällig. Auf diese Fahrzeugposition entfallen 21 der insgesamt 53 Fehler (40 %), während sich im Vergleich dazu die restlichen Fehler gleichmäßig auf die übrigen fünf Fahrzeugpositionen verteilen. In der Mehrheit der 21 auf diese Fahrzeugposition entfallenden Fehler wurde von nicht normalsichtigen Probanden fälschlicherweise das Fahrzeug rechts außen (rechts 3) als anfahrendes Fahrzeug angegeben.

Weiterhin zeigt sich ein hoch signifikanter Zusammenhang der Reaktionsgüte mit dem Geschlecht ( $X^2 = 25,825$ ,  $df = 1$ ,  $N = 53$ ,  $p < 0,001$ ). Fehlerhafte Antworten wurden zu über 92 % (49 von 53) von männlichen Probanden gegeben.

Es ergeben sich keine signifikanten Unterschiede in der Fehlerverteilung hinsichtlich der Merkmale Videoversion, Fahrzeuggeräusch, Hintergrundgeräusch und Distraktor (Störgeräusch). Rein deskriptiv zeigt sich eine kleinere Häufung der Fehler bei der Geräuschbedingung „Elektrofahrzeug bei Fahrt“ (Bild 83), die jedoch im Kontext der Gesamtverteilung aller Fahrzeuggeräusche keine signifikante Auffälligkeit darstellt ( $X^2 = 4,075$ ,  $df = 4$ ,  $N = 53$ ,  $p = 0,396$ ).

Auch die Bedingung mit Störgeräusch zeigt eine deskriptive Häufung (Bild 84), die knapp außerhalb der inferenzstatistischen Bedeutsamkeitsgrenze einzuordnen ist ( $X^2 = 3,189$ ,  $df = 1$ ,  $N = 53$ ,  $p = 0,074$ ).

### 3.2.1.3 Reaktionsgeschwindigkeit

Für die Auswertungen zur Reaktionszeit wurden die Reaktionen mit richtiger Antwort herangezogen. Die

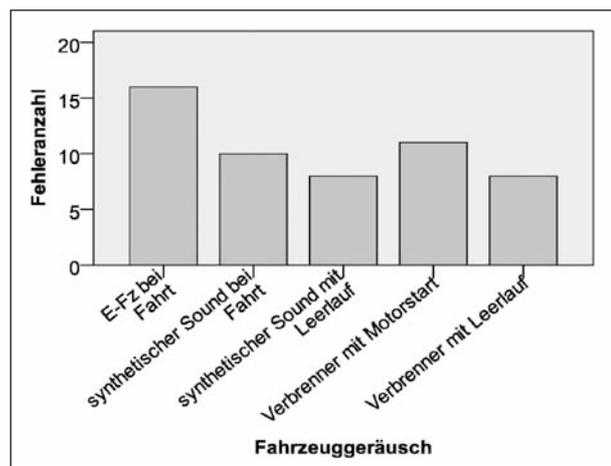


Bild 83: Fehler in Parkplatzsituation in Abhängigkeit vom Fahrzeuggeräusch

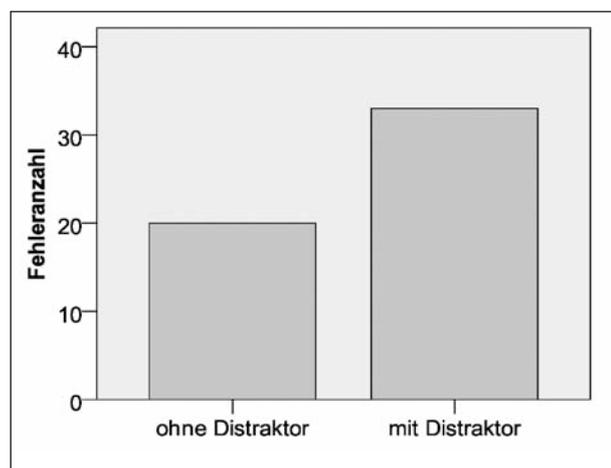


Bild 84: Fehler in Parkplatzsituation in Bezug zur Ablenkung (Störgeräusch)

Reaktionszeit wurde relativ zum Zeitpunkt des Anfahrens ermittelt. Der Mittelwert über alle Probanden betrug 0,61 s (Standardabweichung 0,53 s). Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied der Reaktionszeit in Abhängigkeit des Sehvermögens (t-Test,  $p < 0,001$ ). Nicht normalsichtige Probanden zeigten bei gruppenbezogen größerer Heterogenität (größere Standardabweichung) mit im Mittel 1,3 s eine um rund 0,9 s höhere Reaktionszeit als normalsichtige Probanden (MW 0,4 s). Auf Basis dieser Unterschiede wird nachfolgend das Reaktionsverhalten dieser beiden Probandengruppen getrennt analysiert.

Für beide Probandengruppen wurde anhand einer linearen Regression (inkl. Varianzanalyse als inferenzstatistischer Test auf Bedeutsamkeit der Abweichungen der Modellgüte) eine komplexe Modellbildung in zwei Varianten durchgeführt. Immer wurden als Prädiktorenpool die sieben Variablen

Fahrzeuggeräusch, Hintergrundgeräusch, Distraktor (Störgeräusch), Fahrzeugposition, Videoverision, Alter und Geschlecht herangezogen. Beide Varianten (schrittweise Aufnahme und schrittweise Eliminierung von Modellvariablen) erbrachten in den Probandengruppen jeweils identische Ergebnisse.

Für die normalsichtigen Probanden zeigte sich ein signifikanter Vorhersagebeitrag auf die Reaktionszeiten durch die Einflussvariablen Fahrzeuggeräusch, Hintergrundgeräusch, Fahrzeugposition, Geschlecht und Alter ( $F = 103,889$ ;  $p < 0,001$ ). Diesen Variablen kann somit im komplexen Zusammenwirken aller Versuchsbedingungen ein signifikanter Zusammenhang zur Reaktionszeit zugeschrieben werden. Die Hinzunahme der Variablen Distraktor und Situation verbesserte die Modellgüte nicht signifikant.

Für nicht normalsichtige Probanden zeigte sich auf die Reaktionszeiten ein signifikanter Vorhersagebeitrag durch die Einflussvariablen Fahrzeuggeräusch, Fahrzeugposition, Geschlecht und Alter ( $F = 41,651$ ;  $p < 0,001$ ). Die Variablen Hintergrundgeräusch, Distraktor und Situation verbesserten die Modellgüte in dieser Probandengruppe nicht signifikant.

Alle Modelle erreichen einen nur mäßigen Erklärungsumfang. Die Varianzaufklärung beträgt knapp 10% der beobachteten Reaktionszeitunterschiede (korr.  $R^2 = 0,097$  für alle Modelle). Der weitaus größte Anteil der Reaktionszeit unterliegt somit zufälligen oder nicht durch lineare Kombination der Variablenausprägungen abgebildeten Einflüssen.

### 3.2.2 Ergebnisübersicht Blickverhalten

Von 44 Probanden konnten vollständig auswertbare Blickverhaltensdaten erhoben werden. Dabei wurden insgesamt 41.313 Fixationen auf 29.094 Objekte aufgezeichnet. Die Bandbreite der Fixationen je Fahrzeug schwankte zwischen 0 und 15, wobei dasselbe Fahrzeug zwischen 0- und bis zu 6-mal erneut betrachtet wurde, nachdem der Blick zwischenzeitlich an einem anderen Ort weilte. Somit ergibt sich eine durchschnittliche Betrachtungshäufigkeit (Anzahl an Fixationen) von 1,42 Blicken je Fahrzeug. Die anfahrenen Fahrzeuge wurden mit 1,64 Blicken je Fahrzeug im Durchschnitt häufiger angesehen als die nicht anfahrenen Fahrzeuge (1,24 Blicke je Fahrzeug).

Neben der Betrachtungshäufigkeit wurde die Intensität der Betrachtung zusätzlich anhand der jeweiligen Fixationsdauer (Gesamtbetrachtungsdauer eines Fahrzeuges) untersucht. Dadurch sollte primär die Betrachtungsintensität der tatsächlich angeschauten Fahrzeuge näher beschrieben werden. Entsprechend wurden nur Werte berücksichtigt, wenn eine Fixation erfolgt war. Die mittlere Gesamtbetrachtungsdauer je Fahrzeug betrug 0,99 s (Standardabweichung 0,78 s). Die anfahrenen Fahrzeugen wurden vergleichbar lange angeschaut mit  $MW = 0,97$  s (STD = 0,75 s).

Als weiterer Parameter wurde die Dauer bis zur ersten Betrachtung eines Fahrzeuges ausgewertet. Auch hierfür wurden nur die tatsächlich angeschauten Fahrzeuge berücksichtigt, da andernfalls nicht zwischen „Nichtbetrachtung“ und „erster Betrachtung direkt bei Präsentationsbeginn“ unterschieden werden könnte. Entsprechend wurden Zeitspannen bis zur ersten Betrachtung zwischen 0 und 7 s aufgezeichnet. Die mittlere Dauer bis zur ersten Betrachtung eines Fahrzeuges betrug 1,3 s (Standardabweichung 1,2 s). Die mittlere Dauer bis zur Betrachtung eines anfahrenen Fahrzeuges war etwas länger und betrug 1,7 s (Standardabweichung 1,4 s). Das kann durch die Merkmale des typischen Blickverhaltens in Zusammenhang mit den Experimentmerkmalen erklärt werden. Anfahrende Fahrzeuge wurden in ihrer Position über alle sechs möglichen Positionen gleichmäßig verteilt dargeboten. Die typische Blickstrategie begann jedoch mit zentralen Blicken und konzentrierte sich auf die mittleren Fahrzeuge, die in der Mehrheit der Durchgänge nicht die anfahrenen Fahrzeuge waren. So ergibt sich eine kürzere mittlere Dauer bis zur ersten Betrachtung bei nicht anfahrenen Fahrzeugen.

Unter den Probanden befanden sich 38 normalsichtige und sechs nicht normalsichtige Personen. Diese sechs nicht normalsehenden Probanden waren zwischen 23 und 52 Jahre alt (Mittelwert 40 Jahre). Es befanden sich je drei Frauen und Männer in dieser Gruppe, die eine Sehschärfe im Bereich  $0,032 \leq V \leq 0,4$  aufwiesen, wobei die Männer unter stärkeren Beeinträchtigungen des Sehvermögens litten als die Frauen dieser Gruppe (Visus der Männer im Mittel um eine logarithmische Sehschärfestufe geringer).

Unterschiede im Blickverhalten zeigten sich bereits bei einer ersten Betrachtung der beiden Probandengruppen. Die Probanden mit eingeschränktem

Sehvermögen zeichneten sich durch mehr Fixationen aus. Dieser Umstand kann als Bestandteil von Kompensationsbemühungen der visuellen Einschränkungen interpretiert werden und geht mit den, wie oben berichtet, längeren Reaktionszeiten einher. Während die normalsichtigen Probanden im Mittel 1,40 Blicke je tatsächlich betrachtetem Fahrzeug aufwiesen, betrug dieser Wert bei den nicht normalsichtigen Personen 1,52.

Bei der Betrachtungsdauer nicht anfährender Fahrzeuge bestanden keine Unterschiede in Bezug zum Sehvermögen. Allerdings betrachteten die nicht normalsichtigen Probanden anfährende Fahrzeuge etwas länger (MW = 1,08 s, STD = 0,70 s), als es die normalsichtigen Personen (MW = 0,96 s, STD = 0,75 s) taten.

Die anfährenden Fahrzeuge wurden im Durchschnitt von beiden Gruppen später erstmals betrachtet als nicht anfährende Fahrzeuge. Dieser Effekt ist bei den nicht normalsichtigen Personen deutlicher ausgeprägt (MW 2,0 s bis zur ersten Fixation) als bei den normalsichtigen Probanden (MW 1,6 s bis zur ersten Fixation).

Auf Basis dieser Ergebnisse sowie inhaltlicher Erwägungen erfolgte die weitere Auswertung des Blickverhaltens für diese beiden Gruppen getrennt.

Der globale Einfluss der Versuchs- und Personenvariablen auf das Blickverhalten wurde zunächst im Rahmen einer komplexen Modellbetrachtung (lineare Regression/ANOVA, analog des oben geschilderten Vorgehens bzgl. der Reaktionsgeschwindigkeit) anhand der beiden Parameter Intensität (Gesamtbetrachtungsdauer) und Dauer bis zur ersten Fixation untersucht. Dabei wurden die anfährenden Fahrzeuge zugrunde gelegt.

Für die normalsichtigen Probanden zeigte sich im komplexen Zusammenwirken ein signifikanter Vorhersagebeitrag auf die Gesamtbetrachtungsdauer der anfährenden Fahrzeuge durch die Einflussvariablen Fahrzeuggeräusch, Distraktor (Störgeräusch), Fahrzeugposition und Videoverision ( $F = 17,360$ ;  $p < 0,001$ ). Die Hinzunahme der Variablen Hintergrundgeräusch, Geschlecht und Alter verbesserte die Modellgüte nicht signifikant.

Auf die Dauer bis zur Betrachtung der anfährenden Fahrzeuge zeigte sich für die normalsichtigen Probanden ein signifikanter Vorhersagebeitrag durch die Einflussvariablen Fahrzeuggeräusch, Alter und Geschlecht ( $F = 4,789$ ;  $p = 0,002$ ). Die Hinzunahme

der Variablen Hintergrundgeräusch, Distraktor (Störgeräusch), Fahrzeugposition und Videoverision verbesserte die Modellgüte nicht signifikant. Für nicht normalsichtige Probanden zeigte sich auf die Gesamtbetrachtungsdauer der anfährenden Fahrzeuge ein signifikanter Vorhersagebeitrag durch die Einflussvariablen Fahrzeuggeräusch, Distraktor (Störgeräusch), Fahrzeugposition, Videoverision und Alter ( $F = 7,083$ ;  $p < 0,001$ ). Die Variablen Hintergrundgeräusch und Geschlecht verbesserten die Modellgüte in dieser Probandengruppe nicht signifikant. Auf die Dauer bis zur Betrachtung der anfährenden Fahrzeuge zeigte sich für die nicht normalsichtigen Probanden ein signifikanter Vorhersagebeitrag durch die Einflussvariablen Fahrzeuggeräusch, Alter und Geschlecht ( $F = 20,188$ ;  $p < 0,001$ ). Die Hinzunahme der Variablen Hintergrundgeräusch, Distraktor (Störgeräusch), Fahrzeugposition und Videoverision verbesserte die Modellgüte nicht signifikant.

In Zusammenfassung kann im komplexen Zusammenwirken für alle Variablen mit Ausnahme des Hintergrundgeräusches ein signifikanter Einfluss auf das Blickverhalten bezüglich der anfährenden Fahrzeuge begründet werden, der sich jedoch nach Parameter und Personengruppe in wechselnden Verhältnissen und verschiedenem Umfang darstellt. Zudem erreichen alle vier beschriebenen Modelle einen nur geringen Erklärungsumfang. Die Varianzaufklärung beträgt zwischen einem und elf Prozent der beobachteten Zeitunterschiede in Betrachtungsdauer bzw. Dauer bis zur ersten Fixation. Der weitaus größte Anteil der Parametervarianz unterliegt somit zufälligen oder nicht durch lineare Kombination der Variablenausprägungen abgebildeten Einflüssen.

Daher werden in den nachfolgenden Unterkapiteln die Einzeleffekte der Untersuchungsvariablen isoliert betrachtet.

