

Manuel Kurt Fernand Petersen

**Entwicklung einer Validierungsumgebung im
IPEK-X-in-the-Loop-Framework und Ableitung
einer Validierungsmethodik für
emotionalisierende Sound Designs zur
Beeinflussung des Fahrverhaltens am Beispiel
der Erhöhung des Sicherheitsabstands**

Development of a Validation Environment in the
IPEK-X-in-the-Loop Framework and derivation of a
Validation Methodology for Emotionalising Sound
Designs to influence Driving Behaviour using the
example of increasing the Safety Distance

Band 193

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
(Hrsg.)

Entwicklung einer Validierungsumgebung im IPEK-X-in-the-Loop-Framework und Ableitung einer Validierungsmethodik für emotionalisierende Sound Designs zur Beeinflussung des Fahrverhaltens am Beispiel der Erhöhung des Sicherheitsabstands

Band 193

Herausgeber Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2026
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Universität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1615-8113

Entwicklung einer Validierungsumgebung im IPEK-X-in-the-Loop-Framework und Ableitung einer Validierungsmethodik für emotionalisierende Sound Designs zur Beeinflussung des Fahrverhaltens am Beispiel der Erhöhung des Sicherheitsabstands

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Manuel Kurt Fernand Petersen

Tag der mündlichen Prüfung:	12.12.2025
Hauptreferent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
Korreferentin:	Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Psych. Barbara Deml

Vorwort der Herausgeber

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 193

Die Produktentwicklung von Fahrzeugen sieht sich durch technologische Transformationen gefordert. Elektrifizierung, Automatisierung und die zunehmende Digitalisierung verändern nicht nur die funktionalen Anforderungen zukünftiger Mobilitätssysteme, sondern ebenso die Art und Weise, wie diese Systeme wahrgenommen und erlebt werden. Durch die große Vielfalt neuer Antriebssysteme – insbesondere mit dem, zwar noch relativ langsamen, aber doch stetigen Fortschritt der batterieelektrischen Fahrzeuglösungen und der Hybridfahrzeuglösungen in der Akzeptanz im Markt – treten neue Herausforderung im Bereich Noise, Vibration and Harshness (NVH) auf. Geräusche und Klangcharakter eines Fahrzeugs werden damit, gerade auch mit diesen neuen Antriebslösungen, zu einem zentralen Merkmal der User Experience und auch zu Trägern von Markenidentität und emotionaler Bindung der Kunden und Benutzer.

Während herkömmliche akustische Entwicklungsprozesse primär auf die Reduktion unerwünschter Geräusche fokussierten, gewinnt heute die gezielte Gestaltung auditiver Reize an Bedeutung. Zwar wurden auch in den vergangenen Jahrzehnten – insbesondere im Bereich der Oberklasse – Sounds, wie zum Beispiel das Geräusch beim Schließen einer Tür, bereits optimiert, um eine Markenidentität auszudrücken, doch die moderne Produktentwicklung erkennt Sound-Design als einen integralen Bestandteil der Fahrzeugentwicklung. Es geht darum, funktionale und emotionale Anforderungen in Balance zu bekommen. Die Wahrnehmung von Klang wird aber nicht allein durch physikalische Schaltparameter bestimmt, sondern in einem starken Maße auch durch psychologische und emotionale Prozesse beeinflusst. Damit rückt die Frage nach einer Methodik zur Entwicklung und Validierung emotional wirkender Soundkonzepte in den Mittelpunkt.

Es reicht nicht mehr, die Geräusche zu messen oder zu synthetisieren, sie müssen als Elemente des Gesamtsystems verstanden werden, das Mensch, Technik und Umwelt verbindet. Diese Sichtweise entspricht dem systematischen Ansatz der KaSPRO – Karlsruher Schule für Produktentwicklung, die in der Synthese von systemischen Lösungen und der Validierung als kontinuierlichem Erkenntnisprozess zwischen Ziel-, Objekt- und Handlungssystem verankert ist. Die KaSPRO fokussiert dabei insbesondere auf systemischer Ebene die Sicherstellung des Kunden-, des Anwender- und des Anbieternutzens, durch eine strukturierte auf der Systemtheorie basierende Vorgehensweise. Die vorliegende Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Manuel Petersen greift die Herausforderungen auf, indem sie eine Methodik für emotionalisierendes Sound Design (ESD) entwickelt und dessen Wirkung und Validierbarkeit im Rahmen der Systemgenerationsentwicklung (SGE) unterstützt. Die von Herrn Petersen erforschte und gestaltete Methodik soll in der Praxis helfen, das

Sound Design strukturiert anzugehen. Auch steht diese Methode exemplarisch für die Verbindung von ingenieurwissenschaftlicher Forschung mit psychologisch human orientierter Forschung, wobei als klarer Schwerpunkt die Nutzung der Erkenntnisse aus der Forschung auf dem Gebiet der Psychologie für die strukturierte Synthese und Gestaltung von technischen Lösungen zu sehen ist. Es geht darum, wie Erkenntnisse zur emotionalen Wahrnehmung in die methodische Logik der Produktentwicklung integriert werden können.

Herr Dr.-Ing. Manuel Petersen hat mit seiner Forschungsarbeit sowohl einen wichtigen Beitrag in der Grundlagenforschung zur Methodik der Produktentwicklung geleistet als auch wertvolle und praxisrelevante Beiträge für die moderne Fahrzeugentwicklung in den Unternehmen geleistet.

Januar, 2026

Albert Albers

Kurzfassung

Der Stand der Forschung im Bereich der Wirkung auditiver Reize auf Emotionen zeigt, dass Emotionen durch bestimmte Tonkombinationen und Klangcharakteristiken induziert und verändert werden können. Ergebnisse aus dem Bereich der Verkehrspsychologie zeigen wiederum, dass Emotionen das Fahrverhalten beeinflussen. Trotz dieser Erkenntnisse fehlt es bisher an Forschung, die untersucht, wie emotionalisierende künstliche Fahrzeuggeräusche das Fahrverhalten über eine Induktion von Emotionen beeinflussen können.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird deshalb untersucht, ob ein emotionsstimulierendes, künstlich erzeugtes aktives Fahrzeuggeräusch (emotionalisierendes Sound Design) das Fahrverhalten und damit die Verkehrssicherheit beeinflussen kann. Im Rahmen des Sound Designs soll die Induktion von Angst bzw. Bedrohung durch ein entsprechend gestaltetes emotionalisierendes aktives Sound Design für eine Beeinflussung des Fahrverhaltens genutzt werden. Zur Erhöhung der Verkehrssicherheit wird eine positive Beeinflussung des gefahrenen Sicherheitsabstands angestrebt. Für die Untersuchung der Wirkung von Sounds auf Emotionen, auf die Wahrnehmung von Sicherheitsabständen und auf das Fahrverhalten in Bezug auf Sicherheitsabstände wurden drei Probandenstudien durchgeführt:

Für die erste Studie wurden mehrere potenziell emotionalisierenden Sounds generiert. Diese wurden in einer Probandenstudie hinsichtlich ihrer emotionalen Wirkung bewertet. Hierdurch wurden Sounds identifiziert, die als Basis für die Entwicklung eines emotionalisierenden Sound Designs genutzt werden können. Des Weiteren wurden die Klangcharakteristiken der Sounds unter Verwendung psychoakustischer Analysen quantifiziert, um mögliche objektive Optimierungsgrößen für eine emotionalisierende Wirkung zu identifizieren. Die Studie zeigt, dass bestimmte Klangcharakteristiken wie Schwankungsstärke, Impulshaltigkeit und Tonhaltigkeit innerhalb der Sounds mit der Wahrnehmung von Bedrohung und Angst korrelieren.

In der zweiten Studie wurde die Wirkung ausgewählter emotional effektiver Sounds der ersten Studie sowie auf Basis der Erkenntnisse aus der ersten Studie neu erzeugter emotionalisierender Sounds auf die Wahrnehmung von Sicherheitsabständen in einer Online-Videostudie untersucht. Die Ergebnisse zeigen signifikante Unterschiede bzgl. des quantitativ geschätzten Sicherheitsabstands, wobei bedrohliche Sounds zu einer niedrigeren Schätzung führten. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Sicherheitsabstand als zu gering im Vergleich zu

angemessen bewertet wurde, war bei einigen bedrohlichen Sounds zwei- bis dreimal höher als bei den positiven Sounds. Bedrohliche Sounds führten mehrheitlich auch zu einer Erhöhung der gewünschten Änderung des Sicherheitsabstands.

Die dritte Studie untersuchte die Wirkung eines auf Basis der zuvor identifizierten und optimierten Sounds entwickelten emotionalisierenden Sound Designs auf das Fahrverhalten in einem Fahrsimulator. Dabei wurde ein dynamisches Sound Design getestet, das basierend auf dem Zeitabstand (Sicherheitsabstand in Sekunden) von einem beruhigenden positiven Sound zu einem bedrohlichen negativen Sound bei niedrigem Zeitabstand überführt wird. Die Ergebnisse zeigen, dass das Sound Design das Fahrverhalten innerhalb von Teilnehmenden positiv beeinflusste, indem es die Dauer des Fahrens in niedrigen Zeitabstands-Bereichen verringerte und den durchschnittlichen Zeitabstand in den meisten Fällen erhöhte.

Um die Erforschung und Entwicklung von emotionalisierenden Sound Designs zukünftig unterstützen zu können, wird im zweiten Teil der Arbeit eine Validierungskonfiguration sowie eine Validierungsmethodik auf Basis der durchgeführten Untersuchungen abgeleitet.

Das Validierungsframework sowie dessen Validierungskonfigurationen wurden auf Basis der für die Studien verwendeten Versuchsumgebungen sowie des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes entwickelt, um eine kontinuierliche Validierung von einer frühen Entwicklungsphase bis zur prototypischen Umsetzung eines emotionalisierenden Sound Design zu ermöglichen. Über die durchgeführten Studien hinaus wurde eine technische Lösung entwickelt, die eine Validierung eines emotionalisierenden Sound Design in realen Fahrzeugen ermöglicht. Abschließend wurde eine Validierungsmethodik gemäß des Forschungsstandes der KaSPro – Karlsruher Schule der Produktentwicklung nach Albers auf Basis des methodischen Vorgehens der Studien abgeleitet. Diese soll Entwickelnde zukünftig bei der kontinuierlichen Validierung emotionalisierender Sound Designs im Rahmen des Entwicklungsprozesses von der Findung erster zielführender Sounds bis hin zur prototypischen Umsetzung des Sound Designs unterstützen.

Diese Dissertation leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung und Validierung von emotionalisierenden Sound Designs zur Erhöhung der Verkehrssicherheit.

Abstract

The current state of research on the effect of auditory stimuli on emotions demonstrates that emotions can be altered by certain combinations of tones and sound characteristics. Research in traffic psychology, on the other hand, indicates that emotions influence driving behaviour. Despite these insights, there is a lack of research investigating how different emotionalizing artificial vehicle sounds can influence driving behaviour through emotions.

The first part of this thesis therefore examines whether an emotionally stimulating, artificially generated active vehicle sound (emotionalising sound design) can influence driving behaviour and thus road safety. In the context of sound design, the induction of fear or threat is to be used to influence driving behaviour by means of an appropriately designed emotionalising active sound design. In order to increase road safety, the aim is to positively influence the driving safety distance. Three test subject studies were conducted to investigate the effect of sounds on emotions, on the perception of safety distances and on driving behaviour in relation to safety distances:

For the first study, a set of potentially emotionalizing sounds was generated. These were evaluated in a subject study regarding their emotional impact. This identified sounds that could be used as the basis for developing an emotionalizing sound design. Additionally, the sounds were quantified in terms of their sound characteristics using psychoacoustic analyses to identify possible objective optimization parameters for an emotionalizing effect. The study showed that certain sound characteristics such as fluctuation strength and impulsiveness within the sounds correlated with the perception of threat and fear.

In the second study, the impact of a selection of the evaluated sounds, as well as newly generated emotionalizing sounds based on the former findings, on the perception of safety distances in an online video study was investigated. The results showed significant differences in the estimated safety distance, with threatening sounds leading to a lower estimation and an increased desire for a greater distance. The probability that the safety distance was rated as too short compared to appropriate was two to three times higher for some threatening sounds compared to positive sounds.

The third study investigated the impact of an emotionalizing sound design, developed based on the identified and optimized sounds, on driving behaviour in a driving simulator. A dynamic sound design was tested, which switches between a calming positive sound and a threatening negative sound at a low time headway (safety

distance in seconds). The results showed that the sound design positively influenced driving behaviour by reducing the duration of driving in low time headway areas and largely increasing the average time headway.

To support the future research and development of emotionalizing sound designs, a validation configuration and validation methodology were derived in the second part of the work based on the conducted studies. The validation framework and its configurations were developed based on the experimental environments used for the studies and the IPEK-X-in-the-Loop approach to enable continuous validation from an early development phase to the prototype implementation of an emotionalizing sound design. Beyond the conducted studies, a technical solution was developed to enable validation of an emotionalizing sound design in real vehicles. Finally, a validation methodology according to the state of research of the KaSPPro - Karlsruhe School of Product Development by Albers was derived from the methodological investigations within the studies. In future, this should support developers in the continuous validation of emotionalising sound designs as part of the development process, from finding the first target-oriented sounds up to the prototypical implementation of the sound design.