### 3.2.3 Einfluss des Fahrzeuggeräusches

Es zeigt sich ein sehr signifikanter Einfluss der Art des Fahrzeuggeräusches auf die Reaktionszeit. Das trifft sowohl auf die normalsichtigen (ANOVA,  $F = 50,777$ ;  $p < 0,001$ ) als auch nicht normalsichtigen Probanden zu (ANOVA,  $F = 14,656$ ;  $p < 0,001$ ). Der Vergleich zwischen den Fahrzeuggeräuscharten zeigt in beiden Probandengruppen identische Binnenstrukturen, die sich jeweils als die beiden Cluster 1. „E-Fz bei Fahrt/synthetischer Sound bei

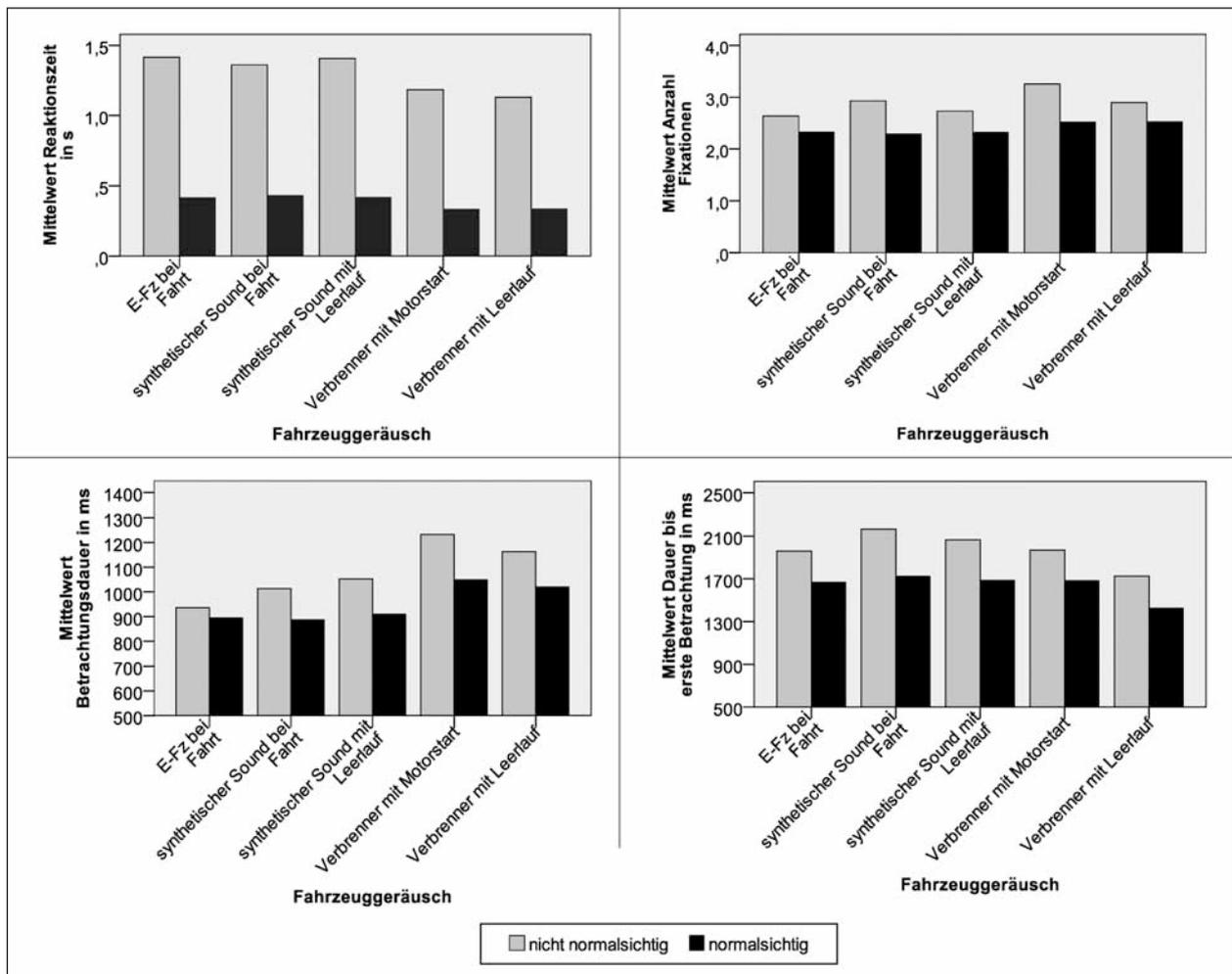


Bild 85: Reaktionszeit und Blickverhalten in Auswertung nach Fahrzeuggeräusch (Parkplatzsituation)

Fahrt/synthetischer Sound mit Leerlauf“ sowie 2. „Verbrenner mit Motorstart/Verbrenner mit Leerlauf“ darstellen (Post-hoc-Test; hier Dunnett-T3, da Levene-Test inhomogene Varianzen anzeigt). Signifikante Reaktionszeitunterschiede bestehen zwischen diesen beiden Clustern ( $p \leq 0,002$ ), nicht jedoch zwischen den Fahrzeuggeräuschen innerhalb des jeweiligen Clusters ( $p \geq 0,669$ ).

Somit reagieren sowohl normalsichtige als auch nicht normalsichtige Probanden bei beiden Verbrennergeräuschen signifikant um 15-20 % schneller als bei den anderen drei Fahrzeuggeräuschvarianten (Bild 85). Zudem besteht sowohl für die normalsichtigen als auch nicht normalsichtigen Probanden ein signifikanter Einfluss der Geräusche auf die Betrachtungsdauer der anfahrenden Fahrzeuge. Anfahrende Fahrzeuge werden mit Verbrennungsmotorgeräusch signifikant länger angeschaut als mit den anderen Geräuschen (ANOVA,  $p \leq 0,032$ ). Schließlich werden anfahrende Fahrzeuge mit dem Geräusch „Verbrenner im Leerlauf“

früher betrachtet als alle anderen anfahrenden Fahrzeuge. Dieser Effekt weist für die normalsichtigen Probanden eine statistische Bedeutsamkeit auf (ANOVA,  $F = 4,493$ ;  $p = 0,001$ ), bei den nicht normalsichtigen Personen ist der Unterschied deskriptiv äquivalent sichtbar, erreicht jedoch die statistische Signifikanzgrenze nicht (siehe auch Anhang).

### 3.2.4 Einfluss des Hintergrundgeräusches

Die Lautstärke des Hintergrundgeräusches zeigt signifikante Zusammenhänge mit der Reaktionsgeschwindigkeit bei den normalsichtigen Versuchspersonen (t-Test,  $F = 32,322$ ,  $p < 0,001$ ), nicht aber den sehbehinderten Probanden (t-Test,  $F = 1,469$ ,  $p = 0,226$ ). Deskriptiv reagierten die nicht normalsichtigen Probanden bei lauterem Hintergrundgeräusch etwas später, die normalsichtigen Personen jedoch etwas früher (Bild 86). Beide Probandengruppen zeigen

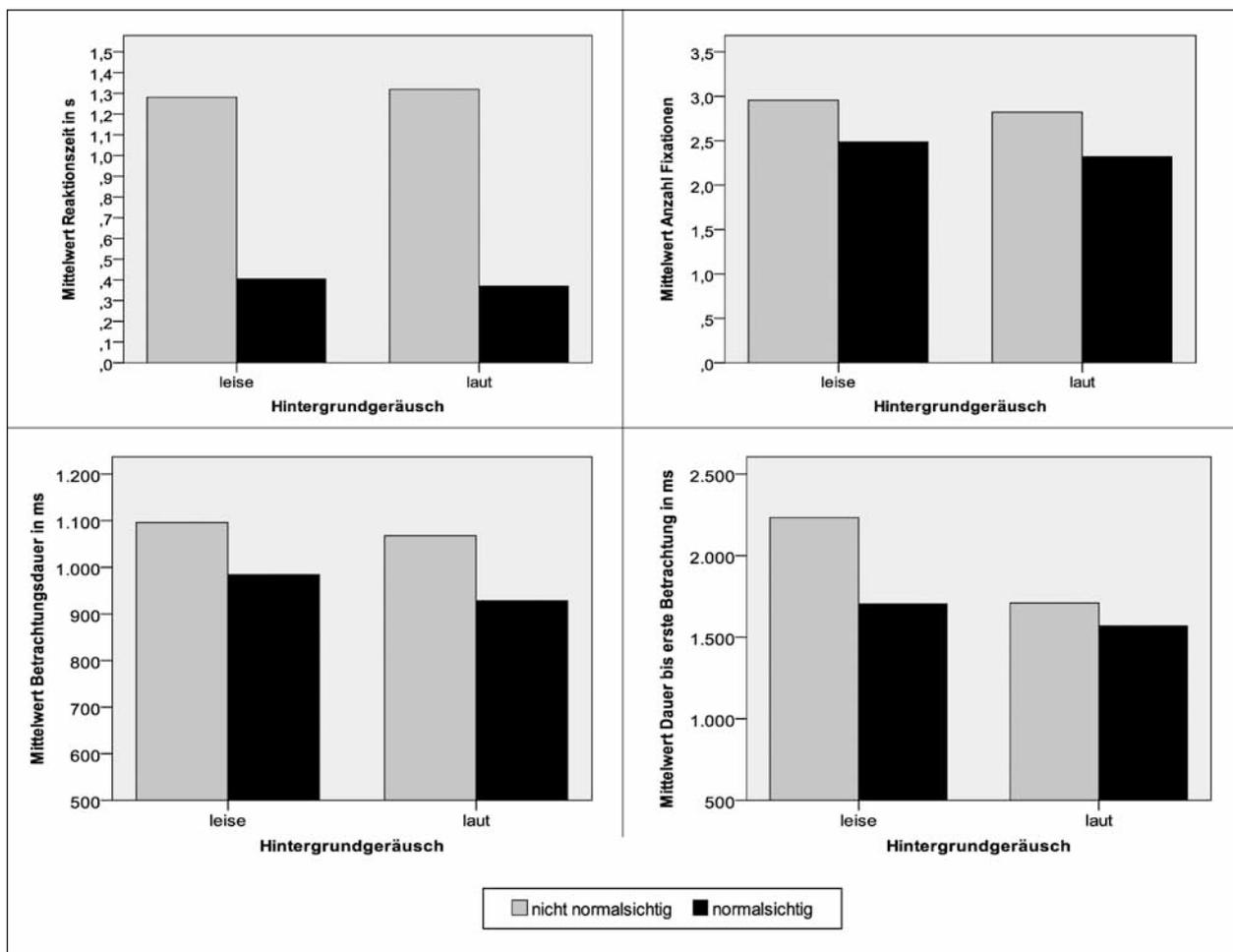


Bild 86: Reaktionszeit und Blickverhalten in Auswertung nach Hintergrundgeräusch (Parkplatzsituation)

deskriptiv eine weniger intensive Betrachtung der anfahrenden Fahrzeuge bei lauterem Hintergrund, wobei dieser Unterschied nur für die normalsichtigen Personen statistisch bedeutsam ist (t-Test,  $F \geq 4,181$ ,  $p \leq 0,041$ ). Sowohl normalsichtige als auch sehbehinderte Probanden zeigten bei lauterem Hintergrundgeräusch eine signifikant frühere Zuwendung zum anfahrenden Fahrzeug (t-Test,  $F \geq 7,090$ ,  $p \leq 0,008$ ).

### 3.2.5 Einfluss des Störgeräusches

Der im Detail betrachtete Einfluss des Störgeräusches umfasste die drei Dimensionen Vorhandensein eines Distraktorgeräusches, Art des Distraktorgeräusches (Leerlauf vs. Motorstart) sowie Abstand des Distraktorfahrzeuges zum anfahrenden Fahrzeug. In Mittelung über alle Ausprägungsstufen der Detailmerkmale (beide Geräuscharten und alle Abstände), also unabhängig von den Detailmerkmalen,

zeigt sich für beide Probandengruppen ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein eines Störgeräusches und dem Blickverhalten (Bild 87). Ist ein Störgeräusch vorhanden, werden die anfahrenden Fahrzeuge von normalsichtigen (t-Test,  $F = 11,543$ ,  $p = 0,001$ ) und nicht normalsichtigen (t-Test,  $F = 6,462$ ,  $p = 0,011$ ) Probanden weniger intensiv angeschaut (siehe auch Anhang). Auf die Reaktionsgeschwindigkeit findet sich in beiden Gruppen kein globaler Effekt des Störgeräusches unabhängig von seinen konkreten Merkmalen. Als Störgeräusch kamen die beiden Verbrennungsmotorgeräusche „Leerlauf“ und „Motorstart“ zur Anwendung. Sowohl normalsichtige (ANOVA,  $F = 14,216$ ,  $p < 0,001$ ) als auch sehbehinderte Probanden (ANOVA,  $F = 5,461$ ,  $p = 0,005$ ) betrachteten die anfahrenden Fahrzeuge signifikant weniger intensiv, nur wenn „Motorstart“ als Distraktorgeräusch auftrat (Bild 88). Ein statistisch bedeutsamer Zusammenhang mit der Reaktionsgeschwindigkeit zeigte sich nicht (ANOVA,  $F \leq 0,853$ ,  $p \geq 0,426$ ).

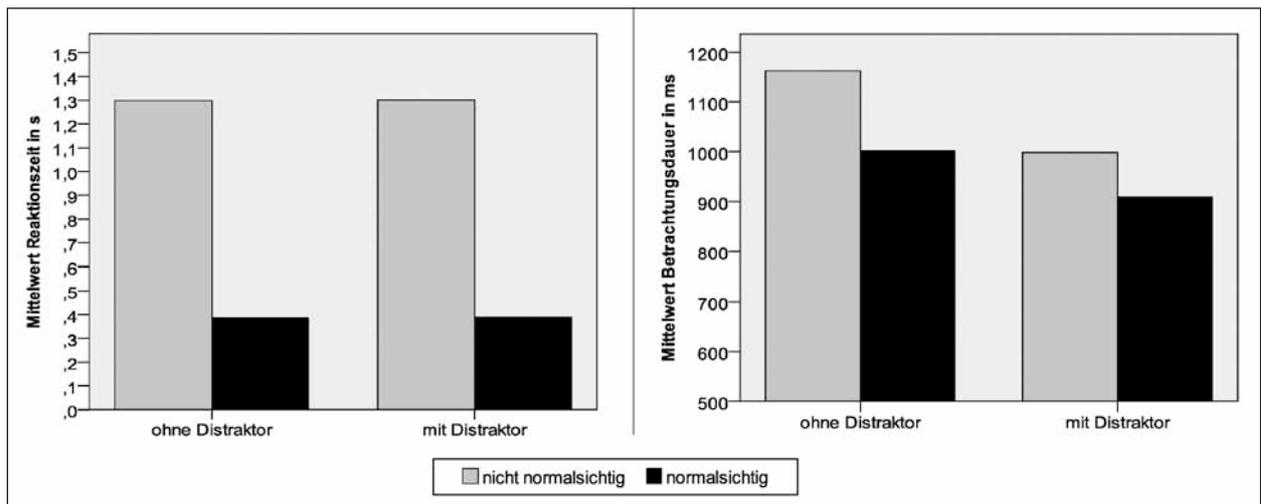


Bild 87: Reaktionszeit und Betrachtungsdauer in Auswertung nach Störgeräusch

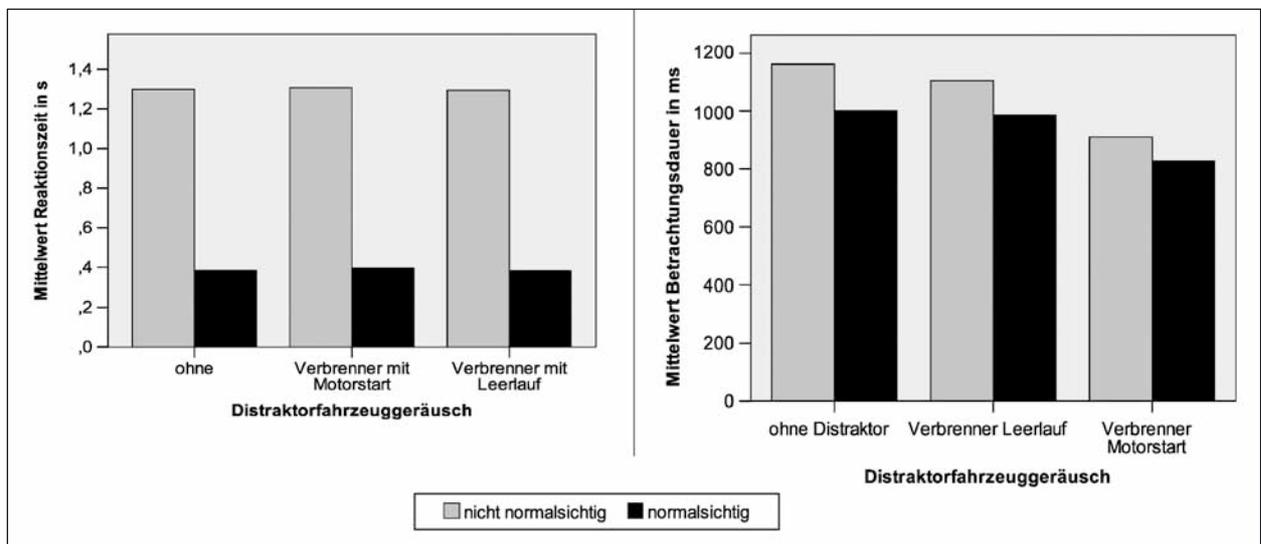


Bild 88: Reaktionszeit und Betrachtungsdauer in Auswertung nach Art des Störgeräusches

Den bedeutsamsten Zusammenhang mit dem Reaktions- und Wahrnehmungsverhalten zeigte der Abstand des Störgeräusches (ANOVA,  $F \geq 6,415$ ,  $p < 0,001$ ), wobei sich die Effekte bei den normalsichtigen und sehbehinderten Probanden qualitativ ähnlich darstellten (Bild 89). Ist das direkt benachbarte Fahrzeug der Distraktor (Distraktorabstand ein Fahrzeug), senkt diese vermeintliche Ablenkung die Reaktionszeit, verglichen mit der Bedingung „ohne Störgeräusch“, in beiden Probandengruppen signifikant. Die Ablenkungswirkung wird vom Hinweischarakter überlagert und das Störgeräusch wirkt somit als Hinweisreiz. Ab einem Distraktorabstand von zwei Fahrzeugen überwiegt dann die Ablenkungswirkung und nimmt im realisierten Abstandsbereich mit steigendem

Abstand weiter zu. Hierdurch werden die anfahrensden Fahrzeuge immer später und weniger intensiv angeschaut. Dieser Einfluss ist so bedeutsam, dass er auch in steigenden Reaktionszeiten sichtbar wird.

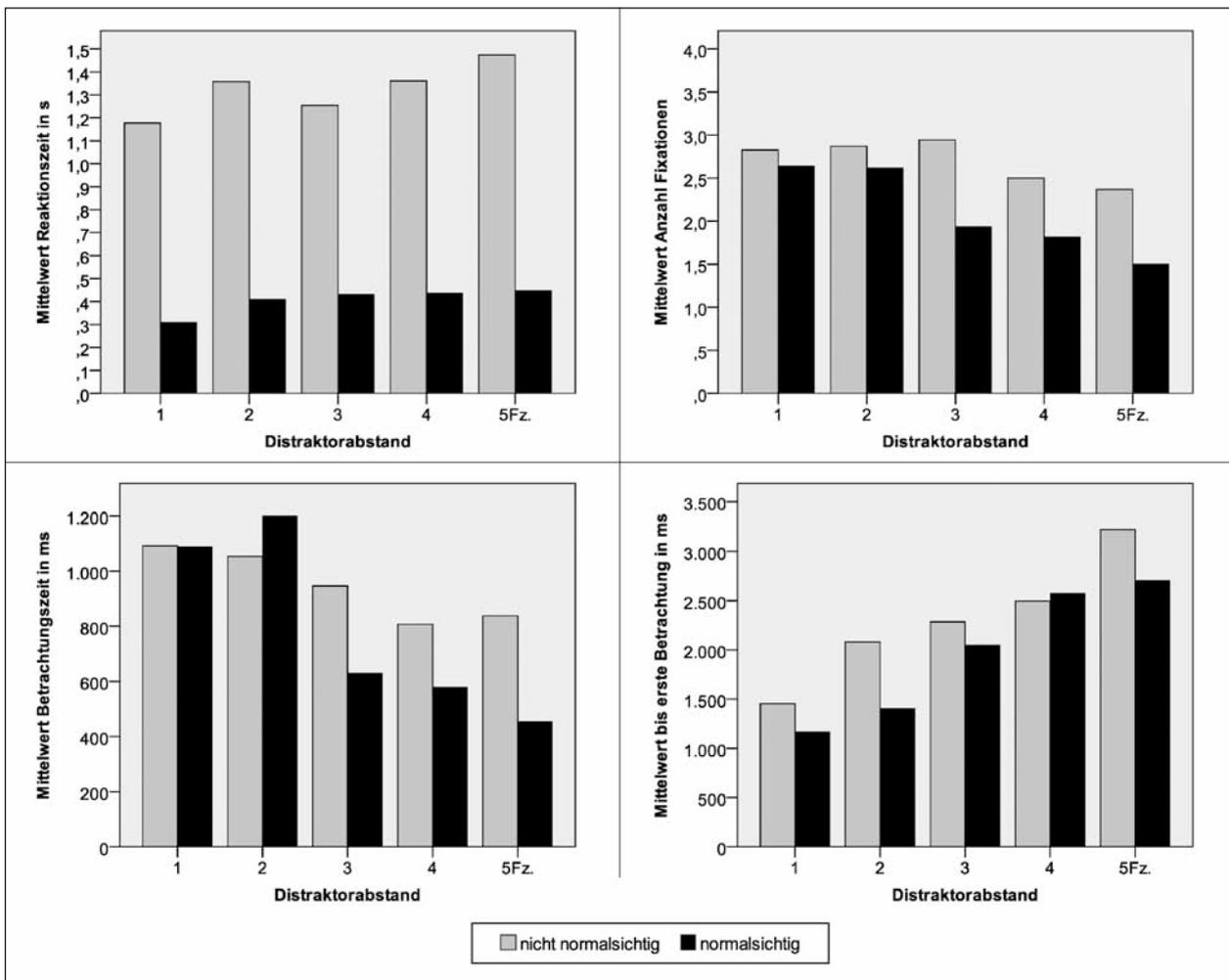


Bild 89: Reaktionszeit und Blickverhalten in Auswertung nach Position des Störgeräusches

### 3.2.6 Einfluss weiterer Versuchsmerkmale

#### 3.2.6.1 Alter

Um den Zusammenhang zwischen dem Alter und dem Reaktions- und Wahrnehmungsverhalten gezielter untersuchen und angemessener bewerten zu können, wurden die Mittelwerte der Verhaltensparameter je Personen als Betrachtungsgrundlage verwendet. Der im untersuchten Probandenkollektiv gefundene Einfluss des Alters ist insgesamt als gering zu bewerten. Es zeigt sich ein mäßig positiver Zusammenhang mit der Reaktionsgeschwindigkeit bei den normalsichtigen Probanden ( $r = 0,40$ ;  $p = 0,01$ ). Mit steigendem Alter gehen im Mittel leicht steigende Reaktionszeiten einher. Unter den sehbehinderten Probanden findet sich kein solcher Zusammenhang ( $p = 0,666$ ). Weiterhin zeigen sich in keiner Gruppe signifikante Zusammenhänge zwischen Alter und Blickverhalten.

#### 3.2.6.2 Geschlecht

Geschlechterunterschiede finden sich in der Reaktionszeit beider Gruppen, deutlicher jedoch bei den nicht normalsichtigen Probanden (vgl. Bild 90).

Unter den sehbehinderten Testpersonen zeigten Frauen hoch signifikant geringere Reaktionszeiten (t-Test,  $F = 29,425$ ,  $p < 0,001$ ). Dieser Effekt kann jedoch nicht unabhängig vom im Mittel stärker eingeschränkten Sehvermögen bei den männlichen nicht normalsichtigen Probanden bewertet werden. Diese wiesen gegenüber den sehbehinderten Frauen im Mittel einen um eine logarithmische Sehschärfestufe geringeren Visus auf, sodass verallgemeinernde Interpretationen nicht begründet werden können.

Bei den normalsichtigen Personen weist der signifikante Reaktionszeitunterschied zwischen den

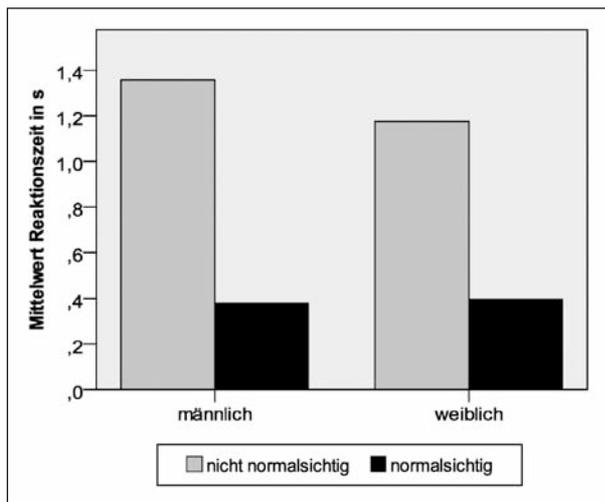


Bild 90: Reaktionszeit nach Geschlecht (Parkplatzsituation)

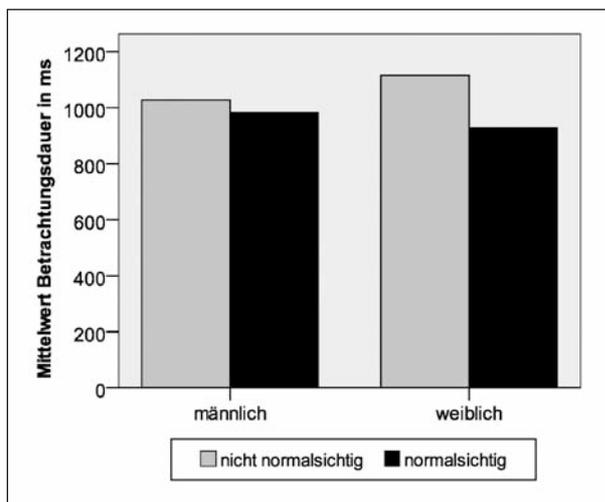


Bild 91: Betrachtungsdauer anfahrnder Fahrzeuge nach Geschlecht (Parkplatzsituation)

Geschlechtern in die andere Richtung (t-Test,  $F = 6,806$ ,  $p = 0,009$ ) und fällt auch deutlich geringer aus. Dieser Befund korrespondiert mit dem Blickverhalten. Bei den normalsichtigen Probanden betrachten Frauen anführende Fahrzeuge etwas kürzer (t-Test,  $F = 3,929$ ,  $p = 0,048$ ) (vgl. Bild 91).

### 3.2.6.3 Fahrzeugposition

Für die Versuche wurden sechs Fahrzeuge nebeneinander dargestellt, von denen jeweils eines an einer der verschiedenen Positionen anfuhr. Die Reaktionszeiten sowohl der normalsichtigen als auch sehbehinderten Probanden unterschieden sich hoch signifikant in Abhängigkeit von der Position des anführenden Fahrzeuges (ANOVA,  $F \geq 13,354$ ,  $p < 0,001$ ).

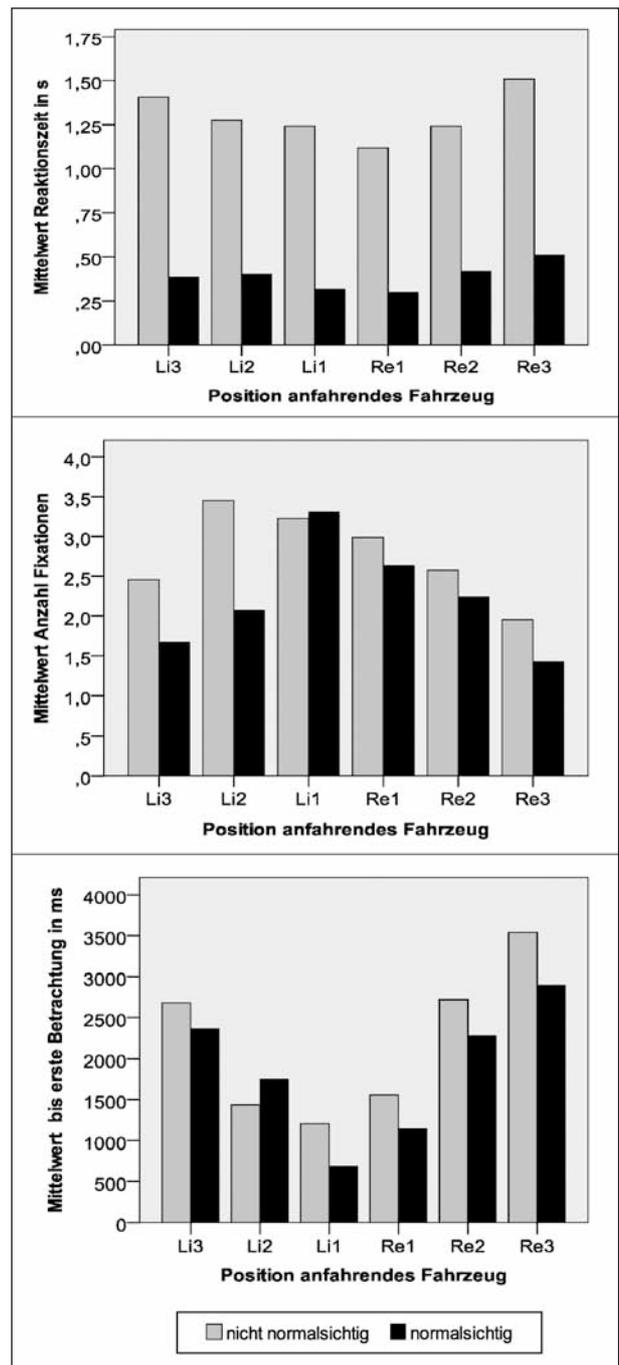


Bild 92: Reaktionszeit und Blickverhalten in Auswertung nach Position des anführenden Fahrzeuges

Dabei erfolgte die Reaktion auf periphere Fahrzeuge stets langsamer als auf zentrale Fahrzeuge (Bild 92). Hierbei zeigte sich in beiden Probandengruppen ein enger und hoch signifikanter Zusammenhang mit allen Parametern des Blickverhaltens (ANOVA,  $F \geq 6,456$ ,  $p < 0,001$ ). Die peripher anführende Fahrzeuge wurden später und weniger intensiv angeschaut.

### 3.3 Ergebnisse Anhaltesituation

#### 3.3.1 Ergebnisübersicht Reaktionsverhalten

##### 3.3.1.1 Reaktionsgüte

Das Reaktionsverhalten gliedert sich auch in diesem Untersuchungsteil in Reaktionsgüte und Reaktionsgeschwindigkeit. Es standen als Rohwerte je 38 Reaktionen von 55 Versuchspersonen zur Verfügung. Für die Auswertungen des Reaktionsverhaltens wurden die Reaktionen von  $N = 40$  normalsichtigen Probanden ( $Visus \geq 0,9$ ) und 13 nicht normalsichtigen Probanden ( $V < 0,6$ ) herangezogen. Somit sind zwei Personen nicht in die Auswertungen eingegangen. Eine Person mit erheblichen, nicht nur visuell begründeten Orientierungsproblemen und eine blinde Person gänzlich ohne visuelle Wahrnehmung wurden für die nachfolgend berichteten Auswertungen ausgeschlossen. Es werden die Ergebnisse für die verbleibenden 53 Personen berichtet.

Über alle Probanden wird eine noch höhere Reaktionsgüte erreicht als beim Parkplatzversuch. Unter den insgesamt 2.014 abgegebenen Antworten zu den haltenden oder nicht haltenden Fahrzeugen befanden sich vier falsche Einschätzungen (99,8 % richtige Antworten). Es zeigt sich ein Zusammenhang der Reaktionsgüte mit den seltener präsentierten Durchfahrten (8 je Proband) verglichen mit den Anhaltesituationen (30 je Proband). Von den 1.590 Anhaltesituationen wurde nur eine nicht korrekt erkannt, bei der eine normalsichtige Person wahrscheinlich aus Versehen bereits 6,5 s vor Fahrzeughalt reagierte. Das entspricht einer Reaktionsgüte von 99,9 % richtigen Antworten.

Bei den als Plausibilitätskontrolle präsentierten Durchfahrtsituationen gab es drei Fehler auf 424 Darbietungen (99,3 % richtige Antworten). Die drei falschen Antworten erfolgten durch zwei normalsichtige Personen und eine nicht normalsichtige Person, die bei je einem durchfahrenden Fahrzeug mit dem Knopfdruck „haltendes Fahrzeug“ reagierten. Insgesamt ist kein Zusammenhang zwischen Reaktionsgüte und Sehvermögen ersichtlich.

##### 3.3.1.2 Reaktionsgeschwindigkeit

Für die Auswertungen zur Reaktionszeit wurden die Reaktionen mit richtiger Antwort auf anhaltende Fahrzeuge herangezogen. Die Reaktionszeit wurde relativ zum Zeitpunkt des Anhaltens ermittelt. Dadurch ergab sich ein bedeutsamer Anteil negativer

Reaktionszeitwerte, denn viele Reaktionen erfolgten, bevor das Fahrzeug endgültig zum Stehen gekommen war. Der Mittelwert über alle Probanden betrug 0,01 s (Standardabweichung 0,27 s). Es zeigte sich kein Unterschied der Reaktionszeit in Abhängigkeit des Sehvermögens (t-Test,  $F = 0,001$ ,  $p = 0,974$ ). Auf Basis dieser Erkenntnis wird nachfolgend das Reaktionsverhalten dieser beiden Probandengruppen zunächst nicht getrennt analysiert. Im Rahmen der Analysen zu den Einzelvariablen (Fahrzeuggeräusch, Alter usw.) erfolgt die Betrachtung aus inhaltlichen Erwägungen heraus jedoch wieder getrennt.

Für die Reaktionszeit wurde anhand einer linearen Regression (inkl. Varianzanalyse als inferenzstatistischer Test auf Bedeutsamkeit der Abweichungen der Modellgüte) eine komplexe Modellbildung in zwei Varianten durchgeführt. Immer wurden als Prädiktorenpool die fünf Variablen Fahrzeuggeräusch, Hintergrundgeräusch, Videoverision, Alter und Geschlecht herangezogen. Beide Varianten (schrittweise Aufnahme und schrittweise Eliminierung von Modellvariablen) erbrachten ein identisches Ergebnis.

Auf die Reaktionszeiten zeigte sich lediglich ein signifikanter Vorhersagebeitrag durch die visuell dominierte Einflussvariable Videoverision und die Personenvariable Geschlecht ( $F = 17,034$ ,  $p < 0,001$ ). Die Hinzunahme der akustischen Variablen Fahrzeuggeräusch und Hintergrundgeräusch sowie der Personenvariable Alter verbesserte die Modellgüte nicht signifikant. Diesen Variablen kann somit im komplexen Zusammenwirken kein signifikanter Zusammenhang zur Reaktionszeit in diesem Teilversuch zugeschrieben werden.

Auch dieses Modell erreicht nur einen sehr geringen Erklärungsumfang. Die Varianzaufklärung beträgt unter 5 % der beobachteten Reaktionszeitunterschiede. Der weitaus größte Anteil der Reaktionszeitunterschiede unterliegt somit zufälligen oder nicht durch lineare Kombination der Variablenausprägungen abgebildeten Einflüssen.

#### 3.3.2 Ergebnisübersicht Blickverhalten

Von 44 Probanden konnten vollständig auswertbare Blickverhaltensdaten erhoben werden. Zunächst erfolgten die Auswertungen für die Blickzuwendung zum Gesamtfahrzeug. Von den 1.672 präsentierten Fahrzeugen (38 je Proband) wurden 1,9 % ( $N = 31$ ) nicht angeschaut. Auf die 1.641 be-

trachteten Fahrzeuge erfolgten 15.133 Fixationen. Im Mittel wurde jedes Fahrzeug somit 9,2-mal fixiert (Standardabweichung 4,2). Die Bandbreite der Fixationen je Fahrzeug schwankte zwischen 0 und 33, wobei dasselbe Fahrzeug zwischen 0- und bis zu 10-mal erneut betrachtet wurde, nachdem der Blick zwischenzeitlich an einem anderen Ort weilte.

Zu drei der insgesamt vier falschen Antworten (eine Anhaltesituation und drei Durchfahrtssituationen) gibt es Blickaufzeichnungen. Das viel zu früh und damit falsch eingeschätzte Fahrzeug ist nicht betrachtet worden. Die beiden durchfahrenden und fälschlicherweise als anhaltend gedrückten Fahrzeuge wurden recht intensiv mit 7 und 13 Fixationen betrachtet. Die Interpretation als unabsichtliche Fehler liegt somit nahe.

Neben der Betrachtungshäufigkeit (Anzahl an Fixationen) wurde die Intensität der Betrachtung zusätzlich anhand der jeweiligen Fixationsdauer (Gesamtbetrachtungsdauer eines Fahrzeuges) untersucht. Dadurch sollte primär die Betrachtungsintensität der tatsächlich angeschauten Fahrzeuge näher beschrieben werden. Entsprechend wurden nur Werte berücksichtigt, wenn eine Fixation erfolgt war. Die Fahrzeuge wurden innerhalb der gesamten Darbietung zwischen 0,3 s und 8,6 s lang betrachtet. Die mittlere Gesamtbetrachtungsdauer je Fahrzeug betrug 2,91 s (Standardabweichung 1,28 s). Als weiterer Parameter wurde die Dauer bis zur ersten Betrachtung eines Fahrzeuges ausgewertet. Es wurden Zeitspannen bis zur ersten Betrachtung zwischen 0,5 s und 11 s aufgezeichnet. Die mittlere Dauer bis zur ersten Betrachtung eines Fahrzeuges betrug 6,8 s (Standardabweichung 2,4 s).