This dissertation thus makes an important contribution to the development and validation of emotionalizing sound designs for enhancing traffic safety.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe NVH und Systemvalidierung am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Mein größter Dank gilt meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers, der mich in meinem Werdegang als hilfswissenschaftlicher Mitarbeiter, Studien- und Diplomarbeiter sowie wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK ganz wesentlich geprägt hat. Insbesondere möchte ich mich für die sehr angenehme und hilfreiche Betreuung über die Jahre bedanken, die mir stets Freiheiten bei der Durchführung der Forschungstätigkeit gewährte, mich mit Expertise bei Fragen aller Art unterstützte und das Zielsystem nicht aus den Augen verlieren ließ.

Frau Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Psych. Barbara Deml danke ich herzlich für die Möglichkeit der Nutzung des Fahrsimulators für meine Forschung, sowie den sehr angenehmen und hilfreichen wissenschaftlichen Austausch. Darüber hinaus gilt mein Dank auch für die Übernahme des Korreferats dieser Arbeit.

Außerdem möchte ich mich bei Frau Dipl.-Ing. Katharina Bause für den sehr angenehmen wissenschaftlichen Austausch sowie die Unterstützung bis zum Ende des Promotionsprozesses danken.

Des Weiteren bedanke ich mich beim gesamten IPEK-Team für die wissenschaftlichen Diskussionen, die angenehme Zusammenarbeit, administrative und technische Unterstützung sowie das tolle Arbeitsklima. Besonders danke ich den ehemaligen Mitarbeitern der Forschungsgruppe NVH und Systemvalidierung für die entstandenen Freundschaften.

Zudem danke ich den hilfswissenschaftlichen Mitarbeitern und Abschlussarbeiter*innen, die indirekt und direkt zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie für die immerwährende Unterstützung und den Rückhalt auf meinem Lebens- und Bildungsweg. Insbesondere meiner Frau Christine Petersen für die unermessliche, stetige Unterstützung - von seelisch bis wissenschaftlich - über Berg und Tal. Und natürlich Mile.

Vielen Dank Ihnen und euch für das Ermöglichen dieser Arbeit.

Karlsruhe, den 9. Februar 2026

Manuel Petersen

„When I started to count my blessings, my whole world turned around.“
Willie Nelson

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Inhaltsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xxi
Abkürzungsverzeichnis	xxv
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung	3
2.1 Der Produktentstehungsprozess	3
2.1.1 Produktentwicklung im erweiterten ZHO-Modell	3
2.1.2 Validierung im Produktentstehungsprozess	4
2.1.3 IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz	7
2.2 Sicherheitsabstand und Zeitabstand	12
2.3 Sound Design im Kontext der Mobilität	13
2.3.1 Earcons / Auditory Icons und Fahrverhalten	14
2.3.2 Aktives Sound Design	15
2.3.3 Wirkung von aktivem Sound Design auf das Fahrverhalten	16
2.4 Wechselwirkungen zwischen Emotionen, auditiven Reizen und Fahrverhalten	16
2.4.1 Emotionen	17
2.4.2 Wirkung von Emotionen und emotionalisierenden Reizen auf das Fahrverhalten	18
2.4.3 Emotionen und auditive Reize	19
2.5 Psychoakustische Größen zur Quantifizierung der Wahrnehmung akustischer Merkmale von auditiven Reizen	21
2.6 Verwendete Prinzipien und Technologien zur Erzeugung, Steuerung und Bearbeitung der emotionalisierenden Sounds und des Sound Designs	23
2.6.1 Additive Klangsynthese zur Erzeugung künstlicher Fahrzeuggeräusche	23
2.6.2 Subtraktive Klangsynthese	24
2.6.3 Audio-Effekte	25
2.6.4 Steuerungsmöglichkeiten von synthetisierten Sounds	26
2.6.5 Software für Soundsynthese und Nachbearbeitung	29

2.7	Versuchsumgebungen, Datenerhebung und Auswertung im Kontext von Probandenversuchen.....	32
2.7.1	Versuchsumgebungen für experimentelle Probandenversuche	32
2.7.2	Datenerhebung	34
2.7.3	Statistische Auswerteverfahren	38
3	Motivation und Zielsetzung	43
3.1	Motivation	43
3.2	Zielsetzung	44
4	Forschungsvorgehen.....	49
5	Identifikation und Eingrenzung von emotionalisierenden Sounds und psychoakustischen Optimierungsgrößen	53
5.1	Methoden und Materialien	55
5.1.1	Stimuli	55
5.1.2	Teilnehmende	60
5.1.3	Methode.....	60
5.2	Ergebnisse.....	61
5.2.1	Emotionalisierende Wirkung der Sounds auf Probanden	62
5.2.2	Assoziierte emotionale Wirkung der Sounds	66
5.2.3	Psychoakustische Analyse	68
5.2.4	Spearman-Rang-Korrelationsanalyse	72
5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	74
5.4	Diskussion	74
5.4.1	Einschränkungen	77
5.5	Folgerungen und Beantwortung der Forschungsfrage	77
6	Soundgenerator zur Erzeugung emotionalisierender Sounds und eines emotionalisierenden Sound Design.....	79
6.1	Sound-Generierung	81
6.1.1	Struktur der dualen additiven Oszillatoren.....	81
6.1.2	Subtraktiver Rauschgenerator.....	83
6.2	Soundveränderung	84
6.2.1	Soundcharakter-Steuerung	84
6.2.2	Amplitudenmodulation.....	85
6.3	Sound-Steuerung.....	86
6.3.1	Akkord-Steuerung	86
6.3.2	Shepard-Risset-Glissando und Tonhöhen Steuerung	86
6.3.3	Fahrmanöver Definition/Aufzeichnung	88
7	Auswirkung von emotionalisierenden Sounds auf die Einschätzung und Bewertung von Sicherheitsabständen	89

7.1	Methoden und Materialien	92
7.1.1	Auditive Stimuli	92
7.1.2	Visuelle Stimuli	97
7.1.3	Teilnehmende	99
7.1.4	Methode	100
7.2	Ergebnisse	104
7.2.1	Empfundene und assoziiert Emotionen gegenüber den Sounds 108	
7.2.2	Schätzung des Sicherheitsabstands unter Einfluss der verschiedenen Sounds	113
7.2.3	Statistische Analyse der Auswirkungen der Sounds auf den geschätzten Sicherheitsabstand und die geforderte Änderung des Sicherheitsabstands.....	116
7.2.4	Statistische Analyse des Einflusses der Sounds auf die Bewertung des Sicherheitsabstands.....	120
7.3	Diskussion	126
7.4	Folgerungen und Beantwortung der Forschungsfrage	128
8	Auswirkung eines emotionalisierenden Sound Designs auf die Wahl des Sicherheitsabstandes.....	131
8.1	Materialien und Methoden	133
8.1.1	Fahrsimulator.....	133
8.1.2	Integration des Soundgenerators in den Fahrsimulator	134
8.1.3	Fahrscenarien.....	137
8.1.4	Auditiver Stimulus	140
8.1.5	Integration des emotionalisierenden Sound Design in die Fahrzeugkabine des Fahrsimulators.....	144
8.1.6	Teilnehmende	152
8.1.7	Methoden	152
8.2	Ergebnisse	157
8.2.1	Deskriptive Statistik basierend auf dem Time Headway im Kontrollgruppen-Setup	157
8.2.2	Statistische Analyse des Effekts des emotionalen Stimulus auf den Time Headway im Kontrollgruppen-Setup.....	161
8.2.3	Deskriptive Statistik basierend auf dem THW im Within- Participants-Setup	164
8.2.4	Statistische Analyse des Effekts des Stimulus auf den THW im Within-Participant-Setup	168
8.2.5	Affektive Bewertung des Stimulus und Wahrnehmung der Situation	171
8.3	Diskussion	172

8.4	Folgerungen und Beantwortung der Forschungsfrage	175
9	Entwicklung einer Validierungsumgebung und Ableitung einer Validierungsmethodik.....	177
9.1	Beschreibung des XiL-Validierungsframeworks für die kontinuierliche Validierung.....	177
9.1.1	Validierungskonfiguration auf WSP-in-the-Loop-Ebene	179
9.1.2	Validierungskonfiguration Subsystem-in-the-Loop-Ebene: Level 2 181	
9.1.3	Validierungskonfiguration Subsystem-in-the-Loop-Ebene: Level 1 183	
9.1.4	Validierungskonfiguration System-in-the-Loop-Layer	186
9.2	CAN-OSC Interface als Koppelsystem zwischen emotionalisierendem Sound Design und Realfahrzeug	189
10	Ableitung einer Methodik zur kontinuierlichen Validierung eines emotionalisierenden Sound Designs.....	195
10.1	Validierungsschritt 1: Validierung der emotionalen Wirkung von entwickelten Sounds	198
10.2	Validierungsschritt 2: Validierung der Wirkung der entwickelten Sounds auf die Wahrnehmung.....	200
10.3	Validierungsschritt 3: Validierung der Wirkung des emotionalisierenden Sound Designs auf das Fahrverhalten	202
10.4	Validierungsschritt 4: Weiterführende Validierung des emotionalisierenden Sound Designs während des realen Fahrens	205
11	Zusammenfassung und Ausblick	209
11.1	Zusammenfassung und Fazit.....	209
11.2	Ausblick	213
	Literaturverzeichnis	I
	Publikationsliste.....	XIX
	Anhang A	XXI
	Fragebogen Probandenstudie zur emotionalen Wirkung von Sounds	XXI
	Anhang B	XXIX
	Fragebogen Studie zur Wahrnehmung von Sicherheitsabständen in Abhängigkeit von emotionalisierenden Sounds.....	XXIX
	Anhang C	XXXIX
	Fragebogen Studie zur Wirkung eines ESD auf das Fahrverhalten.....	XXXIX
	Lebenslauf	XLV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Erweitertes ZHO-Modell nach Albers et al. (2012)	4
Abbildung 2.2:	Design und Validierung im Produktentstehungsprozess nach dem erweiterten ZHO-Modell (Albers, Behrendt et al., 2016)	6
Abbildung 2.3:	IPEK-X-in-the-Loop-(XiL)-Ansatz nach Albers und Düser (2008)	8
Abbildung 2.4:	IPEK-XiL-Framework nach Albers et al. (2008)	9
Abbildung 2.5:	Schalldruckpegel (in dB) von sinusförmigen Klangkomponenten (Shepard-Partiellen), die in Oktavabständen angeordnet sind. Die gestrichelten Linien symbolisieren eine stetige Erhöhung der Frequenzen der Shepard-Partiellen. Die „Threshold“ gibt die Hörgrenze an. (Shepard, 1964)	28
Abbildung 4.1:	Übersicht über das Forschungsvorgehen und das Forschungsdesign inklusive der Forschungsfragen. Zusätzlich werden die Abhängigkeiten zwischen den Untersuchungen und Versuchsumgebungen sowie dem daraus abgeleiteten Validierungsframework und der Validierungsmethodik dargestellt	51
Abbildung 5.1:	Antworthäufigkeit der Probanden in Bezug auf die empfundenen Emotionen während des Hörens von <i>positive_relax_serene_2</i> (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)	62
Abbildung 5.2:	Antworthäufigkeit der Probanden in Bezug auf die empfundenen Emotionen während des Hörens von <i>positive_relax_serene_4</i> . (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)	63
Abbildung 5.3:	Antworthäufigkeit der Probanden in Bezug auf die empfundenen Emotionen während des Hörens von <i>danger_negative_1_overlay_dif_eqd</i> (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)	64
Abbildung 5.4:	Antworthäufigkeit der Probanden in Bezug auf die empfundenen Emotionen während des Hörens von <i>danger_negative_1_overlay</i> (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)	64
Abbildung 5.5:	Antworthäufigkeit der Probanden in Bezug auf die empfundenen Emotionen während des Hörens von	