Einen bedeutsamen Einfluss auf das Blickverhalten zeigten die visuell durchfahrenden Fahrzeuge. Diese wurden, verglichen mit den akustisch und visuell anhaltenden Fahrzeugen, signifikant weniger häufig (t-Test,  $F = 50,182$ ,  $p < 0,001$ ), weniger lange (t-Test,  $F = 63,691$ ,  $p < 0,001$ ) und eher (t-Test,  $F = 24,743$ ,  $p < 0,001$ ) betrachtet. Offensichtlich konnte die Nichtverzögerung im Bewegungsverlauf des Fahrzeuges ausreichend früh visuell detektiert werden.

Unter den Probanden befanden sich 38 normalsichtige und sechs nicht normalsichtige Personen. Diese sechs nicht normalsehenden Probanden waren zwischen 23 und 52 Jahre alt (Mittelwert 40 Jahre). Es befanden sich je drei Frauen und Männer in dieser Gruppe, die eine Sehschärfe im Be-

reich  $0,032 \leq V \leq 0,4$  aufwiesen, wobei die Männer dieser Gruppe unter stärkeren Beeinträchtigungen des Sehvermögens litten als die Frauen. Der Visus der nicht normalsichtigen Männer war im Mittel um eine logarithmische Sehschärfestufe geringer als derjenige der Frauen dieser Gruppe. Die sehbehinderten Probanden insgesamt betrachteten die präsentierten Fahrzeuge signifikant weniger häufig (t-Test,  $F = 68,463$ ,  $p < 0,001$ ), weniger lange (t-Test,  $F = 70,350$ ,  $p < 0,001$ ) und später (t-Test,  $F = 21,831$ ,  $p < 0,001$ ) als die normalsichtigen Testpersonen. Auf Basis dieser Ergebnisse sowie inhaltlicher Erwägungen erfolgte die weitere Auswertung des Blickverhaltens für diese beiden Gruppen getrennt.

Der globale Einfluss der Versuchs- und Personenvariablen auf das Blickverhalten wurde zunächst im Rahmen einer komplexen Modellbetrachtung (lineare Regression/ANOVA, analog des bereits bei der Parkplatzsituation und oben bei den Reaktionszeiten geschilderten Vorgehens) anhand der beiden Parameter Intensität (Gesamtbetrachtungsdauer) und Dauer bis zur ersten Fixation untersucht.

Signifikante Zusammenhänge mit der Betrachtungsdauer finden sich für beide Probandengruppen mit dem Geschlecht. Das Fahrzeuggeräusch wirkt sich lediglich signifikant auf die Betrachtungsdauer bei den normalsichtigen Personen aus, während bei den sehbehinderten Probanden das Alter einen bedeutsamen Beitrag liefert. Das Alter ist zudem die einzige Variable, die einen bedeutsamen Beitrag zur Regression der Dauer bis zur ersten Betrachtung liefert. Einflüsse von Hintergrundgeräusch oder Videoverision auf das Blickverhalten finden sich im komplexen Zusammenspiel aller Merkmale nicht.

Die beschriebenen Regressionsmodelle erreichen einen nur mäßigen Erklärungsumfang, wobei die Vorhersage bei den sehbehinderten Probanden deutlich besser ausfällt als bei den normalsichtigen Personen. Die Varianzaufklärung beträgt zwischen einem und 26 Prozent der beobachteten Zeitunterschiede in Betrachtungsdauer bzw. Dauer bis zur ersten Fixation. Der größere Anteil der Parametervarianz unterliegt somit zufälligen oder nicht durch lineare Kombination der Variablenausprägungen abgebildeten Einflüssen. Daher werden in den nachfolgenden Unterkapiteln die Einzeleffekte der Untersuchungsvariablen ergänzend isoliert betrachtet.

### 3.3.3 Einfluss des Fahrzeuggeräusches

Bei isolierter Betrachtung zeigt sich ein signifikanter Zusammenhang des Fahrzeuggeräusches mit der Reaktionszeit der sehbehinderten Probanden (ANOVA,  $F = 3,288$ ,  $p = 0,011$ ), nicht jedoch mit derjenigen der normalsichtigen Personen (ANOVA,  $F = 1,909$ ,  $p = 0,107$ ) (siehe auch Anhang). Die nicht normalsichtigen Probanden schätzen beim Geräusch „synthetischer Sound mit Leerlauf“ das Fahrzeug signifikant später als stehend ein als beim Geräusch „E-Fzg. bei Fahrt“ und „Verbrenner mit Motorstopp“ (Bild 93). Bei den Normalsichtigen sind die Unterschiede zwischen den Geräuschvarianten deutlich geringer und qualitativ auch anders zwischen den beiden Verbrennervarianten mit Leerlauf bzw. Motorstopp. Hörbarer Leerlauf führt bei den sehbehinderten Personen zu einer deutlich

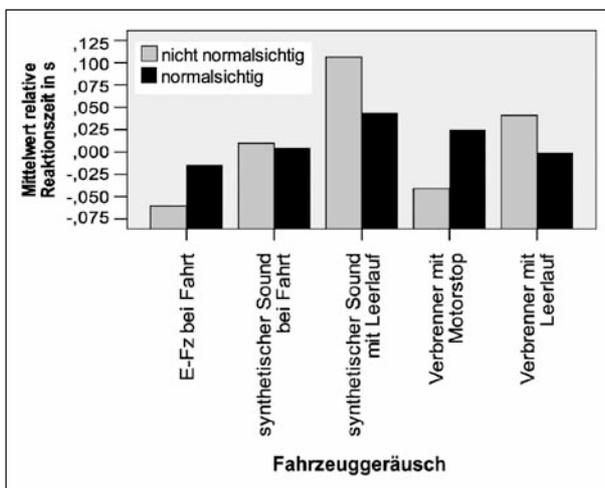


Bild 93: Reaktionszeit nach Fahrzeuggeräusch anhaltender Fahrzeuge

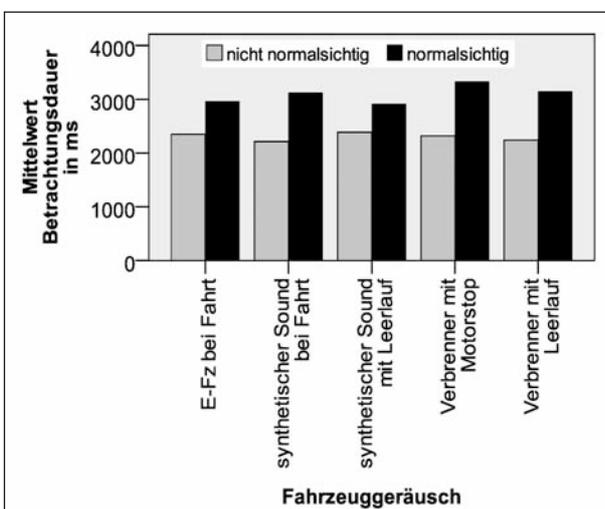


Bild 94: Betrachtungsdauer nach Fahrzeuggeräusch anhaltender Fahrzeuge

späteren Reaktion, der Motorstopp dagegen zu einer relativ früheren. Neben der Beobachtung, dass im Mittel alle Fahrzeuge zu früh als „stehend“ erkannt wurden, gründen die sehbehinderten Personen ihr Urteil deutlich stärker auf die akustische Komponente als die normalsichtigen Probanden. Die sehbehinderten Testpersonen zeigen im Mittel bei den eher leisen Soundvarianten frühere „Stehend“-Urteile als die normalsichtigen Personen.

Als eine plausible Interpretation kann angenommen werden, dass die beiden „Leerlauf“-Geräusche für die sehbehinderten Probanden akustische Wahrnehmungsgrundlage genug sind, um eine Ortung auf Stillstand vornehmen zu können. Bei den leisen Fahrgeräuschen bei geringer Geschwindigkeit (E-Fzg. und Verbrenner mit Motorstopp) wird das „Verschwinden“ des Geräusches mit dem Anhalten assoziiert, obwohl das Fahrzeug noch stärker rollt, als dies zum mittleren Moment der Reaktion bei den anderen Fahrzeuggeräuschvarianten erfolgt.

Die deutlich geringeren geräuschassoziierten Reaktionsunterschiede der normalsehenden Personen korrespondieren mit dem Blickverhalten (Bild 94). Diese Probanden zeigen beispielsweise bei „Verbrenner mit Motorstopp“ signifikant längere Betrachtungsdauern als beim „synthetischen Sound mit Leerlauf“ (ANOVA,  $F = 3,836$ ,  $p = 0,004$ ).

Hier erfolgt offensichtlich eine stärkere Betonung der visuellen Information. Dieser Zusammenhang ist bei den sehbehinderten Personen nicht vorhanden. Sie betrachten alle Fahrzeuge unabhängig vom Geräusch etwa gleich lange (ANOVA,  $F = 0,109$ ,  $p = 0,979$ ).

Eine differenzierte Auswertung des Blickverhaltens nach den Fahrzeugdetails Front, Fahrerbereich und Vorderreifen erbrachte keinen bedeutsamen Erkenntniszuwachs.

### 3.3.4 Einfluss des Hintergrundgeräusches

In der Anhaltesituation zeigt sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Hintergrundgeräuschvariation und dem Wahrnehmungs- oder Reaktionsverhalten von normalsichtigen oder sehbehinderten Probanden. Rein deskriptiv besteht bei lauterem Hintergrundgeräusch eine um 0,25 s spätere erste Blickzuwendung zum anhaltenden Fahrzeug bei normalsichtigen Personen, wobei die Grenze der statistischen Bedeutsamkeit jedoch nicht überschritten wird (t-Test,  $F = 3,482$ ,  $p = 0,062$ ).

### 3.3.5 Einfluss weiterer Versuchsmerkmale

#### 3.3.5.1 Alter

Hier wurden, wie schon bei der Analyse des Alterseinflusses im Versuchsteil „Parkplatzsituation“, die Personenmittelwerte als Betrachtungsgrundlage verwendet. Auf Ebene der Einzelpersonen (Personenmittelwerte) zeigen sich in der Anhaltesituation keine signifikanten Korrelationen zwischen dem Alter und den Reaktions- und Blickmaßen. Dies trifft sowohl auf die normalsichtigen als auch die nicht normalsichtigen Personen zu. Der bei den Regressionen gefundene Alterseffekt ist offensichtlich so gering ausgeprägt, dass ihn nur die große Fallanzahl im Rahmen der dortigen Analysen (Betrachtung auf Einzeldarbietungsebene) über die Grenze statistischer Bedeutsamkeit hebt.

#### 3.3.5.2 Geschlecht

Deutlicher als die fahrzeuggeräuschbezogenen Unterschiede sind die geschlechterassoziierten Unterschiede in Reaktions- und Blickverhalten (vgl. Bild 95). Frauen reagieren in beiden Probandengruppen signifikant später als Männer (t-Test,  $F \geq 3,965$ ,  $p \leq 0,047$ ).

Die untersuchten normalsichtigen und sehbehinderten Männer unterscheiden sich im Zeitpunkt des „Stehend-Urteils“ nicht, während bei den Frauen die nicht normalsichtigen noch einmal später reagierten als die normalsichtigen Personen. Unter Berücksichtigung der Erkenntnis, dass alle Urteile im Mittel zu zeitig erfolgten, reagierten die sehbehinderten Frauen tendenziell am „richtigsten“ und sicherheitsorientiertesten.

Im Blickverhalten bestimmen dann eher die Unterschiede zwischen den normalsichtigen und nicht normalsichtigen Männern die aufgezeigten Geschlechterunterschiede. Vor allem die nicht normalsichtigen Männer zeichnen sich durch eine signifikant weniger häufige (t-Test,  $F = 52,798$ ,  $p < 0,001$ ), kürzere (t-Test,  $F = 34,402$ ,  $p < 0,001$ ) und spätere (t-Test,  $F = 8,105$ ,  $p < 0,001$ ) Betrachtung der anhaltenden Fahrzeuge aus (siehe auch Anhang). Hier ist wiederum die stärkere Sehbeeinträchtigung der männlichen sehbehinderten Probanden verglichen mit den weiblichen sehbehinderten Probanden zu berücksichtigen.

#### 3.3.5.3 Videoversion

Zwischen der Videoversion und dem Blick- und Reaktionsverhalten zeigen sich deutliche Zusammen-

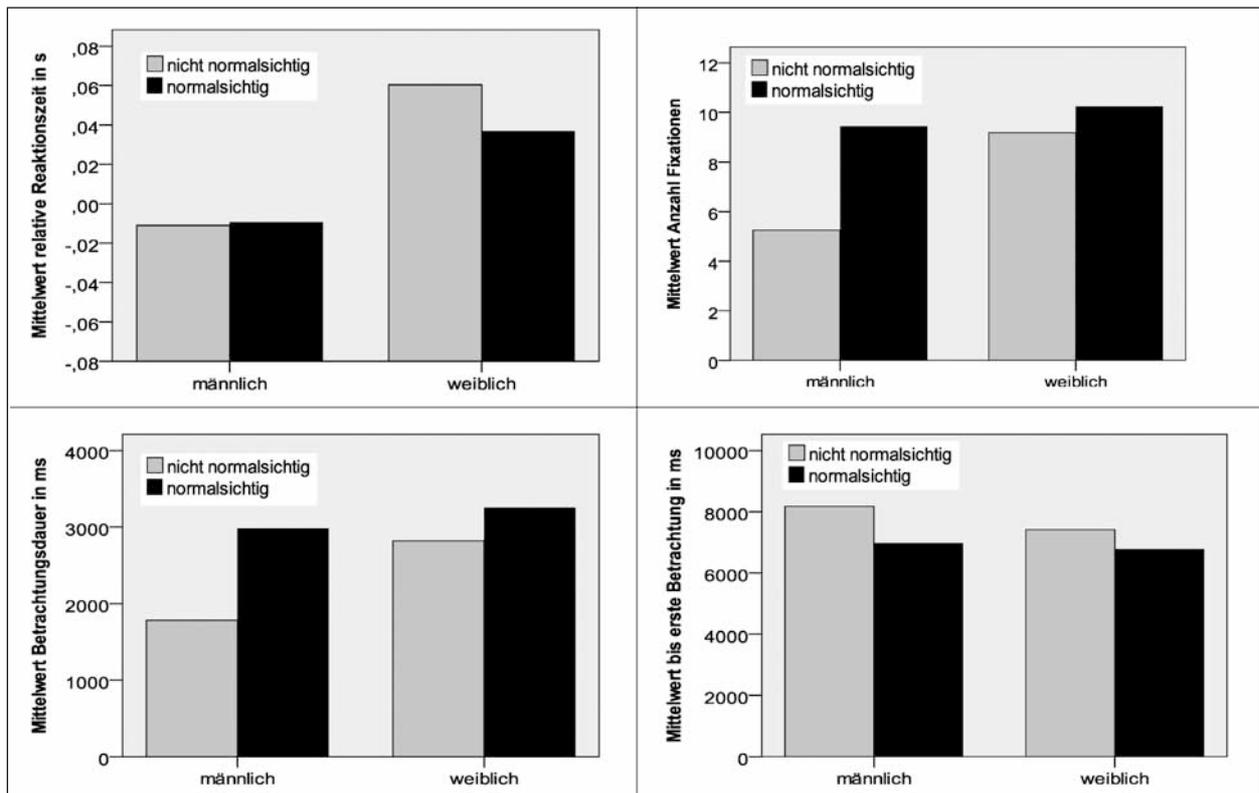


Bild 95: Reaktionszeit und Blickverhalten in Auswertung nach Geschlecht (Anhaltesituation)

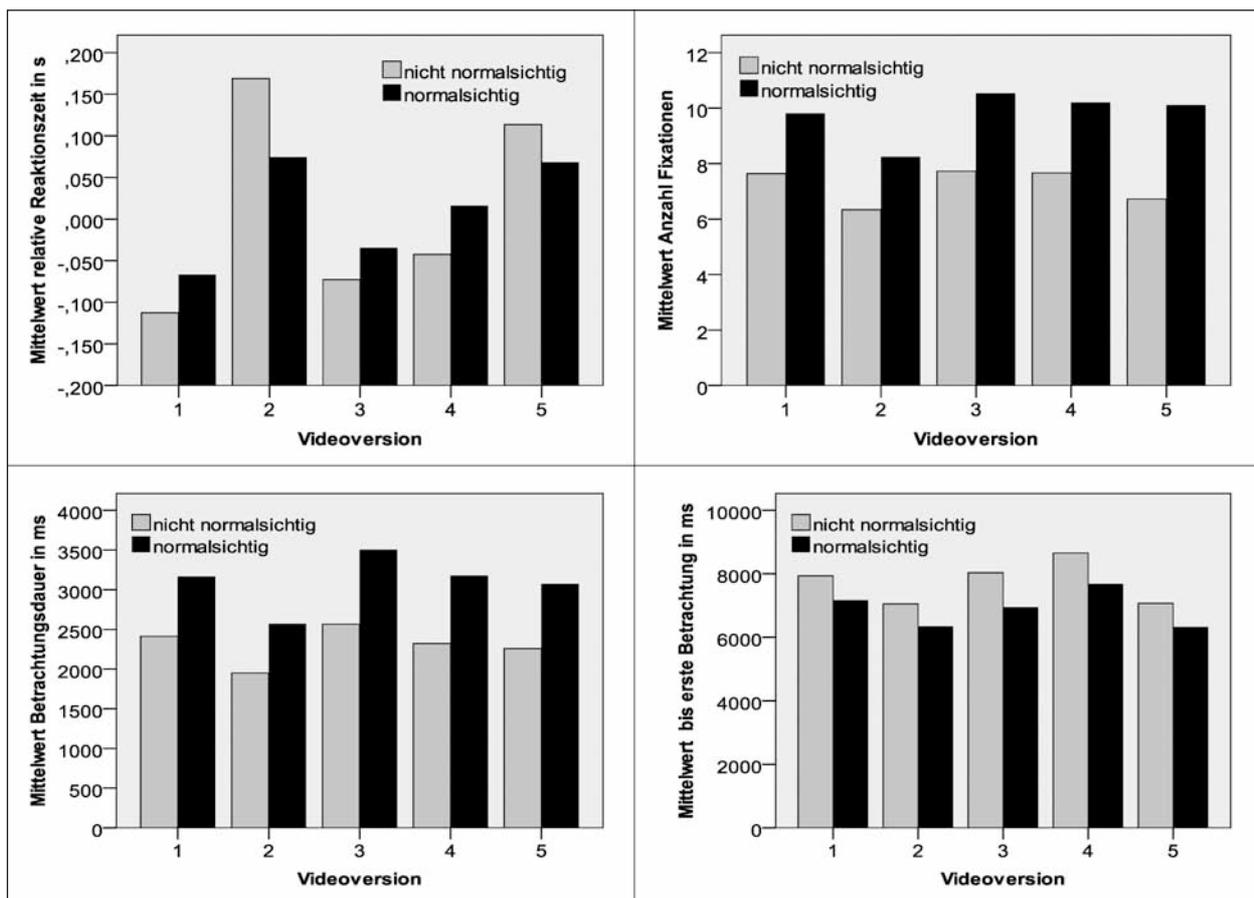


Bild 96: Reaktionszeit und Blickverhalten in Auswertung nach Videoversion (Anhaltesituation)

hänge (Bild 96). Vor allem die Videoversion zwei zeichnet sich im Kontext der anderen Versionen durch eine spätere Reaktion, geringere Anzahl von Fixationen und kürzere Betrachtungsdauer auf das anhaltende Fahrzeug aus, wobei die Betrachtung vergleichsweise früher als bei den anderen Videoversionen beginnt. Bei diesem Video kam es offensichtlich durch Bewegungen eines Passanten im Hintergrund zu einem bedeutsamen Einfluss.

### 3.4 Diskussion der audio-visuellen Versuche

#### 3.4.1 Untersuchungsansatz

Der Ansatz der bimodalen Untersuchung ist nicht das Standardvorgehen zur Untersuchung akustischer Wahrnehmungskomponenten. Er weist jedoch eine hohe Praxisorientiertheit auf. Nur so können die Wechselwirkungen zwischen den beiden Modalitäten untersucht werden und eine Bewertung des akustischen Wahrnehmungsanteils in komplexen Fragen der Verkehrssicherheit unter dem Vorzeichen eines wahrnehmungsphysiologischen Pri-

mats des Sehens über die rein akustische Wahrnehmung hinaus erfolgen. Die auf Basis der Blickverhaltensaufzeichnungen gewonnenen Erkenntnisse und Interpretationsansätze können, auch vor dem Hintergrund des nicht unerheblichen Aufwandes, als sehr aufschlussreich und im Sinne der Fragestellung nutzbringend eingeschätzt werden.

Die Kürze der relativen Reaktionszeiten sowie die hohe Reaktionsgüte zeigen, dass es mit dem gewählten Versuchsdesign und Untersuchungssetting gelungen ist, eine im wissenschaftstheoretischen Sinne sehr kritische Prüfumgebung für den Beitrag akustischer Informationen in der bimodalen Wahrnehmung gemeinsamen Sehens und Hörens anfahrender sowie anhaltender Fahrzeuge zu schaffen. Insgesamt zeigen die Variationen im visuellen Bereich in beiden Untersuchungsteilen größere Effekte auf die Reaktions- und Wahrnehmungsmaße als die akustischen Variationen. So zeigen sich etwa in der Parkplatzsituation deutlich spätere Reaktionen auf peripher dargebotene anfahrende Fahrzeuge verglichen mit zentral in der Mitte der Darbietung anfahrenden Fahrzeugen. Das ist für eine dominant visuelle Untersuchungsumgebung

zu erwarten und kann daher positiv als Validitätskriterium interpretiert werden.

Für die unter diesen Voraussetzungen gefundenen Zusammenhänge kann somit eine hohe inhaltliche Belastbarkeit gegenüber der Gegenthese einer zufälligen oder nicht substanziellen Beziehung zwischen den akustischen Merkmalen von Situation und Fahrzeug mit der Wahrnehmung und Reaktion von Fußgängern unterstellt werden.

Trotzdem finden sich recht geringe Erklärungsumfänge der Regressionsmodelle. Der gewählte Untersuchungsansatz geht neben einer hohen Reaktionsgüte und insgesamt recht schnellen Reaktionen mit einem recht geringen Umfang an systematischer Varianz in den Verhaltensmaßen einher. Im Kontext der unvermeidlichen zufälligen Schwankungsbreite von menschlichem Wahrnehmungs- und Reaktionsverhalten ist diese dann zwangsläufig von untergeordneter Auswirkung. Hierdurch können Modelle, die systematische Effekte beschreiben, wie etwa Regressionen, naturgemäß nur geringe Prädiktionsumfänge erreichen.

Etwas differenzierter sind ebenfalls die teilweisen Unterschiede zwischen Regressionsergebnissen und den Einzeleffekten zu betrachten. Wie die Analysen z. B. zum Störgeräusch zeigen, findet sich kein genereller Einfluss des Störgeräusches, der in einer regressiven Prognose linear abgebildet werden könnte. Sehr wohl bestehen jedoch deutliche Auswirkungen bestimmter Störgeräuschvarianten. Auch sind die zwar signifikanten, aber oftmals in Absolutwerten kleinen Effekte, z. B. der akustischen Variationen in der Anhaltesituation, nicht groß genug, um sich in der Regression als nennenswerter linearer Effekt niederzuschlagen.

Trotzdem kommt beiden Herangehensweisen ein substanzieller Beitrag zur Erkenntnisgewinnung zu. Die Regressionen operieren mit Interaktionen der Variablen und ermöglichen so eine Gewichtung im Kontext aller Einflüsse. Effektvergleiche zwischen Regressionsanalyse und Einzelbetrachtung der Variablen sind ein guter Indikator dafür, ob es sich um einen eher generellen Effekt über alle Situationen und Personen oder ob es sich um differenzielle Effekte bestimmter Kombinationen aus Situations- und Personenmerkmalen handelt. Ersteere können in pauschaler Weise interpretiert werden, während Zweitere nicht pauschalisiert werden dürfen und eher kontextsensitive Lösungen nahelegen.

Zur quantitativen Einordnung und Bewertung der Untersuchungsbefunde bieten sich schließlich die Effekte im Zusammenhang mit den visuellen Variationen in den beiden Untersuchungsteilen an. Diese betrafen vor allem die unterschiedlichen Fahrzeugkonstellationen. Es wurden zwar größtmögliche Standardisierungen durch die Gleichförmigkeit der Fahrbewegungen angestrebt, jedoch kamen mehrere visuell verschiedene Fahrzeuge in realen Verkehrssituationen bei den Aufnahmen zum Einsatz, sodass geringfügige Abweichungen unvermeidbar sind. Weitere Einflüsse resultieren aus der Reaktionsaufgabe, die eine räumliche und positionelle Variation der anfahrenden Fahrzeuge in der Parkplatzsituation sowie einen zwangsläufig anderen Geschwindigkeitsverlauf der durchfahrenden Fahrzeuge in der Anhaltesituation bedingt, aus dem recht bedeutsame Auswirkungen auf das Wahrnehmungs- und Reaktionsverhalten erwachsen.

### 3.4.2 Einflüsse akustischer Variationen

Als Erstes sind hier der Einfluss des Fahrzeuggeräusches und dabei der Zusammenhang zwischen dem Geräusch anfahrender Fahrzeuge und ihrer Wahrnehmung sowie der Reaktion darauf zu bewerten. In der Anfahrsituation (Parkplatzversuchsteil) zeigen sich signifikante Zusammenhänge des Fahrzeuggeräusches mit der Reaktionsgeschwindigkeit bei normalsichtigen und sehbehinderten Probanden. Beide Probandengruppen reagieren bei beiden Verbrennungsmotorgeräuschen schneller als bei den anderen drei Fahrzeuggeräuschvarianten. Die Reaktionszeitunterschiede korrespondieren mit dem Wahrnehmungsverhalten. Es zeigen sich frühere und längere Betrachtungen der anfahrenden Fahrzeuge bei den Verbrennungsmotorgeräuschen.

Insbesondere unterscheiden sich die Geräuschvariante Elektrofahrzeug und die beiden synthetischen Geräusche hinsichtlich der Reaktionszeit und des Blickverhaltens nicht. Auch die beiden Verbrennungsmotorgeräusche sind in Wahrnehmung und Reaktion vergleichbar. Für die Detektion anfahrender Fahrzeuge findet sich bei den Verbrennungsmotorgeräuschen (hier Dieselmotor) kein großer Unterschied zwischen Leerlauf und Motorstart. Der synthetische Leerlauf hingegen scheint, so wie in diesem Versuch verwendet, nicht geeignet, die Aufmerksamkeit vor dem Anfahren spezifisch auf das betreffende Fahrzeug zu lenken. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Befunden von

KIM u. a. (2012). Diese Autoren fanden bei leisen Fahrzeugen einen substanziellen Beitrag des synthetischen Zusatzgeräusches auf die akustische Anwesenheitswahrnehmung, jedoch in deutlich geringerem Umfang auf die akustische Detektion von Bewegungsrichtungen.

Beim Anhalteversuch finden sich deutlich geringere Effekte des Fahrzeuggeräusches als beim Anfahrversuch, obwohl hier die höheren Geschwindigkeiten gefahren werden. Das ist jedoch nur scheinbar ein Widerspruch. Die zentrale Wahrnehmungsaufgabe unterscheidet sich und korrespondiert mit unterschiedlichen Geräuschen bei den beiden Fahrzuständen. Um den Moment des Stehens zu detektieren, ist das Fahrgeräusch bei höheren Annäherungsgeschwindigkeiten kein relevanter Hinweis. Vielmehr zeigen die Ergebnisse, dass das Ende der akustischen Wahrnehmung des Fahrzeugaußengeräusches von den sehbehinderten Personen tendenziell direkter als Hinweis auf den Moment des Stillstandes genutzt wird. Bei den leiseren Fahrzeugaußengeräuschen liegt dieser Moment jedoch vor dem tatsächlichen Stopp. Der Befund unterschwelliger Fahrzeuggeräusche bei geringen Fahrgeschwindigkeiten deckt sich mit den bekannten Untersuchungen in diesem Kontext (siehe z. B. Zusammenstellung in HAGEN u. a. 2012a), aber auch neuesten Studien (z. B. BARTON u. a. 2013, ASHMEAD u. a. 2012).

Die normalsichtigen Personen nutzen das Ende dieser Wahrnehmung auch als Hinweis, jedoch nicht für die Reaktion direkt, sondern indirekt als Anlass einer verstärkten visuellen Suche nach dem Moment des Anhaltens. Die Reaktion selbst ist dann wiederum unabhängig vom Fahrzeuggeräusch und insofern finden sich keine Reaktionszeitunterschiede. Ein geschwindigkeitsabhängiges Zusatzgeräusch kann hier somit bedeutsame Einflüsse ausüben.

Der Vergleich dieser Ergebnisse mit den Befunden der Anfahrssituation zeigt jedoch deutlich, dass eine geschwindigkeitsabhängige Abgabe synthetischer Geräusche allein keine akustische Wahrnehmungsäquivalenz zur Situation bekannter Verbrennungsmotoren herstellen kann. Die akustische Wahrnehmbarkeit kann nicht alleinig an der Geschwindigkeit verankert werden, sondern sollte auch den Fahrzustand des Fahrzeuges und die Antriebstechnologie berücksichtigen. Anfahren ist ein Vorgang, der trotz niedriger Geschwindigkeit zumindest bei Verbrennungsmotoren mit einer guten Hörbarkeit

einhergeht (vgl. Befunde zum Motorstartgeräusch, Kapitel 2.6). Für die Detektion anhaltender Fahrzeuge werden jedoch hörbare Geräusche benötigt, die unabhängig vom Kraftbedarf wahrnehmungsrelevant sind, z. B. ein hörbarer Leerlauf.

Die in der Untersuchung realisierte Stufung des Hintergrundgeräusches zeigte geringere Zusammenhänge mit dem Reaktions- und Wahrnehmungsverhalten als das Fahrzeuggeräusch. In der Parkplatzsituation zeigen sich Zusammenhänge nur für die normalsichtigen Probanden. Sie reagieren bei lauterem Hintergrundgeräusch etwas schneller und schauen seltener sowie kürzer zum anfahrenden Fahrzeug. Beide Probandengruppen zeigen zudem signifikant kürzere Dauern bis zur ersten Betrachtung bei lauterem Hintergrund. Dieses Muster deutet bei lauterem Hintergrund auf eine erfolgreich erhöhte Aufmerksamkeitsanstrengung mit intensiverem Blickverhalten hin. In der Anhaltesituation finden sich bei insgesamt geringeren Effekten der Fahrzeuggeräusche keine Zusammenhänge zwischen Hintergrundgeräusch und Blick- oder Reaktionsverhalten.

GARAY-VEGA u. a. (2010b), KERBER (2006) sowie viele weitere Studien finden signifikante Interaktionen der rein akustischen Fahrzeugwahrnehmung mit dem Hintergrundgeräusch. Insofern kann einerseits davon ausgegangen werden, dass die beiden gewählten Hintergrundgeräusche (49 und 55 dB (A)), die Voraussetzungen eines „lauten“ Hintergrundes, nicht erfüllen, wie ihn z. B. FASTL & KERBER (2012) als wahrnehmungsbeeinträchtigend beschreiben. Andererseits sind die besonderen Effekte der bimodalen Wahrnehmung auch bei eingeschränktem Sehvermögen zu beachten. Wie die Ergebnisse zeigen, können die in rein akustischer Wahrnehmungsumgebung gewonnenen Befunde nicht direkt auf die bimodale Situation übertragen werden. Es ist von bedeutsamen Wechselwirkungen zwischen beiden Modalitäten auszugehen, die durchaus andere Konsequenzen im beobachtbaren Verhalten zeigen können, als es rein visuell oder rein akustisch gewonnene Ergebnisse vorhersagen.

Das lautere der verwendeten Hintergrundgeräusche entspricht demjenigen Hintergrundgeräuschpegel, von dem der Report von HASTINGS u. a. (2012) davon ausgeht, dass Fahrzeuge und ihre Betriebszustände (noch) akustisch detektierbar sein sollen. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass bei diesem Pegel bezüglich der bimodalen

und konzentrierten Detektion anfahrender und anhaltender Fahrzeuge gerade auch bei sehbehinderten Probanden keine nennenswerte negative Beeinflussung gegenüber einem deutlich leiseren Hintergrund erfolgt. Die mögliche Veränderung dieses Befundes bei höheren Lautstärkepegeln und/oder stärkerer Ablenkung durch eventuelle Nebenaufgaben kann aus den hier erhobenen Daten nicht extrapoliert werden. Aus den Daten lässt sich jedoch begründen, dass, wenn negative Wahrnehmungs- und Reaktionseffekte mit akustischen Merkmalen assoziiert wurden, dann direkt mit dem zu geringen Fahrzeuggeräusch. Im hier realisierten Bereich von 49 und 55 dB (A) treten bei den untersuchten Fahrzeuggeräuschen keine nennenswerten Maskierungen eines (ansonsten) hörbaren Außengeräusches bei anfahrenden oder anhaltenden Fahrzeugen auf. Die systematische und schwellenorientierte Variation der aufgezeigten Wechselwirkung kann an dieser Stelle für künftige Untersuchungen angeregt werden.

Die Berücksichtigung möglicher Störgeräuschwirkungen und die Variationen der dabei verwendeten Detailmerkmale diene vornehmlich der erweiterten Untersuchung von bimodalen Effekten der Wahrnehmung anfahrender Fahrzeuge unter Berücksichtigung der zentralen Aufmerksamkeitsmechanismen menschlicher Informationsverarbeitung. Der Hintergrund ist jedoch weniger ein erkenntnistheoretischer als vielmehr ein praktisch-verkehrssicherheitsorientierter Anlass. Entsprechend sind die Befunde vor diesem Hintergrund einzuordnen.

Die Befunde zeigen, dass, um die Wirkung einer rein akustischen Ablenkung durch relevante Reize (Fahrzeuggeräusch) bewerten zu können, keine pauschalisierten Wirkungsannahmen von Störgeräuschen getroffen werden können. Vielmehr müssen die Detailmerkmale in mehreren relevanten Dimensionen berücksichtigt werden. Hierzu gehören etwa der Aufmerksamkeitsfokus, die räumliche Relation zwischen Distraktor und anfahrendem Fahrzeug sowie auch akustische Merkmale des Störgeräusches selbst, wie etwa seine Dauer.

Die Bandbreite möglicher Wirkungen reicht von positivem Hinweisreiz über kurzzeitige Ablenkungen ohne Auswirkungen im Reaktionsverhalten bis hin zu bedeutenden Aufmerksamkeitsverschiebungen mit signifikant verlängerten Reaktionszeiten. Auch hierbei sind Wechselwirkungen zwischen akustischer und visueller Wahrnehmung zu beobachten, die zudem vor dem Hintergrund modalitätsasso-

ziierter Aufmerksamkeits- und Wahrnehmungsprozesse bewertet werden müssen. Eine direkte Übertragung unimodal gewonnener Befunde erscheint zumindest für die untersuchte Personengruppe der Sehbehinderten und normalsichtigen Fußgänger nicht möglich.

Schließlich werden die Wechselwirkungen zwischen den beiden Wahrnehmungsmodalitäten Sehen und Hören auch von erfahrungsbasierten Erwartungsmustern und typischen Wahrnehmungsstrategien beeinflusst. Das zeigt sich an den Reaktions- und Wahrnehmungsunterschieden in Abhängigkeit der Fahrzeugposition. Große Abstände zum Distraktorfahrzeug gingen in der vorliegenden Untersuchung mit peripheren Positionen sowohl von Distraktorfahrzeug als auch anfahrendem Fahrzeug einher. Die hierbei beobachteten Effekte sind somit teilweise von dem stark zentral orientierten Blickverhalten vieler Probanden beeinflusst.