	<i>serious_serene_negative_2</i> (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)	65
Abbildung 5.6:	Antworthäufigkeit der Probanden in Bezug auf die empfundenen Emotionen während des Hörens von <i>danger_serious_positive</i> (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)	66
Abbildung 5.7:	Mittelwert der Zustimmung der Probanden zu den bipolaren Deskriptoren für die wahrgenommene Wirkung der betrachteten Geräusche. Gesamtsignifikanz des Friedman-Rangsummentests auf der rechten Seite. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)	67
Abbildung 5.8:	Psychoakustische Lautheit, Rauigkeit und Schwankungsstärke, im Zeitverlauf für die 6 betrachteten Geräusche (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)	69
Abbildung 5.9:	Psychoakustische Schärfe, Tonalität und Impulshaltigkeit im Zeitverlauf für die 6 betrachteten Geräusche (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)	70
Abbildung 6.1:	Übersicht User-Interface des Soundgenerators	80
Abbildung 6.2:	Steuerung der Einzeltöne der dualen additiven Oszillatoren Struktur	82
Abbildung 6.3:	Subtraktiver Rauschgenerator zur Erzeugung von metallischen Zisch-Geräuschen	83
Abbildung 6.4:	Soundcharakter-Steuerung für die Fahrzeug-Beschleunigung	84
Abbildung 6.5:	Steuerungsoberfläche der Amplitudenmodulation auf Basis eines externen Steuersignals.....	85
Abbildung 6.6:	Oberfläche für die Einstellungen der Akkorde.....	86
Abbildung 6.7:	Einstellungsoberfläche für das Shepard-Risset-Glissando und die Tonhöhe.....	87
Abbildung 6.8:	Oberfläche für die Definition oder Aufzeichnung und Wiedergabe von Fahrmanövern	88
Abbildung 7.1:	Spektrogramme und Schalldruckpegel der verwendeten akustischen Reize: (a) Sound 1 (Positiv); (b) Sound 2 (Positiv/Neutral); (c) Sound 3 (Negativ); (d) Sound 4 (Negativ); (e) Sound 5 (Sehr negativ) (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)	105
Abbildung 7.2:	Psychoakustische Analyse über die Zeit und gemittelte Einzelwerte der verwendeten akustischen Reize: (a) Lautheit;	

	(b) Schwankungsstärke; (c) Impulshaltigkeit; (d) Tonhaltigkeit (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)	107
Abbildung 7.3:	Antworthäufigkeit der Probanden in Bezug auf die empfundenen Emotionen während des Hörens der fünf Sounds (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)	109
Abbildung 7.4:	Mittelwert der Zustimmung der Probanden zu den bipolaren Deskriptoren für die wahrgenommene Wirkung der betrachteten Geräusche. Gesamtsignifikanz des Friedman-Rangsummentests auf der rechten Seite. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)	111
Abbildung 7.5:	Boxplots zur Schätzung der Sicherheitsabstände aus den gezeigten Videos: aggregiert über die Videos und dargestellt für die fünf Sounds. Die dicke Linie repräsentiert den Median und die gestrichelte Linie den Mittelwert. Die unteren und oberen Grenzen der Box repräsentieren jeweils das 1. und 3. Quartil. Die Whisker repräsentieren $0,25 - 1,5 \text{ IQR}$ / $0,75 + \text{IQR}$ (Interquartilsabstand). Ausreißer werden unabhängig dargestellt. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)	114
Abbildung 7.6:	Prozentsätze der Antworthäufigkeit der Teilnehmenden für die Bewertung der gezeigten Sicherheitsabstände aggregiert über die fünf Videos und dargestellt über die Sounds (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)	115
Abbildung 7.7:	Boxplots für die gewünschte Änderung des Sicherheitsabstands aggregiert über die Videos und dargestellt für die fünf Sounds. Die dicke Linie repräsentiert den Median und die gestrichelte Linie den Mittelwert. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)	116
Abbildung 7.8:	Modellanpassungsanalyse des Vergleichs zwischen beobachteten und vorhergesagten Daten durch das angepasste Modell 4: (a) zeigt das QQ-Diagramm der Residuen mit den Ergebnissen für den KS-Test auf Abweichung, den Dispersionstest und den Ausreißertest. Das Diagramm zeigt die beobachteten Quantile der Daten (dargestellt als Dreiecke) im Vergleich zu den Quantilen, die zu erwarten sind, wenn die Daten normal verteilt wären (rote Linie). (b) zeigt die Residuen gegenüber den vorhergesagten Werten, berechnet über eine Quantilregression, die die empirischen 0.25-, 0.5- und 0.75-Quantile in y-Richtung (durchgezogene Linien) mit den theoretischen 0.25-, 0.5- und 0.75-Quantilen (gestrichelte	

	schwarze Linie) vergleicht. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)	124
Abbildung 8.1:	Fahrsimulator-Setup am Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (ifab) am KIT (Petersen, Deml & Albers, 2024)	134
Abbildung 8.2:	Layouts 1 und 2 der beiden Fahrszenarien für die Fahraufgaben mit den Verkehrs-Sub-Szenarien und den jeweiligen Geschwindigkeitsbegrenzungen (Petersen, Deml & Albers, 2024)	139
Abbildung 8.3:	Spektrogramm des emotionalisierenden Sound Designs. Dargestellt ist der kontinuierliche Übergang vom normalen positiven Sound Design bei THW > 1,8 s zum bedrohlichen Sound Design bei THW < 0,9 s über 60 s. (Petersen, Deml & Albers, 2024)	141
Abbildung 8.4:	Stereo Kurvenverlauf der psychoakustischen Lautstärke, Schärfe, Schwankungsstärke und Impulshaltigkeit (Hörmodell) des Sound Design, das sich kontinuierlich vom normalen positiven Sound Design bei THW > 1,8 s zum bedrohlichen Sound Design bei THW < 0,9 s über 60 s verschiebt. (Petersen, Deml & Albers, 2024)	143
Abbildung 8.5:	Dominante Transferpfade des Sound Designs vom Lautsprecher zum Ohr des Fahrers. Der durchgestrichene weiße Pfeil stellt den gedämmten direkten Transferpfad dar. Die blauen Pfeile repräsentieren beispielhafte Übertragungswege für die reflektierten Schallwellen. (Petersen, Düser & Albers, 2023)	146
Abbildung 8.6:	Offene Rückseite der Fahrzeugkabine im Fahrsimulator (Petersen, Düser & Albers, 2023)	147
Abbildung 8.7:	Schalldruckpegel über Zeit für die Kunstkopfmessung in der Fahrzeugkabine für den Geräuschpegel nur mit laufender Simulator Hardware und mit drei verschiedenen Einstellungen für das aktivierte Sound Design (Petersen, Deml & Albers, 2024)	148
Abbildung 8.8:	Schalldruckpegel über Frequenz für die Kunstkopfmessung in der Fahrzeugkabine für den Geräuschpegel nur mit laufender Simulator Hardware und mit drei verschiedenen Einstellungen für das aktivierte Sound Design (Petersen, Deml & Albers, 2024)	149

Abbildung 8.9:	Schalldruckpegel vs. Zeit für Kunstkopf-Messung innerhalb der Fahrzeugkabine, Fahrt mit 140 km/h durch einen dicht besiedelten Szenarien Abschnitt. Drei verschiedene Einstellungen: kein aktiver Sound, positives und 25 % bedrohliches Sound Design (1.58s THW). (Petersen, Deml & Albers, 2024).....	151
Abbildung 8.10:	Boxplots für die Dauer in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen THW-Bereichen ($THW < 4$ s (a), $THW < 1,8$ s (b), $THW < 1,35$ s (c) und $THW < 0,9$ s (d)) während der ersten Fahrt mit oder ohne Stimulus verbracht haben. Die Boxen repräsentieren das erste (Q1) und dritte Quartil (Q3). Die Whiskers repräsentieren $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ bis $Q3 + 1,5 \cdot IQR$ (Interquartilsabstand). Ausreißer sind separat dargestellt. (Petersen, Deml & Albers, 2024).....	158
Abbildung 8.11:	Boxplots für die durchschnittlichen THW, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen THW-Bereichen ($THW < 4$ s (a), $THW < 1,8$ s (b), $THW < 1,35$ s (c) und $THW < 0,9$ s (d)) während der ersten Fahrt mit oder ohne Stimulus gefahren sind. Die Boxen repräsentieren das erste (Q1) und dritte Quartil (Q3). Die Whiskers repräsentieren $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ bis $Q3 + 1,5 \cdot IQR$ (Interquartilsabstand). Ausreißer sind separat dargestellt. (Petersen, Deml & Albers, 2024).....	160
Abbildung 8.12:	Boxplots für die Aufenthaltsdauern in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen Time Headway-Bereichen ($THW < 4$ s (a), $THW < 1,8$ s (b), $THW < 1,35$ s (c) und $THW < 0,9$ s (d)) für beide Fahrten jeder Teilnehmenden mit und ohne den Stimulus. Die Boxen repräsentieren das erste (Q1) und dritte Quartil (Q3). Die Whiskers repräsentieren $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ bis $Q3 + 1,5 \cdot IQR$ (Interquartilsabstand). Ausreißer sind separat dargestellt. (Petersen, Deml & Albers, 2024).....	165
Abbildung 8.13:	Boxplots für die Dauer in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen Time Headway-Bereichen ($THW < 4$ s (a), $THW < 1,8$ s (b), $THW < 1,35$ s (c) und $THW < 0,9$ s (d)) für beide Fahrten mit und ohne den Stimulus verbracht haben, während sie auf derselben Spur gefahren sind. Die Boxen repräsentieren das erste (Q1) und dritte Quartil (Q3). Die Whiskers repräsentieren $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ bis $Q3 + 1,5 \cdot IQR$ (Interquartilsabstand). Ausreißer sind separat dargestellt. (Petersen, Deml & Albers, 2024).....	167

Abbildung 8.14:	Häufigkeit der in den Antworten verwendeten emotionalen Beschreibungen durch die Teilnehmenden bei der Beantwortung der Frage „Wie haben Sie sich gefühlt, als sich der Sound geändert hat?“ (Petersen, Deml & Albers, 2024). 171
Abbildung 9.1:	XiL-Validierungsframework für emotionalisierende Sound Designs auf Basis von Albers und Behrendt et al. (2016) 178
Abbildung 9.2:	Validierungskonfiguration für die Validierung der emotionalisierenden Wirkung der entwickelten Sounds auf Element-Ebene in Anlehnung an Albers und Behrendt et al. (2016) 180
Abbildung 9.3:	Beispielhafte Kombination von Modellausprägungen innerhalb der Validierungskonfiguration für die Validierung auf Element-in-the-Loop-Ebene eines emotionalisierenden Sound Designs nach Yan, Mandel, Behrendt und Albers (2019) 181
Abbildung 9.4:	Validierungskonfiguration für die Validierung der Wirkung der entwickelten Sounds auf die Wahrnehmung von gezeigtem Fahrverhalten oder Verkehrsszenarien auf Subsystemebene in Anlehnung an Albers und Behrendt et al. (2016) 182
Abbildung 9.5:	Beispielhafte Kombination von Modellausprägungen innerhalb der Validierungskonfiguration für die Validierung auf Subsystem-in-the-Loop-Ebene 2 nach Yan et al. (2019) 183
Abbildung 9.6:	Validierungskonfiguration für die Validierung der Wirkung des entwickelten emotionalisierenden Sound Designs auf das Fahrverhalten in Anlehnung an Albers und Behrendt et al. (2016) 184
Abbildung 9.7:	Beispielhafte Kombination von Modellausprägungen innerhalb der Validierungskonfiguration für die Validierung auf Subsystem-in-the-Loop-Ebene 1 nach Yan et al. (2019) 186
Abbildung 9.8:	Validierungskonfiguration für die Validierung des entwickelten emotionalisierenden Sound Designs in realen Fahrten in Anlehnung an Albers und Behrendt et al. (2016) 187
Abbildung 9.9:	Beispielhafte Kombination von Modellausprägungen innerhalb der Validierungskonfiguration für die Validierung auf System-in-the-Loop-Ebene nach Yan et al. (2019) 188
Abbildung 9.10:	Draufsicht auf das verwendete Teensy-Board von SK Pang Electronics Ltd (2024) sowie die notwendigen Verbindungen. 190

Abbildung 9.11:	Grafische Benutzeroberfläche des Matlab-Programms zur Konfiguration des Teensy zur Übersetzung der CAN-Bus Nachrichten.	191
Abbildung 9.12:	Ausschnitt aus der Tabelle zur Auswahl und Prüfung der CAN-Nachrichten zu Übersetzung in OSC-Daten.	192
Abbildung 9.13:	Einstellungsmöglichkeiten des Wertebereichs für die OSC-Ausgabedaten.	193
Abbildung 9.14:	Schematische Übersicht der Ein- und Ausgangsdaten sowie der internen Datenverarbeitungsstruktur des Teensy-basierten Hardwaresystems	194
Abbildung 10.1:	Abstrahierter methodischer Ansatz zur kontinuierlichen Validierung für emotionalisierende Sound Designs	197
Abbildung 10.2:	Schematische Darstellung zur Übersicht von Validierungsschritt 1 zur Validierung der emotionalisierenden Wirkung von Sounds	200
Abbildung 10.3:	Schematische Darstellung zur Übersicht von Validierungsschritt 2 zur Validierung der Wirkung emotionalisierender Sounds auf die Wahrnehmung von Fahrverhaltensparametern	202
Abbildung 10.4:	Schematische Darstellung zur Übersicht von Validierungsschritt 3 zur Validierung der Wirkung des emotionalisierenden Sound Design auf das Fahrverhalten in einem Fahrsimulator.....	204
Abbildung 10.5:	Schematische Darstellung zur Übersicht von Validierungsschritt 4 zur Validierung der Wirkung des emotionalisierenden Sound Design auf das Fahrverhalten in einem realen Fahrzeug.	206
Abbildung 10.6:	Darstellung der Einzelschritte der kontinuierlichen Validierung über den Reifegrad des emotionalisierenden Sound Design .	208

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1:	Überblick über die ausgewählten Musikstücke und ihre jeweiligen primären und sekundären Emotionen (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)	56
Tabelle 5.2:	Übersicht über die erzeugten Sounds mit ihren Namen, ihren jeweiligen Eingabestücken, den verwendeten Synthesizern und Synthesizer-Presets (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023).	59
Tabelle 5.3:	Gemittelte Einzahlwerte der psychoakustischen Analyse über die betrachteten Sounds. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)	68
Tabelle 5.4:	Übersicht über die berechneten Spearman-Rang-Korrelationen zwischen psychoakustischen Merkmalen und gefühlten und assoziierten Emotionen. (Signifikanzniveaus: $* = p \leq 0,05$, $** = p \leq 0,01$, $*** = p \leq 0,001$) (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023) ..	73
Tabelle 7.1:	Überblick über die Eigenschaften der fünf verschiedenen auditiven Reize (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)	93
Tabelle 7.2:	Randbedingungen der fünf verschiedenen dargestellten Videos von realen Fahrzeugfolgeszenarien (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)	98
Tabelle 7.3:	Ergebnisse des einseitigen paarweisen <i>t</i> -Tests zur Überprüfung einer Abnahme des geschätzten Sicherheitsabstands für <i>Sounds 2–5</i> im Vergleich zu <i>Sound 1</i> : Mittelwertdifferenzen, Effektstärke (Cohens <i>d</i>), <i>t</i> -Werte und Signifikanzen. Signifikanzniveaus: $* = p \leq 0,05$, $** = p \leq 0,01$, $*** = p \leq 0,001$	118
Tabelle 7.4:	Ergebnisse des einseitigen paarweisen <i>t</i> -Tests zur Untersuchung einer Zunahme der gewünschten Änderung des Sicherheitsabstands für <i>Sounds 2–5</i> im Vergleich zu <i>Sound 1</i> : Mittelwertunterschiede, Effektstärke (Cohen's <i>d</i>), <i>t</i> -Werte und Signifikanzen. Signifikanzniveaus: $* = p \leq 0,05$, $** = p \leq 0,01$, $*** = p \leq 0,001$ (Petersen, Yüksel & Albers, 2024).....	119
Tabelle 7.5:	Vorhersagemodelle für die Bewertung des Sicherheitsabstands. Die Zahlen stellen die Odds Ratios dar. Die Zahlen in Klammern geben die Standardfehler an. Signifikanzniveaus ***	

= $p < 0,001$; ** = $p < 0,01$; * = $p < 0,05$ (Petersen, Yüksel & Albers, 2024) 122

Tabelle 8.1:	Ausgangssignale des Fahrmodulators und ihre jeweilige Verwendung für das Sound Design (Petersen, Düser & Albers, 2023) 136
Tabelle 8.2:	Arithmetischer Mittelwert, Median und Standardabweichung der Fahrdauern in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen THW-Bereichen (THW < 4 s, THW < 1,8 s, THW < 1,35 s und THW < 0,9 s) während der ersten Fahrt mit oder ohne Stimulus verbracht haben. (Petersen, Deml & Albers, 2024) 159
Tabelle 8.3:	Arithmetischer Mittelwert, Median und Standardabweichung des THW in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen THW-Bereichen (THW < 4 s, THW < 1,8 s, THW < 1,35 s und THW < 0,9 s) während der ersten Fahrt mit oder ohne Stimulus gefahren sind. (Petersen, Deml & Albers, 2024) 161
Tabelle 8.4:	Ergebnisse des einseitigen unabhängigen Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Messungen, die eine Verringerung der Fahrdauer in niedrigeren THW-Bereichen beim Fahren mit Stimulus im Vergleich zu einer Kontrollgruppe ohne Stimulus zeigen: Differenz der Mittelwerte, Effektstärke, Z-Werte, exakte Signifikanzen, Stichprobengröße mit/ohne Stimulus, Standardabweichung, Standardfehler und das obere Konfidenzintervall. (Petersen, Deml & Albers, 2024) 162
Tabelle 8.5:	Ergebnisse des einseitigen unabhängigen Mann-Whitney-U-Tests für die Erhöhung des mittleren THW in den THW-Bereichen beim Fahren mit Stimulus im Vergleich zu ohne Stimulus: Differenz der Mittelwerte, Effektstärke, Z-Werte, genaue Signifikanzen, Stichprobengröße mit/ohne Stimulus, Standardabweichung, Standardfehler und das untere Konfidenzintervall. Signifikanzniveaus: * = $p \leq 0,05$, ** = $p \leq 0,01$, *** = $p \leq 0,001$. (Petersen, Deml & Albers, 2024)..... 163
Tabelle 8.6:	Arithmetischer Mittelwert, Median und Standardabweichung der Aufenthaltsdauer in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen Time Headway-Bereichen (THW < 4 s, THW < 1,8 s, THW < 1,35 s und THW < 0,9 s) mit und ohne Stimulus verbracht haben. (Petersen, Deml & Albers, 2024) 166

Tabelle 8.7:	Arithmetischer Mittelwert, Median und Standardabweichung des THW in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen Time Headway-Bereichen (THW < 4 s, THW < 1,8 s, THW < 1,35 s und THW < 0,9 s) für beide Fahrten mit und ohne den Stimulus verbracht haben. (Petersen, Deml & Albers, 2024).....	168
Tabelle 8.8:	Ergebnisse des einseitigen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für wiederholte Messungen zur Prüfung der Verringerung der Fahrdauer im niedrigeren Time Headway-Bereich beim Fahren mit Stimulus im Vergleich zum Fahren ohne Stimulus: Differenz der Mittelwerte, Effektstärke, Z-Werte, genaue Signifikanzen, Stichprobengröße mit/ohne Stimulus, Standardabweichung, Standardfehler und das obere Konfidenzintervall. Signifikanzniveaus: * = $p \leq 0,05$, ** = $p \leq 0,01$, *** = $p \leq 0,001$. (Petersen, Deml & Albers, 2024).....	169
Tabelle 8.9:	Ergebnisse des einseitigen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für wiederholte Messungen zur Prüfung der Erhöhung des durchschnittlichen THW in den THW-Bereichen beim Fahren mit Stimulus im Vergleich zum Fahren ohne den Stimulus: mittlere Unterschiede, Effektstärke, Z-Werte, genaue Signifikanzen, Stichprobengröße mit/ohne Stimulus, Standardabweichung, Standardfehler und das untere Konfidenzintervall. Signifikanzniveaus: * = $p \leq 0,05$, ** = $p \leq 0,01$, *** = $p \leq 0,001$. (Petersen, Deml & Albers, 2024).....	170

Abkürzungsverzeichnis

ADAS	Advanced Driver Assistance System (Fahrerassistenzsystem)
AIC	Akaike-Informationskriterium
BIC	Schwarz-Bayes-Informationskriterium
CAN	Controller Area Network
CS	Connected Systems
DAW	Digital Audio Workstation
<i>df</i>	Freiheitsgrade
DHARMa	Diagnostics for Hierarchical Regression Models
ESD	Emotionalisierendes Sound Design
ifab	Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation
IP	Internetprotokoll
IPEK	Institut für Produktentwicklung
IQR	Interquartilsabstand
iu	Impulsiveness Units
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KaSPro	Karlsruher Schule für Produktentwicklung
KS	Koppelsystem
M	Arithmetisches Mittel
Md	Median
MIDI	Musical Instrument Digital Interface
OSC	Open Sound Control
<i>p</i>	Statistische Signifikanz
PANAS	Positive and Negative Affective Schedule
<i>r</i>	Korrelationskoeffizient
R^2	Bestimmtheitsmaß
RNN	Wiederkehrendes Neuronales Netzwerk

(engl. Recurring Neural Network)

SAM	Self-Assessment-Manikin
SD	Standardabweichung
SiD	System in Development
Sul	System under Investigation
TCP	Transmission Control Protocol
THW	Zeitabstand (engl. Time Headway)
tuHMS	Tonality Units Hörmodell nach Sottek
UDP	User Datagram Protocol
WIVW	Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften
WSP	Wirkflächenpaar (engl. Working Surface Pair)
XiL	X-in-the-Loop
ZHO	Zielsystem, Handlungssystem, Objektsystem

1 Einleitung

Laut statistischem Bundesamt kam es 2023 zu 213.000 Verkehrsunfällen durch Fehlverhalten von Fahrenden von Personenkraftwagen. Einen besonders hohen Anteil an Verkehrsunfällen mit Personenschaden hatten dabei das Fehlverhalten in Bezug auf die gewählte Geschwindigkeit (12%) und den Sicherheitsabstand (13%) (Statistisches Bundesamt, 2024). Die Nutzung auditiver Signale im Fahrzeuginnenraum zur Korrektur des Fahrverhaltens ist ein etablierter Forschungsbereich, insbesondere im Kontext der Erhöhung der Verkehrssicherheit (Jeon et al., 2022). Bisher konzentrierte sich die Forschung jedoch überwiegend auf kurze, informationsgebende Geräusche, die explizit Fahrende über spezifische Verkehrssituationen informieren sollen, um das Fahrverhalten entsprechend anzupassen. Demgegenüber verfolgt die Forschung und Entwicklung im Bereich künstlich erzeugter Fahrzeuggeräusche (aktive Sound Designs) eine Verstärkung positiver Emotionen gegenüber der Fahrerfahrung selbst (Fiebig & Schulte-Fortkamp, 2015) sowie die Etablierung eines aktiven Sound Design als Feedbackquelle für Fahrende bzgl. des Fahrzeugzustands bspw. im Sinne der aktuellen Geschwindigkeit und Beschleunigung oder Verzögerung (Tschöke, 2015, S. 170). Trotz der nachgewiesenen Relevanz von Emotionen für das Fahr- und Risikoverhalten (Scott-Parker, 2017) und der Eigenschaft auditiver Reize wie Akkorde in der Musik (Pallesen et al., 2005) oder andere Klangcharakteristiken (Koelsch et al., 2013) Emotionen hervorzurufen oder zu beeinflussen, fehlen konkrete und etablierte Ansätze zur Nutzung emotionalisierender auditiver Reize zur Verbesserung der Fahrsicherheit. Daraus resultierend fehlt es auch an einer Methodik zur Validierung solcher emotionalisierenden auditiven Reize im Rahmen eines Entwicklungsprozesses sowie einer hierfür notwendigen Validierungsumgebung, in der eine methodengestützte Validierung durchgeführt werden kann.

Um diese Forschungslücken zu schließen, verfolgt diese Arbeit im ersten Teil das Ziel, ein aktives Sound Design zu entwickeln, das eine Emotionalisierung von Fahrenden ermöglicht – also bestimmte Emotionen hervorruft –, und dessen Auswirkungen auf das Fahrverhalten zu untersuchen. Explizit soll dieses Sound Design darauf abzielen, Emotionen hervorzurufen, die das Fahrverhalten so beeinflussen, dass eine Erhöhung des Sicherheitsabstandes erzielt wird. Die Untersuchung der Wirkung dieses Sound Designs erfolgt in Probandenstudien. Das zweite Ziel dieser Arbeit ist die Ableitung einer generalisierten Validierungsumgebung für emotionalisierende Sound Designs (ESD) sowie einer

generalisierten Methodik zur Validierung dieser. Diese Methodik soll die kontinuierliche Validierung des ESD von einer frühen Entwicklungsphase bis zur prototypischen Umsetzung ermöglichen.

Für die Entwicklung und wissenschaftliche Untersuchung eines ESDs sowie für die Ableitung einer Validierungsumgebung und Methodik zur Validierung werden im Kapitel 2 die hierfür notwendigen Grundlagen sowie der relevante Stand der Forschung dargelegt. Die daraus abgeleiteten Forschungsziele und das Forschungsvorgehen für diese Arbeit werden in Kapitel 3 und 4 beschrieben. Für die Entwicklung des in dieser Arbeit zu untersuchenden ESDs werden initial mehrere potenziell emotionalisierende Sounds mit unterschiedlichen Klangcharakteristiken erstellt (Kapitel 5). Diese Sounds werden innerhalb einer Probandenstudie emotional bewertet und hinsichtlich der für eine Emotionalisierung notwendigen Klangcharakteristiken untersucht. Im Anschluss werden, basierend auf den Ergebnissen aus Studie 1, effektiv emotionalisierende Sounds ausgewählt, und zusätzlich neue Sounds mit einem hierfür entwickelten Soundgenerator (Kapitel 6) generiert. Diese Sounds werden hinsichtlich einer potenziellen Wirkung auf das Fahrverhalten untersucht. Dies geschieht im Rahmen einer Studie zur Wirkung der Sounds auf die Wahrnehmung dargestellter Sicherheitsabstände in einer videobasierten Probandenstudie (Kapitel 7). Abschließend wird auf Basis der entwickelten Sounds ein dynamisches ESD entwickelt, und dessen Einfluss auf das Fahrverhalten im Rahmen einer Fahrsimulatorstudie untersucht (Kapitel 8).