### 3.4.3 Personenmerkmale

Mit der grundsätzlichen Unterscheidung in normalsichtige und sehbehinderte Probanden gehen bedeutsame Unterschiede in den Wahrnehmungs- und Reaktionsmaßen einher. Sehbehinderte zeichnen sich gegenüber normalsichtigen Personen durch ein reduziertes visuelles Wahrnehmungsvermögen aus. Entsprechend finden sich quantitative Unterschiede im visuellen Wahrnehmungsverhalten sowie in der Reaktion. Sehbehinderte Probanden zeigten längere Reaktionszeiten und ein intensiveres Blickverhalten.

Die Auswirkungen der experimentellen Variationen, z. B. der Fahrzeuggeräusche, waren jedoch qualitativ identisch mit den Effekten bei normalsichtigen Personen, wobei inferenzstatistische Auswertungen der Blickmaße durch die geringe Gruppengröße der Sehbehinderten mit erfolgreicher Blickaufzeichnung überlagert wurden. Die qualitativ überwiegend sehr vergleichbaren Befunde in der Detailwirkung der realisierten Situationsbedingungen sowohl auf die Wahrnehmung als auch Reaktion zeigen jedoch, dass die Interaktion zwischen Sehen und Hören in Bezug auf anfahrende und anhaltende Fahrzeuge weitestgehend vergleichbaren Prinzipien unterliegt. Die Dominanz der visuellen Information bleibt auch bei den untersuchten Sehbehinderten in nahezu allen Situationen erhalten. Dies korrespondiert im theoretischen Sinne mit den Befunden von HASSAN & MASSOF (2012), die für

den Entscheidungsmechanismus einer Straßenquerung unter Berücksichtigung motorischer und sensorischer Performance keine Unterschiede zwischen Personen mit unterschiedlichem Sehvermögen berichten.

Wie die Analysen falscher Reaktionen bei der Anfahrtsituation zeigen, muss jedoch über diesen generellen Befund hinaus von einem relevanten Zusammenhang mit dem Umfang der Sehbeeinträchtigung ausgegangen werden. Mit weiter abnehmendem visuellem Wahrnehmungsvermögen ist ein stärkerer Rückgriff auf akustische Informationen zu erwarten.

Beim Anhalteversuch finden sich geringere Unterschiede zwischen den beiden Personengruppen. Es gab jedoch auch aufschlussreiche Unterschiede im Wahrnehmungs- und Reaktionsmuster zwischen normalsichtigen und sehbehinderten Personen bei der Anhaltesituation bei Fahrzeugen, die den akustischen Wahrnehmungsbereich vor dem Stillstand verlassen. Dieser Befund wurde oben bereits unter dem Aspekt der unterschiedlichen Hinweiswirkung von Fahrzeuggeräuschen diskutiert. Das zeigt, dass es im Detail Situationen und Anforderungen gibt, bei denen der akustischen Information durch Sehbehinderte trotz relevanten Sehvermögens eine recht hohe Bedeutung beigemessen wird.

Die Untersuchung der Zusammenhänge von Alter und Geschlecht der Personen mit dem Wahrnehmungs- und Reaktionsverhalten waren nicht Hauptgegenstände der vorliegenden Untersuchungen. Es finden sich im untersuchten Probandenkollektiv nur geringe derartige Zusammenhänge, die eher dem Geschlecht als dem Alter zuzuordnen sind und dabei jedoch primär mit dem Sehvermögen im Zusammenhang stehen dürften. So finden auch BARTON u. a. (2012) keine Geschlechterunterschiede in der Fahrzeugwahrnehmung. Altersbezogen ist jedoch vor allem im Hinblick auf die Bereiche Verkehrssicherheit von Kindern (z. B. BARTON u. a. 2013) sowie älteren Fußgängern (SCHLAG 2008) von bedeutsamen Zusammenhängen auszugehen, die aufgrund der Randbedingungen dieser Untersuchung jedoch von der realisierten Stichprobe nicht berührt werden.

#### 3.4.4 Integration und Ausblick

Diskussionsrichtungen der vorliegenden Befunde umfassen den Bezug zur Wahrnehmung, die

Aspekte praktischer Verkehrssicherheit sowie die regulierungsorientierte Perspektive.

Die Bedeutsamkeit des Fahrzeugaußengeräusches als Grundlage akustischer Wahrnehmung durch Fußgänger und weitere Verkehrsteilnehmer wird häufig an Konfliktsituationen mit dem fahrenden Kraftfahrzeugverkehr gebunden (KERBER 2006, FASTL & KERBER 2012). Wie die vorliegenden Ergebnisse zeigen, hat das Fahrzeugaußengeräusch auch in weiteren Situationen einen bedeutsamen Einfluss auf Wahrnehmung und Reaktion.

Durch den bimodalen Untersuchungsansatz zeigen sich mehrere bedeutsame Anhaltspunkte über differenzierte Interaktionen der beiden Modalitäten. Diese Befunde sollten, wie auch die Erkenntnisse über die Wirkung von Stör- und Hintergrundgeräuschen in weiterführenden Untersuchungen gezielter eruiert werden.

Der wissenschaftstheoretisch notwendige Grundansatz einer für die Wirkung der akustischen Merkmale möglichst kritischen Prüfumgebung ist als richtig und erfolgreich einzustufen. Hierdurch wird unter stark kontrollierten experimentellen Laborbedingungen ein als gesichert anzusehendes Mindestmaß möglicher Wirkungen begründet. Für die Abschätzung von anwendungspraktischen Bezügen zur Verkehrssicherheit können daher weiterführende Untersuchungen zur Beschreibung der Bandbreite möglicher Wirkungen in praktischen Verkehrsumgebungen angeregt werden.

Der Befund einer im Vergleich größeren Wirkung akustischer Merkmale bei anfahren, verglichen mit anhaltenden Fahrzeugen gilt für die Personen, die mindestens über ein Restsehvermögen verfügen. Die Breite der verkehrspraktischen Situationen, in denen dieser Unterschied von diesen Personen positiv genutzt werden kann, kann jedoch eher in verallgemeinerungsorientierten Felduntersuchungen eruiert werden. Dies gilt ebenso für die diesbezüglichen Unterschiede zwischen Sehbehinderten und Blinden.

Für Blinde kann eine ausschließliche Orientierung am Fahrzeuggeräusch unterstellt werden. Daher ist es aus Sicht dieser Personengruppe auch wenig sinnvoll, die Hörbarkeit von Fahrzeugen an die Antriebstechnologie zu binden (DUDENHÖFFER & HAUSE 2012, WALL EMERSON & SAUERBURGER 2008, BECKENBAUER 2011). Die in der vorliegenden Untersuchung gefundenen Zusammenhänge zwischen Reaktionszeit und Fahrzeug-

geräusch zeigen, dass eine akustische Hinweiswirkung jedoch auch bei Sehbehinderten und normal-sichtigen Personen gegeben ist. Es ist davon auszugehen, dass auch zukünftig Fahrzeuge verschiedener Technologien und akustischer Qualität sowie Quantität in praktischen Verkehrssituationen auftreten können (ASSING u. a. 2011, HOLZMAN 2011). Das parallele Vorhandensein vieler partieller Maßnahmenansätze beeinflusst nicht nur die Akzeptanz einzelner Lösungen (HAGEN u. a. 2012b), sondern es ist auch ein relevanter Bezug zur Verkehrssicherheit zu berücksichtigen.

Gerade im Kontext anderer, hörbar anhaltender, anfangender und fahrender Fahrzeuge könnte es zu bedeutsamen Unsicherheiten gegenüber einzelnen, in der jeweiligen Situation nicht hörbaren Fahrzeugen kommen. Hierbei ist auch das auf absehbare Zeit stetig steigende mittlere Alter der Fußgänger zu berücksichtigen, weil damit sowohl sensorische Einschränkungen, aber auch größere und unter Umständen weniger plastische erfahrungsbasierte Erwartungen einhergehen und diese Fortbewegungsart bis in die höchsten Altersbereiche regelmäßig erhalten bleibt (SCHLAG, 2008).

Im Längsverkehr und bezüglich der Anhaltesituation können die Argumentationen und Befunde zur fahrerseitigen Verhaltensanpassung an leise Fahrzeugaußengeräusche teilweise als aussichtsreich bewertet werden (COCRON & KREMS 2013). Dies gilt für die untersuchte Anfahrssituation nicht in diesem Maße. Fahrerseitige Voraussicht und Antizipation sind an die Grenzen der fahrerseitigen Wahrnehmung und Informationsverarbeitung gebunden. In komplexen Anfahrssituationen, in denen dazu regelmäßig Sichteinschränkungen auftreten, kann nur eine eingeschränkte Wirksamkeit der fahrerseitigen „Vorausschau“ unterstellt werden. Hier ist der Fahrer zur Sicherung der Situation auf die anteilige Sicherung seitens des Fußgängers angewiesen. In diesem Sinne können fahrerbediente akustische Aufmerksamkeitssysteme auch nicht in dem Umfang wirksam werden wie fahrerunabhängige Systeme.

## 4 Zusammenfassung

Der Berichtsteil „Auditive Wahrnehmung von Fahrzeugaußengeräuschen“ (Kapitel 2) liefert einen Beitrag zur Erklärung des Zusammenhangs zwischen Fahrzeugaußengeräuschen und deren

Wahrnehmbarkeit im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung von Fußgängern. Ziel war die Ermittlung der zur Erkennung notwendigen Geräuscheigenschaften von Fahrzeugen mit Verbrennungs- und Elektromotoren. Die auditive Wahrnehmung wurde für drei sehr unterschiedliche Verkehrssituationen bestimmt.

Als erste Situation wurde die Fahrzeugaußengeräuscherkennung für eine Annäherungssituation mit ortsüblicher Geschwindigkeit bis 50 km/h bestimmt (vgl. Kapitel 2.2). Ermittelt wurde der Unterschied im Erkennungsabstand zwischen Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Fußgänger nehmen Annäherungsgeräusche von Elektrofahrzeugen deutlich später wahr. Wird ein herannahendes Fahrzeug mit Verbrennungsmotor im Mittel in einer Entfernung von 36 Metern wahrgenommen, so wird ein gleich schnelles Elektrofahrzeug im Mittel erst im Abstand von 13 Metern wahrgenommen. Bei den Geräuschen besteht keine Korrelation zwischen der Reaktionszeit und dem zur Erkennung benötigten Pegel. Für die Erkennung von Fahrgeräuschen gegenüber einem Hintergrundgeräusch genügt es, wenn nur einzelne Terzpegel aus dem Hintergrundspektrum herausragen. Besonders geeignet scheinen Signalanteile, welche ähnlich geartet sind wie tieffrequente Motorordnungen. Neben der Bedingung, dass das Signalspektrum außerhalb des Maskierers liegt, wird die Erkennungsqualität von der Tonhaltigkeit und der Zeitvarianz bestimmt. Der Motordrehzahl nachempfundene synthetische Signale können ähnlich gut erkannt werden wie Geräusche von Verbrennungsfahrzeugen.

Die Wahrnehmung von Anfahrgeräuschen aus geringen Entfernungen wurde für eine Parkplatzsituation gemessen (vgl. Kapitel 2.4). Auf Parkplätzen sind die Abstände zwischen Fahrzeugen und Passanten besonders gering. Häufig entstehen Situationen, innerhalb derer Fußgänger darauf angewiesen sind, anfangende Fahrzeuge schnell zu lokalisieren. Die Fahrzeuggeschwindigkeit ist auf Parkplätzen eher gering, was aber nur für die rechtzeitige Wahrnehmung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren vorteilhaft ist. Stehende Verbrennungsmotorfahrzeuge kündigen im Regelfall ein Losfahren mit dem Starten des Motors an bzw. sie stehen mit einem Leerlaufgeräusch in Abfahrbereitschaft. Elektrofahrzeuge (ohne Sound-Generatoren) besitzen diese Eigenschaften nicht. Weder erzeugen sie bei geringen Geschwindigkeiten ein Fahrgeräusch, noch wird vor dem Anfahren ein

akustisches Start- oder Bereitschaftssignal abgestrahlt. Ist ein Fußgänger nur auf seine auditive Wahrnehmung angewiesen, so erkennt er Elektrofahrzeuge viel zu spät. Fährt ein Elektrofahrzeug aus 6,5 m Entfernung in Richtung eines Fußgängers an, erkennt er dieses erst, wenn es ihm quasi über die Füße fährt. Ein beispielhaftes synthetisches Anfahrgeräusch besaß eine ähnlich gute Erkennungsqualität wie ein Verbrennungsgeräusch. Beide wurden nach etwa einer Sekunde erkannt. Neben der Erkennungszeit wurde in diesem Experiment auch die Ortung der Geräusche untersucht. Die Ausgangspositionen der Fahrzeuge mit einem Verbrennungsgeräusch sind rein auditiv sehr gut ortbar. Der Fehler liegt bei etwa einer Drittel-Fahrzeugbreite. Bei den synthetischen Geräuschen, besonders beim synthetischen Anfahrgeräusch aus dem synthetischen Leerlauf heraus, verringert sich die Ortungsgenauigkeit deutlich. Möglicherweise ist der Übergang aus dem synthetischen Leerlaufgeräusch schlechter erkennbar als der Übergang aus dem „Nichts“. Die rein auditive Ortung der Ausgangsposition des beispielhaft verwendeten Elektrofahrzeuggeräusches ist für die Probanden nahezu unmöglich.

In einer dritten Situation wurde die rein auditive Erkennung des Anhaltens von Fahrzeugen an einem Fußgängerüberweg bestimmt (vgl. Kapitel 2.5). Für das sichere Überqueren eines Fußgängerüberweges sind sehbehinderte Verkehrsteilnehmer darauf angewiesen zu erkennen, ob ein Fahrzeug auch wirklich angehalten hat. Aus der Bewertungsstreuung für das Elektrofahrzeuggeräusch wird ersichtlich, dass einige Reaktionen deutlich zu früh, andere dagegen viel zu spät erfolgen und eine entsprechende auditive Erkennbarkeit somit nicht gegeben ist. Das Elektrofahrzeuggeräusch ist bei der geringen Geschwindigkeit vor dem Anhalten nahezu unhörbar, was einige Probanden dazu animiert, sofort auf „Anhalten“ zu entscheiden, sobald sie kein Geräusch mehr hörten. Andere Probanden warten offenbar deutlich länger mit ihrer Reaktion, da sie gewohntermaßen eine Betriebszustandsänderung erwarten, wie sie es durch einen Leerlauf oder einen Motorstopp gewohnt sind. Erst wenn sie merken, dass keine Zustandsänderung eintritt, reagieren sie auf „Anhalten“. Bei den beiden Verbrennungsgeräuschen ist die Streuung etwas niedriger, aber auch hier gibt es Urteile, welche vor dem Anhalten liegen. Im Mittel reagieren die Versuchspersonen nach 0,4 s auf den Anhaltevorgang. Ob der Motor im Leerlauf weiterläuft oder abgestellt wird, hat kei-

nen wesentlichen Einfluss. Die Streuungen der synthetischen Geräusche liegen in einem ähnlichen Bereich, jedoch erfolgt die Erkennung des Anhaltens später, in jedem Fall nach dem Halten. Der synthetische Leerlauf nach dem Fahrzeughalt bringt für eine schnelle Erkennung keinen Vorteil.

Im Kapitel 2.7 wurde untersucht, welche grundsätzlichen Eigenschaften ein synthetisches Geräusch besitzen muss, um als „Bremsen“ oder „Beschleunigen“ interpretiert zu werden. Für diese beiden Betriebszustände wurden Sinus-Sweeps in unterschiedlichen Frequenzbereichen und mit verschiedenen Frequenzänderungsraten erzeugt. Dabei verliefen die Sweeps für „Beschleunigen“ aufwärts und für „Bremsen“ abwärts, was von den Probanden auch intuitiv so wahrgenommen wurde. Wie bei allen Experimenten wurde auch hier der maskierende Einfluss eines Hintergrundgeräusches untersucht. Je nach Startfrequenz der Sweeps sind verschieden große Frequenzänderungsraten zur Erkennung notwendig. Benötigt man für die Erkennung eines Sweeps mit 100 Hz Grundfrequenz noch eine Erhöhungsrate von 160 % (innerhalb von 2 s), so genügen für die Grundfrequenzen von 400 Hz und 630 Hz beispielsweise schon Erhöhungsraten von 40 %. Im Bereich der Dominanz des Hintergrundspektrums ist eine steilere Frequenzänderung notwendig. Bei den höheren Frequenzen genügen wieder niedrigere Steigungen, allerdings ist hier die Lästigkeit der Signale auch deutlich erhöht.

Der Berichtsteil „Audio-visuelle Wahrnehmung von Fahrzeugaußengeräuschen“ (Kapitel 3) untersucht den Beitrag akustischer Informationen in der bimodalen Wahrnehmung gemeinsamen Hörens und Sehens in den visuell dominierten Verkehrssituationen des „anfahrenden“ (Situation 2) und des „anhaltenden“ (Situation 3) Fahrzeuges, die bereits im ersten Berichtsteil rein auditiv untersucht wurden.

Der bimodale Untersuchungsansatz ist kein Standardvorgehen zur Untersuchung akustischer Wahrnehmungskomponenten, allerdings weist dieses Vorgehen eine hohe Praxisorientiertheit auf. Die Kürze der relativen Reaktionszeiten, die hohe Reaktionsgüte sowie die größeren Effekte der Variationen im visuellen Bereich auf die Reaktions- und Wahrnehmungsmaße (bspw. spätere Reaktion auf peripher dargebotene Fahrzeuge in der Parkplatzsituation) zeigen, dass mit dem gewählten Vorgehen eine kritische Prüfumgebung zur Untersuchung des Beitrages akustischer Informationen in der bimodalen Wahrnehmung für anfangende und anhal-

tende Fahrzeuge geschaffen werden konnte. Somit kann eine hohe inhaltliche Belastbarkeit für die Beziehung zwischen den akustischen Merkmalen von Situation und Fahrzeug mit der Wahrnehmung und Reaktion von Fußgängern unterstellt werden.