Das zweite Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Validierungsmethodik sowie einer geeigneten Validierungsumgebung für ein ESD. Die Ableitung der Validierungsumgebung bestehend aus Validierungsframework und Validierungskonfigurationen geschieht gemäß des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes (Albers, Behrendt, Klingler & Matros, 2016) basierend auf (Albers, Düser, Sander, Roth & Henning, 2010), und baut auf den für die Studien verwendeten Versuchsumgebungen auf. Die Validierungsumgebung sowie dessen Validierungsframework und Validierungskonfigurationen werden in Kapitel 9 beschrieben. Zusätzlich wird eine Hardware-Schnittstelle zur Validierung eines ESD in einem realen Fahrzeug beschrieben. In Kapitel 10 wird die Validierungsmethodik, basierend auf der Validierungsumgebung, den methodischen Vorgehen in den Studien, sowie der KaSPro - Karlsruher Schule für Produktentwicklung nach Albers et al. (Albers, Behrendt et al., 2016) abgeleitet und beschrieben.

Diese Arbeit gliedert sich damit in die Entwicklung und Untersuchung eines ESDs zur Verbesserung der Verkehrssicherheit, sowie die Etablierung eines Validierungsansatzes zur Unterstützung zukünftiger Entwicklungs- und Forschungstätigkeiten im Bereich der ESDs ein.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In Kapitel 2 werden die zum Verständnis und Umsetzung der vorliegenden Arbeit notwendigen Grundlagen sowie der für diese Arbeit relevante Stand der Forschung erläutert.

2.1 Der Produktentstehungsprozess

In den folgenden Unterkapiteln werden die für diese Arbeit relevanten Ansätze und Modelle vorgestellt, die innerhalb der Forschungstätigkeiten im Rahmen der KaSPro – Karlsruher Schule der Produktentwicklung erforscht und entwickelt wurden. Zunächst wird das Verständnis des Produktentstehungsprozesses entsprechend des erweiterten ZHO-Modells nach Albers erläutert. Im Anschluss erfolgt die Beschreibung der Validierung im Kontext des Produktentstehungsprozesses gemäß der KaSPro sowie des für eine Validierung von Teilsystemen geeigneten IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes. Diese dienen als Grundlage für das in Kapitel 9 abgeleitete Validierungsframework sowie die in Kapitel 10 abgeleitete Validierungsmethodik zur kontinuierlichen Validierung für ein ESD.

2.1.1 Produktentwicklung im erweiterten ZHO-Modell

Ropohl beschreibt die Produktentwicklung in seiner Theorie der Systemtechnik als die Überführung eines Zielsystems in ein Objektsystem („Sachsystem“) mittels eines Handlungssystems (Ropohl, 1975). Albers, Ebel und Lohmeyer (2012) ergänzen dieses Modell aus Ziel-, Handlungs- und Objektsystem (ZHO-Modell) um die grundlegenden Aktivitäten der Analyse und Synthese. Dieses erweiterte ZHO-Modell ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Das Zielsystem umfasst die geplanten Eigenschaften und Randbedingungen eines Produkts oder zu entwickelnden Systems. Dabei beschreibt das Zielsystem den gewünschten Zustand des Produkts, nicht jedoch die Lösung selbst. Das Zielsystem wird zu Beginn der Entwicklung initial definiert und über den Verlauf des Entwicklungsprozesses kontinuierlich erweitert und angepasst (Albers et al., 2012). Das Objektsystem umfasst unter anderem alle beschriebenen Artefakte (bspw. Dokumente, Modelle), die als Teillösungen während des Entwicklungsprozesses entstehen und damit den Lösungsraum bilden, sowie das endgültige Produkt oder entwickelte System selbst (Albers, 2010).

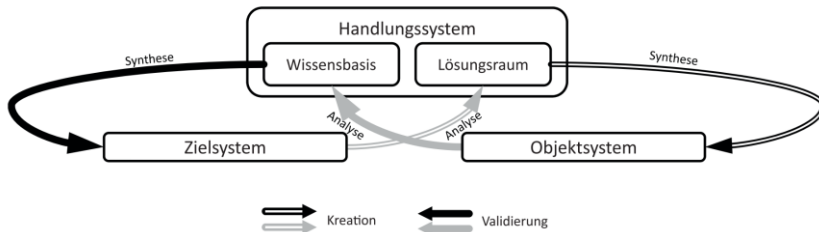


Abbildung 2.1: Erweitertes ZHO-Modell nach Albers et al. (2012)

Das Handlungssystem enthält alle für den Produktentstehungsprozess notwendigen Ressourcen (Entwickler, Budget, Ausstattung etc.) sowie Aktivitäten, Methoden und Prozesse. Dieses sozio-technische System erstellt das Zielsystem und das Objektsystem im Rahmen des Produktentstehungsprozesses (Albers et al., 2012). Die zielgerichtete Fortentwicklung des Zielsystems und Objektsystems mittels des Handlungssystems über den Entwicklungsprozess wird im Rahmen der Validierung gewährleistet, die einen kontinuierlichen Abgleich zwischen Ist-Zustand (Objektsystem) und Soll-Zustand (Zielsystem) einfordert (Albers, 2010). Auf die Validierung wird im Folgenden näher eingegangen.

2.1.2 Validierung im Produktentstehungsprozess

Validierung im Kontext technischer Systeme versteht sich als Prüfung, ob ein Produkt für den vorgesehenen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt. Die Validierung ist nach Albers „die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess“ (Albers, 2010). Hierbei gehen sowohl die Erwartungshaltungen der entwickelnden Fachexperten und Fachexpertinnen sowie auch der Anwendenden ein. Die Validierung ist nach VDI2206 als „die Prüfung zu verstehen, ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt.“ (VDI 2206). Sie ist im Allgemeinen nicht formal durchzuführen. Umgangssprachlich ist die Validierung die Beantwortung der Frage: „Wird das richtige Produkt entwickelt?“ (VDI 2206). Durch Validierung innerhalb des Entwicklungsprozesses entsteht neues Wissen und das Zielsystem wird auf Basis dieses Wissens kontinuierlich erweitert und angepasst. Dies resultiert in einer Verfeinerung, Erweiterung bzw. Ergänzung eines oder mehrerer bestehender Ziele oder als Widerruf dieser. Dies geschieht innerhalb der Validierung analog zum erweiterten ZHO-Modell nach Albers et al. (2012), das den kontinuierlichen Wechsel von Kreation (Synthese) und Analyse im Entwicklungsprozess als geschlossenen

Kreislauf aus der Analyse des Objektsystems, des dadurch entstehenden Wissens und der darauf basierenden Synthese eines kontinuierlich angepassten Zielsystems beschreibt (Abbildung 2.1). In der Validierung werden sowohl Objekt- als auch Zielsystem den eigentlichen Bedarfen und zukünftigen Anwendungsfällen gegenübergestellt. Die Objektsystemelemente wie Modelle oder Prototypen werden im Rahmen der Validierung analysiert. Dies geschieht einschließlich der Bewertung durch verschiedene Stakeholder-Gruppen sowie mittels der Durchführung von Tests und die anschließende Bewertung der Testergebnisse (Albers, Matros, Behrendt & Jetzinger, 2015; Albers, Behrendt et al., 2016). Die Validierung sieht hierfür drei grundlegenden Teil-Aktivitäten vor:

Bewertung

Bewertung ist eine Teil-Aktivität zur Untersuchung von Elementen des Objektsystems aus Stakeholder-Sicht. Die Bewertung aus Stakeholder-Sicht erfolgt überwiegend subjektiv auf Basis persönlicher Empfindungen (z. B. Fahrdynamik, Effizienz), während die Analyse im Bewertungsschritt überwiegend anhand objektiver Zahlenwerte erfolgt (z. B. Beschleunigung, Kraftstoffverbrauch). (Albers et al., 2015)

Objektivierung

Die Objektivierung setzt sich aus zwei Hauptbestandteilen zusammen. Im Rahmen der Objektivierung wird einerseits überprüft, inwieweit Elemente des Zielsystems die Erwartungen der Stakeholder objektiv repräsentieren. Darüber hinaus werden Potentiale zur Erhöhung der Objektivität des Zielsystems identifiziert. Eine höhere Objektivität des Zielsystems sorgt für eine klarere Ausgangsbasis, um das Zielsystem im Entwicklungsprozess in konkrete Objekte zu überführen. Gleichzeitig wird die Überprüfung der entstandenen Objekte in Bezug auf das Zielsystem erleichtert. Ein zentraler Aspekt und Herausforderung der Objektivierung ist daher die Analyse von Zusammenhängen zwischen messbaren Größen (Analysekriterien) und subjektiven Empfindungen (Bewertungskriterien) aus Sicht der Stakeholder. Ein Beispiel hierfür ist die Beziehung zwischen dem gemessenen Schalldruckpegel von Geräuschen im Fahrzeug und deren positiver oder negativer Wahrnehmung durch die Fahrenden. (Albers et al., 2015; Albers, Behrendt et al., 2016)

Verifikation

Verifikation beschreibt allgemein den Nachweis der Wahrheit von Aussagen. Übertragen auf technische Systeme wird hierunter eine Überprüfung verstanden, ob bspw. eine Realisierung eines Software-Programms mit der Spezifikation (der Algorithmenbeschreibung) übereinstimmt. Bei der Überprüfung der Gültigkeit eines

Software-Programms wird auch von der Programmverifikation gesprochen. Im Vergleich zur übergeordneten Validierung erfolgt die Verifikation im Allgemeinen formal. Umgangssprachlich ist die Verifikation die Beantwortung der Frage: „Wird ein korrektes Produkt entwickelt?“ (VDI 2206).

Die Validierung mit deren drei grundlegenden Teil-Aktivitäten Verifikation, Bewertung und Objektivierung wird wie in Abbildung 2.2 dargestellt in das ZHO-Modell eingeordnet (Albers, Behrendt, Klingler & Matros, 2016).

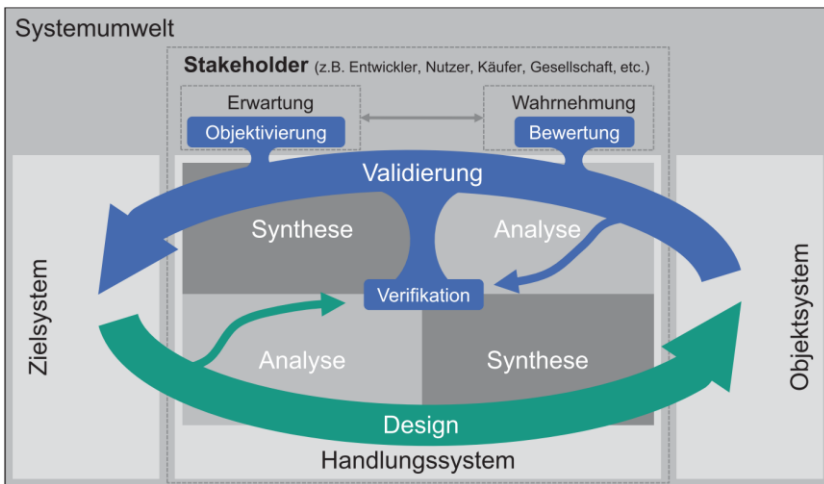


Abbildung 2.2: Design und Validierung im Produktentstehungsprozess nach dem erweiterten ZHO-Modell (Albers, Behrendt et al., 2016)

Je nach Fortschritt innerhalb des Entwicklungsprozesses liegen diese Teil-Aktivitäten in unterschiedlichen Formen vor, insbesondere in einem frühen Stadium, wo Systeme oft nur teilweise vorhanden sind oder die Reifegrade der Teilsysteme variieren. Deshalb ist es notwendig, nicht nur das Gesamtsystem, sondern auch einzelne Teilsysteme zu validieren. Allerdings muss die Validierung eines Teilsystems immer in Wechselwirkung mit dem übergeordneten Gesamtsystem stattfinden, da die Validierung darauf abzielt, die Erfüllung der Gesamtbedürfnisse zu überprüfen – etwas, das meistens durch das Zusammenspiel mehrerer Systeme erreicht wird (Albers, Fischer, Klingler & Behrendt, 2014). Um diese Teil-Aktivitäten im Rahmen des Entwicklungsprozesses durchführen zu können, muss innerhalb jedes Validierungsschrittes eine Definition des Validierungsziels, die Auswahl

geeigneter Validierungs- oder Testumgebungen sowie die Definition von Testfällen erfolgen. Eine Validierungsumgebung (VU) stellt hierbei eine konkrete Ausprägung des Handlungssystems für die Validierung für eine oder mehrere Kombinationen aus einem Produkt oder technischen System, einem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess und einem Validierungsziel dar (Albers, Behrendt et al., 2016). Bei der Validierung wird geprüft, ob das System für den vorgesehenen Einsatz geeignet ist oder den gewünschten Wert erreicht. Die hierfür notwendige Transformation des Subsystemverhaltens in das Gesamtsystemverhalten kann mit entsprechenden Restsystemmodellen realisiert werden, die die notwendigen Interaktionen innerhalb des Gesamtsystems darstellen. Hieraus ergeben sich sogenannte Validierungskonfigurationen, die in unterschiedlichen Reifegraden eines zu entwickelnden Produktes eine Validierung im Kontext des Gesamtsystems anstreben. Bei der Entwicklung von Validierungskonfigurationen muss stets das zu untersuchende Gesamtsystem und dessen Umgebung berücksichtigt werden. Um diesen Herausforderungen bei der Entwicklung und Validierung von zukünftigen Fahrzeugen und Fahrzeugsystemen gerecht zu werden, wurde der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz von Albers et al. entwickelt (Albers & Düser, 2008; Albers et al., 2010; Albers, Behrendt et al., 2016). Auf diesen soll im nächsten Kapitel näher eingegangen werden.

2.1.3 IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz

Der IPEK-X-in-the-Loop (IPEK-XiL)-Ansatz, dargestellt in Abbildung 2.3 nach Albers und Düser (2008), baut auf bereits bestehenden Ansätze zur Einbindung einzelner Teilsysteme wie Model-in-the-Loop, Software-in-the-Loop und Hardware-in-the-Loop auf. Der XiL-Ansatz kombiniert dabei die Vorteile dieser Ansätze, um physische und/oder virtuelle Teilsysteme („X“) innerhalb ihrer jeweiligen Restsysteme zu validieren, und erweitert diesen Ansatz gezielt um mechanische bzw. mechatronische Aspekte sowie um die Bedarfe von Entwicklern aus verschiedenen Fachbereichen (Albers, Düser & Ott, 2008; Albers et al., 2010; Albers, Behrendt et al., 2016). Das Ziel ist dabei das zu validierende Teilsystem in das Gesamtsystem, die Umwelt und auch evtl. weitere interagierende Systeme, wie bspw. Fahrende, einzubinden (Albers et al., 2010).



Abbildung 2.3: IPEK-X-in-the-Loop-(XiL)-Ansatz nach Albers und Düser (2008)

Das „X“ versteht sich als ein physisches und/oder virtuelles (Teil)-System, das sich in der Entwicklung befindet bzw. untersucht werden soll, und steht im Fokus einer spezifischen Validierungsaktivität (Albers, Behrendt et al., 2016). Dieses wird aus Sicht von einzelnen Entwicklenden oder von Entwicklungsteams definiert und in diesem Falle als System-in-Development (SiD) bezeichnet. Bezogen auf die verschiedenen konkreten Validierungsaktivitäten lassen sich zwei unterschiedliche Sichtweisen auf das "X" ableiten. Das Hauptinteresse liegt bei einem SiD primär auf der Validierung bzgl. Erfüllung von Eigenschaften oder Funktionen. Eine zweite Sichtweise ergibt sich, wenn der Schwerpunkt nicht auf der Entwicklung eines Teilsystems liegt, sondern auf der Gewinnung von Wissen über ein Teilsystem zur weiteren Verwendung im Entwicklungsprozess (Albers, Behrendt et al., 2016). In diesem Zusammenhang ist der Begriff System-under-Investigation (Sul) angemessener. Dementsprechend kann das Sul ein Teil des SiD oder das gesamte SiD sein. In manchen Fällen kann die Sul auch außerhalb des SiD liegen, bspw. wenn Kenntnisse über die Nachbarsysteme gewonnen werden sollen, um diese für die Validierung besser abbilden zu können (Albers, Behrendt et al., 2016).

Die mit dem zu untersuchenden System „X“ interagierenden Systeme (Fahrende, Restfahrzeug, Umwelt) werden als „Connected Systems“ bezeichnet (Albers, Behrendt et al., 2016). Durch eine Abbildung dieser innerhalb der Validierungsumgebung sollen die bestehenden Wechselwirkungen zwischen dem untersuchten System und den Connected Systems berücksichtigt werden. Dabei ist nicht vorgegeben, ob das zu untersuchende System virtuell und/oder physisch

eingebunden wird. Die Art und Weise, in der die Wechselwirkungen der beteiligten Systeme berücksichtigt werden, hängt von der Produktreife, der jeweiligen Situation sowie den Verifizierungs- bzw. Validierungszielen ab. So können rein virtuelle, rein physische oder auch gemischt physisch-virtuelle Ausprägungen der Validierungskonfigurationen entstehen. Der Reifegrad des zu validierenden Systems gibt des Weiteren an, in welcher Systemebene (Gesamtsystem, Sub-System oder Element-Ebene) die Validierung erfolgen muss. Die Integration dieser Zusammenhänge ist im IPEK-X-in-the-Loop-Framework am Beispiel der Fahrzeugentwicklung dargestellt (Abbildung 2.4). Hier werden die möglichen Systemebenen des zu untersuchenden Systems („X“) und der sich daraus ergebenden Connected Systems aufgezeigt sowie die Möglichkeiten, diese virtuell, physisch oder auch gemischt virtuell-physisch darzustellen. (Albers, Düser & Ott, 2008; Albers, Behrendt et al., 2016)

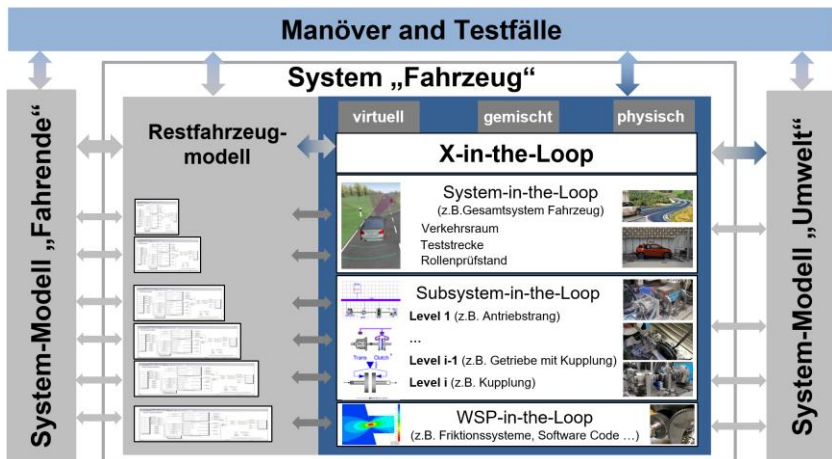


Abbildung 2.4: IPEK-XiL-Framework nach Albers, Düser und Ott (2008)

Die Interaktion zwischen dem zu untersuchenden System „X“ sowie den Connected Systems kann dabei in einer Open- oder Closed-Loop-Konfiguration vorliegen (Albers et al., 2010). Bei einer Closed-Loop Konfiguration hat das Verhalten des zu untersuchenden Systems Auswirkungen auf das Restsystemverhalten über eine Rückkopplungsverbindung. Hierdurch ergeben sich die notwendigen Eingangsparameter für das zu validierende System und den jeweiligen Testfall nicht nur aus dediziert festgelegten externen Randbedingungen des Restsystems, sondern auch aus dem Systemverhalten des zu untersuchenden Systems selbst bspw. aus dem vorherigen Simulationsschritt. Dies ermöglicht es, die dynamischen

Auswirkungen des Verhaltens des System-in-the-Loop auf das Gesamtsystemverhalten abzubilden. Demgegenüber liegt bei einer Open-Loop Konfiguration diese Verbindung nicht vor, so dass das System während der Simulation keine Informationen darüber erhält, wie das reale oder simulierte System auf die Eingaben reagiert. Zur Verbindung von Modellen, zwischen denen auf Grund von bspw. Inkompatibilitäten, räumlicher Trennung oder unterschiedlicher Domäne (virtuell/physisch) keine direkten Verbindungen möglich sind, werden im IPEK-XiL-Framework Koppelsysteme eingesetzt, z. B. der Schaltroboter, der eine virtuelle Schaltanforderung in eine physische Aktion umsetzt. (Albers, Pinner, Yan, Hettel & Behrendt, 2016). Koppelsysteme dienen ausschließlich der Verbindung von Modellen und sollten der Testumgebung bestenfalls kein relevantes Systemverhalten hinzufügen. In der realen Umsetzung der Koppelfunktion bedingen Koppelsysteme jedoch möglicherweise einen nicht vernachlässigbaren, unerwünschten Einfluss auf das Systemverhalten mit sich. In diesem Fall ist eine Kompensation dieses Einflusses bei der Auswertung und Interpretation von Testergebnissen notwendig.

Ziel des am IPEK entwickelten XiL-Ansatzes ist es, dass die ermittelten Merkmalswerte während der Entwicklung von bspw. einzelnen Subsystemen des Fahrzeugs auf den späteren Einsatzbereich und die Eigenschaften dieses Systems im Gesamtfahrzeug beim Kunden übertragbar sind. Dies ist notwendig, um während der Entwicklung die richtigen Entscheidungen treffen zu können. Für die Ermittlung der Merkmalswerte müssen im Rahmen des XiL-Ansatzes die relevanten Einflussgrößen des Restfahrzeugs, der Fahrenden und der Umwelt, die das zu untersuchende Subsystem beeinflussen, angemessen abgebildet werden. Um diese Aspekte richtig umsetzen zu können, muss vor allem eine angemessene Systemgrenze des Prüflings, des Restfahrzeugs und der Umwelt mit Fahrenden identifiziert werden. Zusätzlich müssen für eine Validierung die Betriebszustände, d. h. im Fall des XiL-Ansatzes Manöver bzw. Testfälle, die für dieses Subsystem relevant sind, identifiziert und im Experiment überprüft werden.

2.1.3.1 Test und Experiment im XiL-Ansatz

Die Überprüfung innerhalb der Validierungskonfigurationen kann in Form von Tests, Experimenten, Versuchen, Simulationen etc. durchgeführt werden. Welche Form dabei im Rahmen der Validierungsaktivität gewählt wird, unterscheidet sich je nach Charakter des Validierungsziels. Dabei kann es um die Validierung ganz konkreter technischer Anforderungen gehen oder um die Validierung eher vager Hypothesen im Rahmen eines angestrebten Erkenntnisgewinns. Für die Validierung bzgl. der Erfüllung von Eigenschaften oder Funktionen sollte eher der Begriff Test verwendet werden, während bei einer Validierung von Hypothesen eher der Begriff Experiment zu favorisieren ist (El-Haji, Freudenmann, Gauterin & Albers, 2014). Definiert wird

der Test von Ebel (2015) wie folgt: „Ein Test ermittelt Systemeigenschaften eines [zu untersuchenden] Systems [...] und liefert Erkenntnisse über das System, insbesondere ob das System zuvor definierte Ziele, Anforderungen oder Hypothesen ganz, teilweise oder nicht erfüllt. Ein Test umfasst stets einen Testfall, eine Testumgebung und eine Testinterpretation.“ (Ebel, 2015, S. 159). Der Testfall wird dabei als repräsentatives Modell eines Kollektivs von Anwendungsfällen verstanden. Er definiert die Eingangsgrößen des betrachteten Systems, die Start- und Randbedingungen sowie das erwartete Verhalten des Systems. Ein Testfall wird anhand einer Testumgebung realisiert. Diese „[...] beinhaltet die Gesamtheit aller physischen und virtuellen Modelle bzw. Originale, die notwendig sind, um einen oder mehrere Testfälle durchzuführen und das erwartete Systemverhalten zu erfassen.“ (Ebel, 2015, S. 136). Ein Testfall muss dabei die finale Anwendung nicht in jedem Fall so genau wie möglich abbilden, sondern kann im Sinne der Effizienz auf die Abbildung des Notwendigen beschränkt werden. Auch auf Basis eines sehr anwendungsfernen Testfalls kann in bestimmten Fällen auf die Validität des Systems geschlossen werden. (Albers, Behrendt et al., 2016) Die anschließende Testinterpretation „[...] überführt das in einem durchgeführten Testfall erfasste Systemverhalten in eine oder mehrere zugrundeliegende Systemeigenschaften und liefert Erkenntnisse über das System und den Test, insbesondere ob zuvor definierte Ziele, Anforderungen oder Hypothesen ganz, teilweise oder nicht erfüllt werden.“ (Ebel, 2015, S. 136).

Bei einem Experiment handelt es sich hingegen um eine wissenschaftliche Ermittlung der Wirkung bestimmter Merkmalswerte (unabhängige Variablen, die gezielt und unter möglichst weitgehender Kontrolle verändert werden) auf andere Merkmalswerte (abhängige Variablen). Die Variablen müssen dabei jeweils in Abhängigkeit der zu überprüfenden Hypothesen definiert werden. (Kittner, Wegscheider & Pirkner, 1994). Durch dieses Vorgehen können Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge beobachtet bzw. identifiziert werden (Kleppmann, 2013). Bei einem Test wird durch eine möglichst genaue Beschreibung versucht, die Ergebnisse aus ggf. unterschiedlichen Prüfeinrichtungen untereinander vergleichbar zu machen. Demgegenüber wird bei einem Experiment gerade durch die freie Wählbarkeit sowohl der abhängigen als auch der unabhängigen Variablen und durch die gezielte Einstellung der unabhängigen Variablen ermöglicht, dass ein bis dahin noch nicht bekannter Ursache-Wirkungs-Zusammenhang ermittelt werden kann. Nach Heller (2012) muss ein Experiment folgende drei Kriterien aufweisen, um eine interne Validität zu erreichen (Heller, 2012, S. 171):

- Willkürlichkeit: Das zu untersuchende Verhalten muss absichtlich und planmäßig ausgelöst werden können.