Für die Anfahrtsituation (Parkplatzsituation, vgl. Kapitel 3.2) zeigen sich signifikante Zusammenhänge des Fahrzeugaußengeräusches mit der Reaktionsgeschwindigkeit sowohl bei den normalsichtigen als auch bei den sehbehinderten Probanden. Beide Probandengruppen reagieren bei den beiden Verbrennungsmotorgeräuschen schneller als bei den anderen drei Fahrzeugaußengeräuschvarianten (eine Elektrofahrzeugvariante und zwei synthetische Fahrzeuggeräuschvarianten). Die Reaktionszeitunterschiede korrespondieren mit dem Wahrnehmungsverhalten, so zeigen sich frühere und längere Betrachtungen der anfahrenden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotorgeräuschen. Unterschiede zwischen den beiden Verbrennungsmotorgeräuschen (mit Motorstart bzw. mit Leerlauf) hinsichtlich der Reaktionszeit und des Blickverhaltens konnten nicht gefunden werden. Unterschiede im Reaktions- und Blickverhalten zwischen der Geräuschvariante Elektrofahrzeug und den beiden synthetischen Fahrzeuggeräuschen (bei Fahrt ohne Leerlauf bzw. mit synthetischem Leerlauf) konnten ebenfalls nicht gefunden werden. Somit scheint der synthetische Leerlauf, wie er in diesem Versuch verwendet wurde, nicht geeignet, die Aufmerksamkeit vor dem Anfahren spezifisch auf das betreffende Fahrzeug zu lenken. Hinsichtlich des zweifach gestuften Hintergrundgeräusches zeigt sich nur für die normalsichtige Probandengruppe, dass sie bei lautem Hintergrundgeräusch zwar seltener und kürzer, aber dafür schneller auf das anfahrende Fahrzeug reagiert. Beide Probandengruppen zeigen signifikant kürzere Betrachtungsdauern bei lautem Hintergrundgeräusch (55 dB (A)), weshalb eine erhöhte Aufmerksamkeitsanstrengung mit intensivem Blickverhalten angenommen werden kann.

Die Ergebnisse der bimodalen Untersuchung der Anhaltesituation (Fußgängerüberweg, vgl. Kapitel 3.3) weisen im Vergleich zum Anfahrversuch deutlich geringere Effekte des Fahrzeugaußengeräusches auf das Reaktions- und Blickverhalten auf. Es zeigt sich, dass das Ende der akustischen Wahrnehmung des Fahrzeugaußengeräusches von den sehbehinderten Personen tendenziell als direkter Hinweis auf den Moment des Fahrzeugstillstandes interpretiert wird. Dieser Moment liegt allerdings bei den leiseren Fahrzeugaußengeräu-

schen vor dem tatsächlichen Stopp des Fahrzeuges. Die normalsichtigen Personen nutzen das Ende der akustischen Information weniger als direkten Hinweis, sondern vielmehr als Anlass einer verstärkten visuellen Suche nach dem Moment des Anhaltens. Die Reaktion selbst ist dann wiederum vom Fahrzeuggeräusch unabhängig und zeigt insofern auch keine diesbezüglichen Reaktionszeitunterschiede. Ein geschwindigkeitsabhängiges Zusatzgeräusch kann hier bedeutsame Einflüsse ausüben. Hinsichtlich des Hintergrundgeräusches (zweifach gestuft) konnten in der Anhaltesituation keine Zusammenhänge zum Blick- und Reaktionsverhalten gefunden werden.

Der Vergleich der Ergebnisse beider Situationen zeigt auch, dass eine geschwindigkeitsabhängige Abgabe synthetischer Geräusche allein keine akustische Wahrnehmungsäquivalenz zur Situation bekannter Verbrennungsmotoren herstellen kann. Die akustische Wahrnehmbarkeit kann nicht alleinig an der Geschwindigkeit verankert werden, sondern sollte auch den Fahrzustand des Fahrzeuges und die Antriebstechnologie berücksichtigen.

Fahrzeuge mit elektrischen Antriebskomponenten können ohne gezielt verursachte Außengeräuschabgabe mindestens beim rein elektrischen Fahren in den Fahrzuständen sehr leise sein, in denen geringe oder keine Leistungsabforderungen am Antrieb vorliegen. Eine Vielzahl an Studien unter Labor- und praktischen Verkehrsbedingungen belegt die deutlich verringerte Hörbarkeit solcher Fahrzeuge. Das findet auch die vorliegende Untersuchung für die untersuchten Fahrzustände, insbesondere für die bislang wenig betrachteten Verkehrssituationen (Anhalten, Anfahren). Die Hörbarkeit zeigt sogar in einer visuell absolut dominanten Aufgabe bei normalsehenden Personen signifikante Effekte auf Wahrnehmung und Reaktion. Sowohl die Ergebnisse der auditiven Wahrnehmung als auch die Ergebnisse der auditiv-visuellen Wahrnehmung von Fahrzeugaußengeräuschen zeigen, dass das Fahrzeuggeräusch einen bedeutsamen Einfluss auf die Wahrnehmung und die Reaktion der Fußgänger hat, weshalb abschließend die Anregung einer stärkeren Untersuchung und Berücksichtigung von Hören und akustischen Fahrzeug- sowie Situationsmerkmalen auch bezüglich nicht blinder Personen sowohl im Kontext der internationalen Regulation des Außengeräusches von Fahrzeugen als auch bei praktischen, verkehrssicherheitsorientierten Betrachtungen erwächst.

## 5 Literatur

- ALTINSOY, M. E. (2010): Quality Evaluation of Engine Start and Idle Sounds, in Proceedings of 20<sup>th</sup> International Congress on Acoustics, ICA 2010. Sydney, Australian, (ISBN 978-0-646-54052-8)
- ALTINSOY, M. E. & JEKOSCH, U. (2012): The Semantic Space of Vehicle Sounds: Developing a Se-mantic Differential with Regard to Customer Perception. *Journal of the Audio Engineering Society*, 60 (1/2), pp. 13-20
- ASHMEAD, D. H., GUTH, D., WALL, R. S., LONG, R. G. & PONCHILLIA, P. E. (2005): Street crossing by sighted and blind pedestrians at a modern roundabout. *Journal of Transportation Engineering*, 131, pp. 812-821
- ASHMEAD, D. H., GRANTHAM, D. W., MALOFF, E. S., HORNSBY, B., NAKAMURA, T., DAVIS, T. J., PAMPEL & F., RUSHING, E. G. (2012): Auditory Perception of Motor Vehicle Travel Paths. *Human Factors*; 54 (3), pp. 437-53
- ASSING, K., HOLDIK, H., PÖPPEL-DECKER, M. & ULITZSCH, M. (2011): Alternative Antriebstechnologien: Marktdurchdringung und Konsequenzen. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen
- BACH, D. R., NEUHOFF, J. G., PERRIG, W. & SEIFRITZ, E. (2009): Looming sounds as warning signals: The function of motion cues. *International Journal of Psychophysiology*, 74, pp. 28-33
- BARTON, B. K., ULRICH, T. A. & LEW, R. (2012): Auditory detection and localization of approaching vehicles. *Accident Analysis and Prevention*, 49, pp. 347-353
- BARTON, B. K., LEW, R., KOVESDI, C., COTTRELL, N. D. & ULRICH, T.A. (2013): Developmental differences in auditory detection and localization of approaching vehicles. *Accident Analysis and Prevention*, 53, pp. 1-8
- BECKENBAUER, T. (2011): Lärminderungspotenziale im Straßenverkehr durch Elektromobilität. 5. DEGA Akustiksymposium, Stuttgart
- CLAUS, B. (2011): BKB-Projekt: Sicherheit für nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer bei geräuscharmen Fahrzeugen. Deutscher Blinden- und Sehbehindertenverband e. V. (DBSV), [www.dbsv.org/dbsv/unsererstruktur/uebergreifende-fachausschuesse/gfuv/efahrzeuge/](http://www.dbsv.org/dbsv/unsererstruktur/uebergreifende-fachausschuesse/gfuv/efahrzeuge/) [Juli 2013]
- COCRON, P. & KREMS, J. F. (2013): Driver perceptions of the safety implications of quiet electric vehicles. *Accident Analysis and Prevention*, 58, pp.122-131
- DUDENHÖFFER, K. & HAUSE, L. (2012): Geräuschwahrnehmung von Elektroautos. *ATZ*, 114, pp. 259-263
- ECE (2012): Economic Commission for Europe (ECE): Draft Recommendations for a Global Technical Regulation Regarding Audible Vehicle Alerting Systems for Quiet Road Transport Vehicles. United Nations, Economic and Social Council, Working Party on Noise, Fifty-sixth Session Geneva, 3-5 September 2012
- FASTL, H. & KERBER, S. (2012): Akustische Wahrnehmbarkeit. In: ZELLER, P. [Hrsg.]: *Handbuch Fahrzeugakustik*. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag. pp. 329-336
- GARAY-VEGA, L., HASTINGS, A., POLLARD, J. K., ZUSCHLAG, M. & STEARNS, M. D. (2010a): Quieter cars and the safety of blind pedestrians: Phase I (DOT HS 811 304). Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration
- GARAY-VEGA, L., POLLARD, J. K., GUTHY, C. & HASTINGS, A. (2010b): Auditory Detectability of Hybrid Electric Vehicles by Pedestrians who are Blind. *TRB 2011 Annual Meeting*
- GENUIT, K. & FIEBIG, A. (2013): Fahrzeugakustik und Sound Design im Wandel der Zeit. *ATZ* 113 (8), pp. 530-535
- GLAESER, K., MARX, T. & SCHMIDT, E. (2012): Sound detection of electric vehicles by blind or visually impaired persons. In: *Proc. internoise*, New York; 2012
- GROSSE, K. (2009): Audio-Visual Perception in Interactive Virtual Environments. Wien: TU Wien, Institut für Computergraphik und Algorithmen, 2009
- GROSSE, J., WEBER, R. & van de PAR, S. (2013): Measurements and model predictions of detections thresholds for a conventional and electric vehicle in traffic and pink noise, *DAGA 2013*, Meran, Italy, 2013

- GUTH, D., ASHMEAD, D., LONG, R., WALL, R. & PONCHILLIA, P. (2005): Blind and sighted pedestrians' judgments of gaps in traffic at roundabouts. *Human Factors*, 47, pp. 314-331
- GUTH, D. A., HILL, E. W. & RIESER, J. J. (1989): Tests of blind pedestrians' use of traffic sounds for street-crossing alignment. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 83, pp. 461-468
- HAGEN, K., SCHULZE, C. & SCHLAG, B. (2012a): Verkehrssicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern im Zusammenhang mit dem geringen Geräuschniveau von alternativen Antrieben – Schlussbericht zum Forschungsprojekt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen BAST FE-Nr. 82.0379/2010 sowie der Forschungsgemeinschaft Automobiltechnik e. V.; Berlin: FAT-Schriftenreihe 245
- HAGEN, K., Schulze, C. & SCHLAG, B. (2012b): Interaktionen zwischen Kraftfahrzeugen und Fußgängern. *ATZ*, 114, pp. 722-727
- HASSAN, S. E. & MASSOF, R. W. (2012): Measurements of street-crossing decision-making in pedestrians with low vision. *Accident Analysis and Prevention*, 49, pp. 410-418
- HASTINGS, A., POLLARD, J. K., GARAY-VEGA, L., STEARNS, M. D. & GUTHY, C. (2011): Quieter Cars and the Safety of Blind Pedestrians, Phase 2: Development of Potential Specifications for Vehicle Countermeasure Sounds. (Report No. DOT HS 811 496). Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration
- HASTINGS, A., GUTHY, C., POLLARD, J. K. & GARAY-VEGA, L. (2012): Research on Minimum Sound Specifications for Hybrid and Electric Vehicles. Washington, D.C.: National Highway Traffic Safety Administration
- HOLZMAN, D. C. (2011): Vehicle motion alarms: necessity, noise pollution, or both? *Environmental Health Perspectives*, 119 (1), pp. 31-33
- KERBER, S. (2006): Das Fahrzeugaußengeräusch im urbanen Verkehr und seine Bedeutung für die Interaktion Fußgänger – Fahrzeug. *ATZ*, 108, pp. 603-609
- KERBER, S. (2008): Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen in Hintergrundgeräuschen: Psychoakustische Beurteilungen und modellbasierte Prognosen. Technische Universität München: Dissertationsschrift
- KERBER, S. & FASTL, H. (2007): Perceptibility of approaching vehicles in urban background noise. In: *Proceedings INTER-NOISE 2007*, Istanbul, Turkey, 2007
- KERBER, S. & FASTL, H. (2008): Prediction of perceptibility of vehicle exterior noise in background noise. In: *Fortschritte der Akustik – DAGA 2008*. Deutsche Gesellschaft für Akustik e. V., Berlin, 2008
- KIM, D. S., WALL EMERSON, R., NAGHSHINEH, K., PLISKOW, J. & MYERS, K. (2012): Impact of adding an artificially generated alert sound to hybrid electric vehicles on their detectability by pedestrians who are blind. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 49 (3), pp. 381-394
- MISDARIIS N., GRUSON, A. & SUSINI, P. (2013): Detectability study of warning signals in urban background noises: A first step for designing the sound of electric vehicles, *ICA 2013*, Montreal, Kanada
- National Federation of the Blind (2010): Committee on Automobile and Pedestrian Safety/Quiet Cars. Retrieved from <http://quietcars.nfb.org/>
- Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung (2009): <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/nationaler-entwicklungsplan-elektromobilitaet-der-bundesregierung,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Juli 2013]
- PARIZET, E., ROBART, R., CHAMARD, J. C., SCHLITTENLACHER, J., PONDROM, P., ELLERMEIER, W., BIANCARDI, F., JANSSENS, K., SPEED-ANDREWS, P., COCKRAM J. & HATTON, G. (2013): Detectability and annoyance of warning sounds for electric vehicles, *ICA 2013*, Montreal, Kanada
- PARIZET, E., ELLERMEIER W. & ROBART, R. (2014): Auditory warnings for electric vehicles: Detectability in normal-vision and visually-impaired listeners. *Applied Acoustics*. 86, pp. 50-58
- PEDERSEN, T. H. (2010): White paper on external warning sounds for electric cars –

Recommendations and guidelines. AV 1224/10, DELTA, Denmark

ROBART, R. L. & ROSENBLUM, L. D. (2009): Are hybrid cars too quiet? *Journal of the Acoustical Society of America*, 125, p. 2774

SCHLAG, B. [Hrsg] (2008): *Leistungsfähigkeit und Mobilität im Alter*. Köln: Eugen-Otto-Butz-Stiftung

USA (2011): United States of America „Pedestrian Safety Enhancement Act of 2010“ (Public Law 111-373, January 4, 2011)

WALL EMERSON, R. & SAUERBURGER, D. (2008): Detecting approaching vehicles at streets with no traffic control. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 102, p. 747-760

WALL EMERSON, R., NAGHSHINEH, K., HAPEMAN, J. & WIENER, W. (2011): A pilot study of pedestrians with visual impairments detecting traffic gaps and surges containing hybrid vehicles. *Transportation Research Part F*, 14, p. 117-127

WIENER, W. R., NAGHSHINEH, K., SALISBURY, B. & ROZEMA, J. (2006): The impact of hybrid vehicles on street crossings. *Journal of RE:view: Rehabilitation and Education for Blindness and Visual Impairment*, 38 (2), p. 65-78

Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2012): *Herausforderungen bei der Entwicklung der Elektromobilität in Deutschland*. *Straßenverkehrstechnik* 1.2012, pp. 11-19

YAMAUCHI, K., MENZEL, D., FASTL, H., TAKADA, M., NAGAHATA, K. & IWAMIYA, S. (2011): Crosscultural study on feasible sound levels of possible warning sounds for quiet vehicles. In: *Proc. InterNoise 2011*, Osaka

## 6 Anhang

### Erweiterte Probandenbeschreibung der audio-visuellen Versuche (Kapitel 3)

Merkmal	Ausprägung	Anzahl	Anteil
Brille	ja	20	36 %
	nein	35	64 %
Visus	$\leq 0,1$	8	15 %
	$0,1 < V \leq 0,8$	7	13 %
	$V \geq 0,9$	40	72 %

### Inferenzstatistik Parkplatzsituation der audio-visuellen Versuche (Kapitel 3.2)

	nicht normalsichtig	normalsichtig
<b>Einfluss Fahrzeuggeräusch auf Blickverhalten</b>		
Anzahl der Fixationen: (Fixation Count)	Varianzen homogen ANOVA nicht sig.	Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 3,913$ , $p = 0,004$ Kontraste (Bonferroni): sig.
Fixationsdauer (Net Dwell Time)	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 2,668$ , $p = 0,032$ Kontraste (Dunnnett-T3): sig.	Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 6,339$ , $p < 0,001$ Kontraste (Bonferroni): sig.
Dauer bis erste Betrachtung (Entry Time)	Varianzen nicht homogen ANOVA nicht sig.	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 4,493$ , $p = 0,001$ Kontraste (Dunnnett-T3): sig.
<b>Hintergrundgeräusch</b>		
Reaktionszeit	Varianzen nicht homogen ANOVA nicht sig. ( $F = 1,469$ , $p = 0,226$ )	Varianzen homogen ANOVA sig. ( $F = 32,322$ , $p < 0,001$ )
Fixationsdauer (Net Dwell Time)	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. ( $F = 0,118$ , $p = 0,665$ )	Varianzen homogen ANOVA sig. ( $F = 4,181$ , $p = 0,041$ )
Dauer bis erste Betrachtung (Entry Time)	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. ( $F = 11,798$ , $p = 0,001$ )	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. ( $F = 7,090$ , $p = 0,008$ )
<b>Störgeräusch vorhanden</b>		
Reaktionszeit	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. ( $F = 0,004$ , $p = 0,949$ )	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. ( $F = 0,347$ , $p = 0,556$ )
Anzahl der Fixationen: (Fixation Count)	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. ( $F = 2,165$ , $p = 0,142$ )	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. ( $F = 12,160$ , $p < 0,001$ )
Fixationsdauer (Net Dwell Time)	Varianzen homogen ANOVA sig. ( $F = 6,462$ , $p = 0,011$ )	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. ( $F = 11,543$ , $p = 0,001$ )
Dauer bis erste Betrachtung (Entry Time)	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. ( $F = 0,134$ , $p = 0,715$ )	Varianzen nicht homogen ANOVA nicht sig. ( $F = 2,489$ , $p = 0,115$ )