- Wiederholbarkeit: Das Experiment muss unter gleichen Bedingungen replizierbar sein.
- Variierbarkeit: Die unabhängigen Variablen müssen gezielt verändert werden können, damit die Wirkung auf die abhängigen Variablen beobachtet werden kann.

2.2 Sicherheitsabstand und Zeitabstand

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein ESD zur Erhöhung der Verkehrssicherheit durch eine Erhöhung des Sicherheitsabstands entwickelt werden. Der Sicherheitsabstand wird in dieser Arbeit grundsätzlich verstanden als der longitudinale Abstand zwischen einem vorausfahrenden Fahrzeug und einem Fahrzeug, das diesem in derselben Fahrspur folgt. Der geforderte, empfohlene oder als angemessen empfundene Sicherheitsabstand ist grundsätzlich kein statischer Wert, sondern hängt von unterschiedlichen Bedingungen ab. Neben bspw. den Straßen- und Verkehrsverhältnissen, den Sicht- und Witterungsbedingungen, der Fahrzeugbereifung und der Fähigkeiten oder Erfahrung der Fahrenden ist dies immer auch die Fahrzeug-Geschwindigkeit. Aus diesem Grund hat sich der Begriff des Zeitabstands, oder im Englischen Time Headway (THW), etabliert. Dieser ist eine kritische Metrik zur Beurteilung des Risikos bestimmter Verkehrsszenarien. Er berechnet die Zeitlücke von dem Moment, in dem das vordere Ende eines vorausfahrenden Fahrzeugs einen festen Punkt auf der Straße passiert, bis zu dem Moment, in dem das vordere Ende des nachfolgenden Fahrzeugs denselben Punkt überquert. Der THW bietet somit eine geschwindigkeitsabhängige Schätzung der Situationskritikalität (Evans & Schwing, 1985). Der THW wird gemäß Formel (1) berechnet:

$$\text{Zeitabstand} = \frac{\text{Sicherheitsabstand [m]}}{\text{Geschwindigkeit } \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]} \quad (1)$$

Das Fahren mit unzureichendem THW ist für 16 % der Verkehrsunfälle in Deutschland verantwortlich (Montesquieu & Roger, 2019) und trägt erheblich zu Verkehrstoten bei (Kühn & Hannawald, 2015). Die Gesetzgebung und Empfehlungen in Bezug auf sichere und unsichere oder sanktionierte Sicherheitsabstände oder THW unterscheiden sich bereits innerhalb von Westeuropa erheblich (G. Breyer, 2010). Eine oft empfohlene Faustregel für einen sicheren Sicherheitsabstand ist die Einhaltung eines THW von mindestens 2 Sekunden. In Deutschland empfiehlt die Richtlinie des Kraftfahrt-Bundesamtes einen Abstand von der Hälfte des aktuellen Tacho-Wertes in Metern einzuhalten

(Kraftfahrt-Bundesamt, 2023), was einem THW von 1,8 Sekunden entspricht. Bei höheren Geschwindigkeiten, wie sie auf Autobahnen vorkommen, kann ein THW von weniger als 1,8 s in Deutschland bereits als ein Verstoß gegen die Verkehrsregeln geahndet werden. Wiederholte Verstöße gegen die Einhaltung eines THW von unter 0,9 Sekunden können sogar zum (vorübergehenden) Entzug der Fahrerlaubnis führen (Kraftfahrt-Bundesamt, 2023). Um einen Effekt auf die Verbesserung der Verkehrssicherheit zu erzielen, sollte das ESD gemäß den Vorgaben in Deutschland im THW-Bereich $< 1,8$ s einen Einfluss hinsichtlich der Erhöhung des Sicherheitsabstands zeigen.

2.3 Sound Design im Kontext der Mobilität

Die Geräuschkulisse im Innenraum eines fahrenden Fahrzeugs hat sich in den letzten Jahrzehnten von ungewolltem Lärm zu einem fein abgestimmten akustischen Gesamteindruck entwickelt. Dabei wandelte sich das Vorgehen von der reinen Reduzierung des Schalldruckpegels im Fahrzeuginnenraum zu einem gezielten Herausarbeiten eines komfortablen oder sportlichen Fahrzeuginnengeräusches. (Genuit & Fiebig, 2011) Dies wurde entweder durch konstruktive Änderungen an den Antriebssystemen der Fahrzeuge oder durch die Verwendung von dämpfenden oder isolierenden akustischen Materialien an den Gehäusen der Subsysteme oder am Fahrgestell erreicht, um das Eindringen unerwünschter Geräusche oder Geräuschanteile in den Fahrgastraum zu verändern oder zu verhindern und damit die spektrale Zusammensetzung des Klangs gezielt zu verändern. Der Begriff Sound Design (zu Deutsch: Tongestaltung) ergibt sich aus dieser gezielten Gestaltung (Design) von Klängen und Tönen (Sounds). Mit der fortschreitenden Digitalisierung innerhalb der Mobilität wurden vermehrt künstlich erzeugte Geräusche zur Gestaltung der Klangkulisse innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs eingesetzt (Genuit & Fiebig, 2011). Diese künstlich erzeugten Geräusche spielen insbesondere bei Elektrofahrzeugen eine wichtige Rolle. Etwa 5 % des Entwicklungsbudgets für ein neues Elektrofahrzeug werden für die verschiedenen Aspekte des Sound Designs aufgewendet (Mortsiefer, 2019). Dazu gehören verschiedene akustische Warnsysteme in Fahrzeugen sowie künstlich erzeugte Motorengeräusche, die zusammengenommen einen markenspezifischen Sound erzeugen (Czolbe, 2020). Akustische Warnsysteme sind häufig sogenannte Earcons, oder Auditory Icons, also kurze auditive Reize, die unterschiedlichen Ereignisse (bspw. das Unterschreiten der Außentemperatur eines kritischen Wertes) signalisieren sollen. Künstliche Motorengeräusche werden als aktives Sound Design bezeichnet. Hierunter werden die aktive Anreicherung oder grundsätzliche Erzeugung eines künstlichen Antriebsgeräusches verstanden. Die Bewertung der aktuellen Fahrsituation durch den Fahrer ist ein multimodaler

Prozess, u. a. visuell und auditiv. Roach et al. zeigen, dass die intersensorische Integration von Informationen darauf hindeutet, dass das Wahrnehmungssystem multisensorische Hinweise (u. a. visuelle und auditive) auf statistisch optimale Weise kombiniert, um eine möglichst zuverlässige Einschätzung der aktuellen Situation zu erhalten. (Roach, Heron & McGraw, 2006). Es erscheint also sinnvoll, die potenzielle Wirkung von akustischen Stimuli auf die visuelle Einschätzung der aktuellen Situation, und einem sich daraus ergebenden Fahrverhalten näher zu betrachten. In den folgenden Kapiteln werden die Konzepte der Earcons und des aktiven Sound Design näher betrachtet und es wird dargelegt, inwiefern sie direkten oder indirekten Einfluss auf das Fahrverhalten haben können.

2.3.1 Earcons / Auditory Icons und Fahrverhalten

Im Rahmen von Earcons / Auditory Icons wurden verschiedene Ansätze erforscht und bereits umgesetzt, um Fahrende auditiv bzgl. eines sicherheitsrelevanten Ereignisses zu warnen, bspw. bei Geschwindigkeitsüberschreitungen, dem abrupten Abbremsen eines vorausfahrenden Fahrzeugs oder dem Nichteinhalten der jeweiligen Fahrspur (Nees & Walker, 2011). Durch den warnenden Hinweis soll in diesen Fällen eine Veränderung des Fahrverhaltens motiviert werden. In Abhängigkeit der Klangcharakteristik der verwendeten Töne fördern die auditiven Reize die Anpassung des Fahrverhaltens und führen je nach Hinweiskontext zu Geschwindigkeitsreduktion (Adell, Várhelyi & Hjalmdahl, 2008), früherem Abbremsen in brenzligen Situationen (Graham, 1999) oder besserem Einhalten der Fahrspur (Lin et al., 2009). Der Anwendungsfall und die Klangcharakteristik bedingen auch, wie gut solche auditiven Hinweise von Fahrenden akzeptiert werden (Fagerlönn, 2011). Earcons / Auditory Icons basieren auf einer direkten und hinweisenden Kommunikation und werden häufig in Kombination mit explizierenden visuellen Informationen gekoppelt, auf die durch den auditiven Reiz hingewiesen werden soll. Mit steigendem Einsatz dieser Art von hinweisenden kurzen Tönen, auch im Kontext von einer weiteren Quelle potenziell ähnlicher Töne wie einem Smartphone, könnten jedoch auch negative Effekte entstehen. Bspw. fanden Wiese und Lee (2004) heraus, dass die mentale Belastung beim Fahren mit einer Mischung aus Warnhinweisen des Fahrzeugs und auditiven Hinweisen auf einen Maleingang am Handy je nach Klangcharakteristika der auditiven Hinweise zunimmt. Des Weiteren beeinflussen kurzzeitig aufeinanderfolgende E-Mail und Warnhinweise die Wirksamkeit des Warnhinweises und damit die Reaktionszeit beim Bremsen.

2.3.2 Aktives Sound Design

Ein aktives Sound Design wird im Fahrzeugkontext bisher verwendet, um den Klang eines Fahrzeugs hinsichtlich des Fahrkomforts zu optimieren (Genuit, 2010, S. vii) oder aber um dessen Eigenschaft als akustische Feedbackquelle für die Fahrenden herauszuarbeiten (Tschöke, 2015, S. 170). Bei einem aktiven Sound Design handelt es sich um künstlich erzeugte fahrzeugnahe Geräusche, die entweder indirekt (bspw. über die Abgasanlage) oder direkt, über dedizierte Lautsprecher oder die HiFi-Anlage, in den Fahrzeuginnenraum eingespielt werden. Ein aktives Sound Design wird anhand von Eingangsgrößen des Antriebssystems wie Drehzahl oder Drehmoment gesteuert. Das Ziel des aktiven Sound Designs ist es, ein existierendes Fahrzeuggeräusch anzureichern oder ein antriebsbasiertes Fahrzeuggeräusch von Grund auf neu zu erzeugen. In Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor wird es vor allem eingesetzt, um einen bestimmten akustischen Charakter wiederherzustellen, der bspw. durch das Downsizing des Motors oder die Abschaltung von Zylindern zur Steigerung der Energieeffizienz verloren gehen kann. Hierdurch soll die wahrgenommene Leistung und Sportlichkeit des Fahrzeugs verbessert werden (Bodden & Belschner, 2014; Fuchs, Nijman & Priebisch, 2016, S. 14–24). Streicher, Lange, Eisele und Steffens (2021) stellen zu den Fahrzeuggeräuschen Folgendes fest: *"Der Klang im Fahrzeug ist ein bedeutender Sinneseindruck für die Insassen, der zahlreiche Informationen vermittelt"*, d. h. zum einen Rückmeldungen über den Fahrzeugzustand, zum anderen die Darstellung des Charakters und der Wertigkeit eines Fahrzeugs (Streicher et al., 2021). Zeller (2012, S. 217) zufolge ist das Motorengeräusche ein entscheidendes Element, das Qualität und Designanspruch eines Fahrzeugs betont. Demnach lässt sich bspw. ein sportliches Design effektiv durch einen entsprechenden sportlichen Sound ergänzen, um das Gesamtbild zu verstärken. Dabei erfolgt die Geräuschbeurteilung eines Fahrzeugs immer kontextabhängig (Genuit & Fiebig, 2011). Bei Elektrofahrzeugen nimmt das aktive Sound Design einen wichtigen Stellenwert ein, da bei diesen Fahrzeugen die gewohnten akustischen Rückmeldungen bzgl. des Fahrzeugzustands (bspw. Drehzahl) häufig nicht hörbar sind (Tschöke, 2015, S. 170). Fiebig und Schulte-Fortkamp (2015) zeigen bspw., dass Probanden bei der ersten Fahrt mit einem Elektrofahrzeug das im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren grundsätzlich viel leisere Geräusch begrüßen. Nach der Erfahrung mit einem aktiven Sound Designs in einem batterieelektrischen Fahrzeug schätzen Probanden jedoch das akustische Feedback, das von einem aktiven Sound Design ausgeht. Zusätzlich kann ein aktives Sound Design die emotionale Komponente eines ansprechenden Antriebsgeräusches innerhalb der Fahrerfahrung reproduzieren, die ein hochfrequenter Elektroantrieb im Vergleich zu einem klassischen Verbrennungsmotor vermissen lässt (Chang & Park, 2016).