**Inferenzstatistik Parkplatzsituation der audio-visuellen Versuche (Kapitel 3.2) (Fortsetzung)**

	nicht normalsichtig	normalsichtig
<b>Art des Störgeräusches</b>		
Reaktionszeit	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. (F = 0,041, p = 0,960)	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. (F = 0,853, p = 0,426)
Anzahl der Fixationen: (Fixation Count)	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. (F = 2,726, p = 0,067)	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. (F = 9,775, p < 0,001)
Fixationsdauer (Net Dwell Time)	Varianzen homogen ANOVA sig. (F = 5,461, p = 0,005)	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. (F = 14,216, p < 0,001)
Dauer bis erste Betrachtung (Entry Time)	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. (F = 0,744, p = 0,476)	Varianzen nicht homogen ANOVA nicht sig. (F = 1,521, p = 0,219)
<b>Abstand des Störgeräusches</b>		
Reaktionszeit	Varianzen homogen ANOVA sig. (F = 6,415, p < 0,001)	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. (F = 49,413, p < 0,001)
Anzahl der Fixationen: (Fixation Count)	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. (F = 0,639, p = 0,635)	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. (F = 36,561, p < 0,001)
Fixationsdauer (Net Dwell Time)	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. (F = 1,758, p = 0,138)	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. (F = 63,659, p < 0,001)
Dauer bis erste Betrachtung (Entry Time)	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. (F = 6,475, p < 0,001)	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. (F = 74,706, p < 0,001)
<b>Geschlecht</b>		
Reaktionszeit	ANOVA sig. (F = 29,425, p < 0,001)	ANOVA sig. (F = 6,806, p = 0,009)
Anzahl der Fixationen: (Fixation Count)	ANOVA nicht sig. (F = 0,438, p = 0,508)	ANOVA nicht sig. (F = 2,153, p = 0,142)
Fixationsdauer (Net Dwell Time)	ANOVA nicht sig. (F = 1,758, p = 0,186)	ANOVA sig. (F = 3,929, p = 0,048)
Dauer bis erste Betrachtung (Entry Time)	ANOVA nicht sig. (F = 0,039, p = 0,843)	ANOVA nicht sig. (F = 1,102, p = 0,294)
<b>Fahrzeugposition</b>		
Reaktionszeit	Varianzen homogen ANOVA sig. F = 13,354, p < 0,001 Kontraste (Bonferroni): sig.	Varianzen homogen ANOVA sig. F = 114,217, p < 0,001 Kontraste (Bonferroni): sig.
Anzahl der Fixationen: (Fixation Count)	Varianzen homogen ANOVA sig. F = 6,456, p < 0,001 Kontraste (Bonferroni): sig.	Varianzen homogen ANOVA sig. F = 127,968, p < 0,001 Kontraste (Bonferroni): sig.
Fixationsdauer (Net Dwell Time)	Varianzen homogen ANOVA sig. F = 9,879, p < 0,001 Kontraste (Bonferroni): sig.	Varianzen homogen ANOVA sig. F = 274,620, p < 0,001 Kontraste (Bonferroni): sig.
Dauer bis erste Betrachtung (Entry Time)	Varianzen homogen ANOVA sig. F = 26,785, p < 0,001 Kontraste (Bonferroni): sig.	Varianzen homogen ANOVA sig. F = 233,589, p < 0,001 Kontraste (Bonferroni): sig.

### Inferenzstatistik Parkplatzsituation der audio-visuellen Versuche (Kapitel 3.2) (Fortsetzung)

	nicht normalsichtig	normalsichtig
<b>Videoversion</b>		
Reaktionszeit	Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 5,840$ , $p = 0,003$ Kontraste (Bonferroni): sig.	Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 62,865$ , $p < 0,001$ Kontraste (Bonferroni): sig.
Anzahl der Fixationen: (Fixation Count)	Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 3,858$ , $p = 0,022$ Kontraste (Bonferroni): sig.	Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 97,172$ , $p < 0,001$ Kontraste (Bonferroni): sig.
Fixationsdauer (Net Dwell Time)	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 6,898$ , $p = 0,001$ Kontraste (Dunnnett-T3): sig.	Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 137,576$ , $p < 0,001$ Kontraste (Bonferroni): sig.
Dauer bis erste Betrachtung (Entry Time)	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 4,395$ , $p = 0,013$ Kontraste (Dunnnett-T3): sig.	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 63,618$ , $p < 0,001$ Kontraste (Dunnnett-T3): sig.

### Inferenzstatistik Anhaltesituation der audio-visuellen Versuche (Kapitel 3.3)

	nicht normalsichtig	normalsichtig
<b>Fahrzeuggeräusch bei visuell und akustisch anhaltenden Fahrzeugen (AOI = 1)</b>		
Reaktionszeit	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 3,288$ , $p = 0,011$ Kontraste (Dunnnett-T3): sig.	Varianzen nicht homogen ANOVA nicht sig. $F = 1,909$ , $p = 0,107$
Anzahl der Fixationen: (Fixation Count)	Varianzen nicht homogen ANOVA nicht sig. $F = 0,236$ , $p = 0,918$	Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 2,756$ , $p = 0,027$ Kontraste (Bonferroni): n. sig.
Fixationsdauer (Net Dwell Time)	Varianzen nicht homogen ANOVA nicht sig. $F = 0,109$ , $p = 0,979$	Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 3,836$ , $p = 0,004$ Kontraste (Bonferroni): sig.
Dauer bis erste Betrachtung (Entry Time)	Varianzen nicht homogen ANOVA nicht sig. $F = 1,580$ , $p = 0,182$	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. $F = 1,893$ , $p = 0,109$
<b>Fahrzeuggeräusch bei visuell und akustisch anhaltenden Fahrzeugen (AOI = 2, 3, 4)</b>		
Fahrzeugfront	Entry Time Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 4,836$ , $p = 0,001$ Kontraste (Bonferroni): sig.	Entry Time Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 23,256$ , $p < 0,001$ Kontraste (Dunnnett-T3): sig.
Fahrerfenster	Entry Time Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 5,454$ , $p = 0,049$ Kontraste (Bonferroni): n. sig.	Entry Time Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 8,087$ , $p < 0,001$ Kontraste (Bonferroni): sig.
Reifen	Entry Time Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 5,735$ , $p < 0,001$ Kontraste (Dunnnett-T3): sig.	Entry Time Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 23,993$ , $p < 0,001$ Kontraste (Dunnnett-T3): sig.

**Inferenzstatistik Anhaltesituation der audio-visuellen Versuche (Kapitel 3.3) (Fortsetzung)**

	nicht normalsichtig	normalsichtig
<b>Hintergrundgeräusch bei visuell und akustisch anhaltenden Fahrzeugen (Blickdaten für Gesamtfahrzeug: AOI = 1)</b>		
Reaktionszeit	ANOVA nicht sig. $F = 0,938$ , $p = 0,333$	ANOVA nicht sig. $F = 0,550$ , $p = 0,459$
Anzahl der Fixationen: (Fixation Count)	ANOVA nicht sig. $F = 0,016$ , $p = 0,900$	ANOVA nicht sig. $F = 1,159$ , $p = 0,282$
Fixationsdauer (Net Dwell Time)	ANOVA nicht sig. $F = 0,247$ , $p = 0,620$	ANOVA nicht sig. $F = 0,676$ , $p = 0,411$
Dauer bis erste Betrachtung (Entry Time)	ANOVA nicht sig. $F = 0,196$ , $p = 0,658$	ANOVA nicht sig. $F = 3,482$ , $p = 0,062$
<b>Geschlecht bei visuell und akustisch anhaltenden Fahrzeugen (Blickdaten für Gesamtfahrzeug: AOI = 1)</b>		
Reaktionszeit	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 3,965$ , $p = 0,047$	Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 9,788$ , $p = 0,002$
Anzahl der Fixationen: (Fixation Count)	Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 52,798$ , $p < 0,001$	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 10,520$ , $p = 0,001$
Fixationsdauer (Net Dwell Time)	Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 34,402$ , $p < 0,001$	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 12,548$ , $p < 0,001$
Dauer bis erste Betrachtung (Entry Time)	Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 8,105$ , $p < 0,001$	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. $F = 1,861$ , $p = 0,173$
<b>Videoversion bei visuell und akustisch anhaltenden Fahrzeugen (Blickdaten für Gesamtfahrzeug: AOI = 1)</b>		
Reaktionszeit	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 12,209$ , $p < 0,001$ Kontraste (Dunnett-T3): sig.	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 14,860$ , $p < 0,001$ Kontraste (Dunnett-T3): sig.
Anzahl der Fixationen: (Fixation Count)	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. $F = 0,872$ , $p = 0,482$	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 11,257$ , $p < 0,001$ Kontraste (Dunnett-T3): sig.
Fixationsdauer (Net Dwell Time)	Varianzen homogen ANOVA nicht sig. $F = 1,125$ , $p = 0,346$	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 16,582$ , $p < 0,001$ Kontraste (Dunnett-T3): sig.
Dauer bis erste Betrachtung (Entry Time)	Varianzen homogen ANOVA sig. $F = 5,688$ , $p < 0,001$ Kontraste (Bonferroni): sig.	Varianzen nicht homogen ANOVA sig. $F = 12,493$ , $p < 0,001$ Kontraste (Dunnett-T3): sig.

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

### Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

#### 2007

F 61: 2nd International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 1st/2nd September 2006 at Hannover Medical School € 30,00

F 62: Einfluss des Versicherungs-Einstufungstests auf die Belange der passiven Sicherheit  
Rüter, Zoppke, Bach, Carstengerdes € 16,50

F 63: Nutzerseitiger Fehlgebrauch von Fahrerassistenzsystemen  
Marberger € 14,50

F 64: Anforderungen an Helme für Motorradfahrer zur Motorradsicherheit  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Schüler, Adolph, Steinmann, Ionescu € 22,00

F 65: Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbeleuchtung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Fahrzeugsicherheit  
Manz, Kooß, Klinger, Schellinger € 17,50

#### 2008

F 66: Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen  
Jebas, Schellinger, Klinger, Manz, Kooß € 15,50

F 67: Optimierung von Kinderschutzsystemen im Pkw  
Weber € 20,00

F 68: Cost-benefit analysis for ABS of motorcycles  
Baum, Westerkamp, Geißler € 20,00

F 69: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland  
Auerbach, Issing, Karrer, Steffens € 18,00

F 70: Einfluss verbesserter Fahrzeugsicherheit bei Pkw auf die Entwicklung von Landstraßenunfällen  
Gail, Pöppel-Decker, Lorig, Eggers, Lerner, Ellmers € 13,50

#### 2009

F 71: Erkennbarkeit von Motorrädern am Tag – Untersuchungen zum vorderen Signalbild  
Bartels, Sander € 13,50

F 72: 3rd International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 5th / 6th September 2008 at Hannover Medical School € 29,50

F 73: Objektive Erkennung kritischer Fahrsituationen von Motorrädern  
Seiniger, Winner € 16,50

#### 2010

F 74: Auswirkungen des Fahrens mit Tempomat und ACC auf das Fahrverhalten  
Vollrath, Briest, Oeltze € 15,50

F 75: Fehlgebrauch der Airbagabschaltung bei der Beförderung von Kindern in Kinderschutzsystemen  
Müller, Johannsen, Fastenmaier € 15,50

#### 2011

F 76: Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Bovenkerk, Gies, Urban € 19,50

F 77: 4th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden. € 29,50

F 78: Elektronische Manipulation von Fahrzeug- und Infrastruktursystemen  
Dittmann, Hoppe, Kiltz, Tuchscheerer € 17,50

F 79: Internationale und nationale Telematik-Leitbilder und IST-Architekturen im Straßenverkehr  
Boltze, Krüger, Reusswig, Hillebrand € 22,00

F 80: Untersuchungskonzepte für die Evaluation von Systemen zur Erkennung des Fahrerzustands  
Eichinger € 15,00

F 81: Potential aktiver Fahrwerke für die Fahrsicherheit von Motorrädern  
Wunram, Eckstein, Rettweiler € 15,50

F 82: Qualität von on-trip Verkehrsinformationen im Straßenverkehr – Quality of on-trip road traffic information – BAST-Kolloquium 23. & 24.03.2011  
Lotz, Luks € 17,50  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.

#### 2012

F 83: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung – Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe  
Gasser, Arzt, Ayoubi, Bartels, Bürkle, Eier, Flemisch, Häcker, Hesse, Huber, Lotz, Maurer, Ruth-Schumacher, Schwarz, Vogt € 19,50

F 84: Sicherheitswirkungen von Verkehrsinformationen – Entwicklung und Evaluation verschiedener Warnkonzepte für Stauendwarnungen  
Bogenberger, Dinkel, Totzke, Naujoks, Mühlbacher € 17,00

F 85: Cooperative Systems Stakeholder Analysis  
Schindhelm, Calderaro, Udin, Larsson, Kernstock, Jandrisits, Ricci, Geißler, Herb, Vierkötter € 15,50

#### 2013

F 86: Experimentelle Untersuchung zur Unterstützung der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen für ältere Kraftfahrer  
Hoffmann, Wipking, Blanke, Falkenstein € 16,50

F 87: 5th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 88: Comparative tests with laminated safety glass panes and polycarbonate panes  
Gehring, Zander € 14,00

F 89: Erfassung der Fahrermüdigkeit  
Platho, Pietrek, Kolrep € 16,50

F 90: Aktive Systeme der passiven Fahrzeugsicherheit  
Nuß, Eckstein, Berger € 17,90

F 91: Standardisierungsprozess für offene Systeme der Straßenverkehrstelematik  
Kroen € 17,00

F 92: Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung  
Beyer, Blumenschein, Bönninger, Grohmann, Lehmann, Meißner, Paulan, Richter, Stiller, Calker € 17,00

## 2014

F 93: Entwicklung eines Verfahrens zur Erfassung der Fahrerbeanspruchung beim Motorradfahren  
Buld, Will, Kaussner, Krüger € 17,50

F 94: Biokraftstoffe – Fahrzeugtechnische Voraussetzungen und Emissionen  
Pellmann, Schmidt, Eckhardt, Wagner € 19,50

F 95: Taxonomie von Fehlhandlungen bei der Fahrzeugführung  
Oehme, Kolrep, Person, Byl € 16,50

F 96: Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von Pkw  
Schönemann, Henze € 15,50

F 97: Matrix von Lösungsvarianten Intelligenter Verkehrssysteme (IVS) im Straßenverkehr  
Matrix of alternative implementation approaches of Intelligent Transport Systems (ITS) in road traffic  
Lotz, Herb, Schindhelm, Vierkötter  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 98: Absicherungsstrategien für Fahrerassistenzsysteme mit Umfeldwahrnehmung  
Weitzel, Winner, Peng, Geyer, Lotz Sefati € 16,50

F 99: Study on smoke production, development and toxicity in bus fires  
Hofmann, Dülsen € 16,50

## 2015

F 100: Verhaltensbezogene Kennwerte zeitkritischer Fahrmanöver  
Powelleit, Muhrer, Vollrath, Henze, Liesner, Pawellek € 17,50

F 101: Altersabhängige Anpassung von Menschmodellen für die passive Fahrzeugsicherheit  
Wagner, Segura, Mühlbauer, Fuchs, Peldschus, Freßmann € 19,00

F 102: 6<sup>th</sup> International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 103: Technische Möglichkeiten für die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Nutzfahrzeugen  
Süßmann, Lienkamp  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 104: Abbiege-Assistenzsystem für Lkw – Grundlagen eine Testverfahrens  
Schreck, Seiniger € 14,50

F 105: Abgasverhalten von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Feldüberwachung  
Schmidt, Georges € 14,50

F 105b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – In-service conformity  
Schmidt, Johannsen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 106: Untersuchung des Abgasverhaltens von in Betrieb befindlichen Fahrzeugen und emissionsrelevanten Bauteilen – Austauschkatalysatoren  
Schmidt, Johannsen € 13,50

F 106b: Examination of pollutants emitted by vehicles in operation and of emission relevant components – Replacement catalytic converters  
Schmidt, Johannsen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 107: Sicherheitsaspekte beim Laden von Elektrofahrzeugen  
Vogt, Link, Ritzinger, Ablingyte, Reindl in Vorbereitung

F 108: Interoperabilität zwischen öffentlichem Verkehrsmanagement und individuellen Navigationsdiensten – Maßnahmen zur Gewährleistung  
von der Ruhren, Kirschfink, Ansorge, Reusswig, Riegelhuth, Karina-Wedrich, Schopf, Sparmann, Wöbbeking, Kannenberg € 17,50

F 109: Ermittlung des Umfangs von Abweichungen bei Durchführung der Abgasuntersuchung zwischen Messung am Auspuff und Abfrage des On-Board-Diagnosesystems  
Schröder, Steickert, Walther, Ranft  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 110: Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen  
Altinsoy, Landgraf, Rosenkranz, Lachmann, Hagen, Schulze, Schlag  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7  
28195 Bremen  
Tel. (0421) 3 69 03-53  
Fax (0421) 3 69 03-48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.