2.3.3 Wirkung von aktivem Sound Design auf das Fahrverhalten

Die Forschung im Bereich des aktiven Sound Designs, gerade bei Fahrzeugherstellern, konzentriert sich hauptsächlich auf die Implementierung des Sound Design, die Steigerung der Klangtreue bzgl. des Ziel-Fahrzeugs und die Bewertung dieser Klänge durch potenzielle Kunden (Gwak, Yoon, Seong & Lee, 2014; Küppers, 2013). Es gibt allerdings auch Forschungsergebnisse zur Wirkung von Motoren- oder Antriebsgeräuschen auf das Fahrverhalten. So wird bspw. die Einschätzung von Fahrgeschwindigkeiten durch die Klangcharakteristiken von Motoren- oder Antriebsgeräuschen beeinflusst; Probanden schätzen etwa die aktuellen Fahrgeschwindigkeiten je nach Lautstärke (Horswill & Plooy, 2008), (Hellier, Naweed, Walker, Husband & Edworthy, 2011) oder Frequenzzusammensetzung (E. Y. Wang & Wang, 2012) dieser Geräusche unterschiedlich ein. Des Weiteren deuten die Ergebnisse von Pilgerstorfer, Runda, Conter und Gatscha (2013) darauf hin, dass die fehlende akustische Rückmeldung bei Elektrofahrzeugen aufgrund des fehlenden Geräusches des Verbrennungsmotors eine der Ursachen für erhöhte Fahrzeuggeschwindigkeiten in Fahrsituationen mit niedrigen Geschwindigkeiten sein könnte. Weiterhin zeigten die Ergebnisse von Denjean, Kronland-Martinot, Roussarie und Ystad (2021) und Bringoux et al. (2017), dass eine über- oder unterproportionale Änderung der Tonhöhe des aktiven Sound Designs in Bezug auf die Motordrehzahl zu einer Unter- oder Überschreitung vorgegebener Zielgeschwindigkeiten durch Probanden führte. Während der Beschleunigung neigten die Fahrenden dazu, die Zielgeschwindigkeiten zu unterschreiten, wenn eine überproportionale Änderung Grundfrequenz des aktiven Sound Designs bei steigender Motordrehzahl vorlag (Denjean et al., 2021). Bei einer Verzögerung führte eine überproportionale Änderung zu einem Überschreiten der Ziel-Geschwindigkeiten (Bringoux et al., 2017). Diese Ergebnisse indizieren, dass ein Motorengeräusch oder ein künstliches aktives Sound Design als intuitive Feedbackquelle für den aktuellen Fahrzeugzustand dient. Ein aktives Sound Design kann dabei je nach Umsetzung sogar einen Einfluss auf handlungsbeeinflussende Faktoren wie die Geschwindigkeitseinschätzung haben.

2.4 Wechselwirkungen zwischen Emotionen, auditiven Reizen und Fahrverhalten

Im Gegensatz zu den informationell direkt hinweisenden Earcons oder Auditory Icons soll das in dieser Arbeit initial entwickelte ESD auf Basis eines aktiven Sound

jDesigns nicht auf einer informationellen Ebene das Fahrverhalten verändern. Vielmehr soll das ESD durch eine akute Veränderung der Emotionslage der Fahrenden in entsprechenden Verkehrssituationen zu einer Veränderung des Fahrverhaltens beitragen. Das Sound Design kann damit als ein dynamischer auditiver emotionalisierender Stimulus verstanden werden. Das Potenzial dieses Ansatzes soll auf Basis des in diesem Kapitel dargelegten Stand der Forschung zu Emotionen, der Wirkung von Emotionen und emotionalisierenden Reizen auf Fahrverhalten sowie der Wirkung von unterschiedlichen auditiven Reizen auf Emotionen gezeigt werden.

2.4.1 Emotionen

Der Ansatz, bestimmte Fahr- und Verkehrssituationen emotional aufzuladen, um damit eine Beeinflussung des Fahrverhaltens in der jeweiligen Fahrsituation zu erzielen, basiert auf der Annahme, dass Emotionen handlungsauslösend sein können (Kleinginna & Kleinginna, 1981, S. 374). Das Forschungsfeld Emotionen ist innerhalb der Psychologie ein weites Feld, in dem eine Vielzahl von Definitionen für Emotionen entstanden sind. Um mit einem einheitlichen Arbeitsmodell voranschreiten zu können, wurde von Kleinginna et al. auf Basis von 92 unterschiedlichen Definitionen eine Emotion definiert als *"eine komplexe Reihe von Wechselwirkungen zwischen subjektiven und objektiven Faktoren, vermittelt durch neuronale/hormonale Systeme, die (a) affektive Erfahrungen wie Gefühle der Erregung, Freude/Unlust (Valenz) hervorrufen können; (b) kognitive Prozesse wie emotional relevante Wahrnehmungseffekte, Beurteilungen, Markierungsprozesse hervorrufen; (c) weit verbreitete physiologische Anpassungen an die erregenden Bedingungen aktivieren; und (d) zu Verhalten führen, das oft, aber nicht immer, ausdrucksstark, zielgerichtet und adaptiv ist"* (Kleinginna & Kleinginna, 1981, S. 355). Für das in dieser Arbeit behandelte emotionale Sound Design ist dabei primär der folgende abgeleitete Zusammenhang relevant: Erregenden / emotionalisierenden Bedingungen, bestehend aus affektiven Erfahrungen, wird eine Valenz zugeschrieben, die zu relevanten Wahrnehmungseffekten / Beurteilungen führt, aus denen physiologische Anpassungen auf Basis der erregenden Bedingungen erfolgen, die wiederum zu einem adaptiven Verhalten führen können. In der Emotionsforschung sind Valenz und Erregung (Arousal) zwei zentrale Dimensionen zur Beschreibung und Klassifizierung emotionaler Zustände (Russell, 1980). Diese beiden Konzepte ermöglichen eine differenzierte Analyse und ein tieferes Verständnis der emotionalen Reaktionen von Individuen auf verschiedene Stimuli. Valenz beschreibt dabei einen grundlegenden Aspekt von Emotionen, der beschreibt, ob ein Reiz als attraktiv oder abstoßend empfunden wird. Positive Valenz bedeutet, dass etwas als gut oder ansprechend wahrgenommen wird. Eine negative Valenz bedeutet

hingegen, dass etwas als schlecht oder unattraktiv empfunden wird. Im Allgemeinen ersuchen Menschen Erfahrungen und Zustände, die als angenehm empfunden werden (positive Valenz) und meiden unangenehme Erfahrungen / Zustände (negative Valenz) (Russell, 1980). Dieser Wunsch des Vermeidens oder Ersuchens von valenzbehafteten Situationen und Reizen wird zusätzlich durch das Erregungsniveau (von niedrig bis hoch) des Reizes beeinflusst (Russell & Mehrabian, 1978). Erregung bezieht sich auf die Intensität oder das Aktivierungsniveau einer Emotion. Sie beschreibt, wie erregt oder beruhigt ein Individuum ist, unabhängig davon, ob die Emotion positiv oder negativ ist. Emotionen wie Begeisterung oder Angst sind Beispiele für hohe Erregung, während Zufriedenheit oder Traurigkeit niedrige Erregung darstellen können (Lang, 1995).

2.4.2 Wirkung von Emotionen und emotionalisierenden Reizen auf das Fahrverhalten

Das Fahrverhalten wird durch verschiedene Emotionen beeinflusst. ROIDL et al. zeigen, dass sich Fahrparameter wie die gewählte Geschwindigkeit und das Beschleunigungsverhalten bei kürzlich ausgelösten Emotionen mit negativer Valenz und hoher Erregung wie Ärger, Angst und Schrecken unterscheiden (Roidl, Frehse & Höger, 2014). Sie führten nach dem auslösenden Ereignis zu stärkerem Bremsen und reduzierter Geschwindigkeit in unterschiedlichen Verkehrssituationen, was darauf hinweist, dass diese Emotionen zu einem unkritischeren Verhalten in kritischen Fahrsituationen beitragen können. Demgegenüber zeigen die Ergebnisse von Precht, Keinath und Krems (2017), dass Wut, ebenfalls eine Emotion negativer Valenz und hoher Erregung, zu häufigerem aggressiven Fahrverhalten führte, was sich durch eine mehr als doppelt so hohe Wahrscheinlichkeit für Verstöße gegen die Verkehrsregeln zeigte. Die Häufigkeit von unbewussten Fahrfehlern erhöhte sich jedoch nicht mit Wut (Precht et al., 2017). Diese Ergebnisse werden von weiteren gefundenen Zusammenhängen gestützt: Lu et al. fanden heraus, dass Ärger (Wut) die Risikowahrnehmung verringert, während Angst sie erhöht (J. Lu, Xie & Zhang, 2013). Megías, Di Stasi, Maldonado, Catena und Cándido (2014) zeigten, dass die Risikoneigung bei der Entscheidungsfindung – etwa im Fall einer gelben Ampel – in Gegenwart eines negativen Reizes im Vergleich zu positiven Reizen reduziert wird, was ebenfalls zu einer Veränderung des Fahrverhaltens führte. Auch Studien zu affektiven auditiven Stimuli zeigen einen Einfluss auf das Fahrverhalten. So konnten beispielsweise die Reaktionszeiten beim Bremsen in risikoreichen und nicht risikoreichen Situationen bei negativ affektiven auditiven Reizen (Schreien eines Babys) signifikant verringert werden (Serrano, Di Stasi, Megías & Catena, 2013). Auch unterschiedliche Arten von Musik zeigen eine Wirkung auf den Zustand und das Verhalten von Fahrenden. So zeigt Dekker bspw., einen Effekt von unterschiedlichen Musikstücken auf die Einschätzung von

Fahrzeuggeschwindigkeiten (Dekker, 2015). Die Beeinflussung unterscheidet sich dabei je nachdem, ob die Musik eher beruhigend (niedriges Erregungsniveau) oder aggressionsfördernd (hohes Erregungsniveau) ist, sowie auch, ob es sich um hohe oder niedrige Geschwindigkeiten handelt. Grundsätzlich führte beruhigende Musik zu einer Unterschätzung der Geschwindigkeit, und aggressionsfördernde Musik zu einer Überschätzung. Navarro et al. zeigen, dass aufmunternde Musik (hohes Erregungsniveau, positive Valenz) die Reaktionsfähigkeit der Fahrenden auf Geschwindigkeitsänderungen des vorausfahrenden Fahrzeugs verbessert, aber auch den gewählten Sicherheitsabstand zwischen dem vorausfahrenden und dem nachfolgenden Fahrzeug verringert (Navarro, Osiurak & Reynaud, 2018).

Die Ergebnisse zeigen grundsätzlich, für Emotionen mit negativer Valenz und hoher Erregung jedoch im Speziellen, dass Emotionen einen Einfluss auf die Risikowahrnehmung, Risikobereitschaft und das Fahrverhalten haben können. Besonders die Emotionen Angst oder Furcht scheinen mit einer erhöhten Risikowahrnehmung einherzugehen, die Risikobereitschaft zu senken und zu einer reduzierten Geschwindigkeit zu führen. Dedizierte Untersuchungen zur Wirkung von Emotionen auf den gewählten Sicherheitsabstand wurden jedoch nach Kenntnisstand des Autors nicht durchgeführt.

2.4.3 Emotionen und auditive Reize

Mit dem ESD soll ein auditiver Reiz entwickelt werden, der zur akuten Stimulierung und Änderung des emotionalen Zustands in bestimmten Fahrsituationen eingesetzt werden soll. Welche Emotionen dabei von auditiven Reizen hervorgerufen werden, hängt von den jeweiligen Merkmalen dieser Klangereignisse ab. Diese Merkmale oder auch Klangcharakteristiken, von Klängen, musikalischen Stimmen oder Geräuschen werden in der Musikwissenschaft und Psychoakustik mit Begriffen wie Tonhöhe, Harmonie, Klangfarbe (Obertöne, Schärfe, Rauheit, Schwankungsstärke), Tonhaltigkeit, Lautheit und Rhythmus (Periodizität) bezeichnet (Alt & Jochum; Levitin, 2011, S. 15–16). Im Folgenden soll auf die für diese Arbeit relevanten Klangcharakteristiken und Merkmale näher eingegangen werden.

Ein besonders wichtiges Werkzeug für die Abbildung von Emotionen und emotionalen Verläufen in der Musik ist das gezielte Zusammenspiel von Tönen unterschiedlicher Tonhöhen, wie Akkorde oder Ton-Cluster. Für die Einordnung der emotionalen Wirkung dieser in der Musik müssen der Grundton und die in bestimmten Frequenzabständen (Intervallen) hinzugefügten Töne die einen Akkord bilden getrennt betrachtet werden (Västfjäll, Gulbol, Kleiner & Gärling, 2002). Akkorde bezeichnen grundsätzlich spezifische Gruppen von drei oder mehr Tönen,

die gleichzeitig oder kurzzeitig aufeinanderfolgend wiedergegeben werden und sich harmonisch deuten lassen. Als Intervall wird der Frequenzabstand zwischen zwei gleichzeitig gespielten Tönen bezeichnet. Diese werden in der Musik häufig auf einen Grundton bezogen mit Begriffen wie (kleine/große) Sekunde, (kleine/große) Terz, Quarte oder Quinte bezeichnet. Die emotionale Reaktion, die durch bestimmte Intervalle ausgelöst wird, variiert mit diesem Frequenzabstand (Costa, Ricci Bitti & Bonfiglioli, 2000). So werden bspw. Paare von Tönen, die in harmonischem Zusammenhang (Frequenzverhältnis zwischen den Tönen bspw.: 1:2, 2:3, 5:4 (große Terz)) stehen, als positiv wahrgenommen, während Ton-Paare in disharmonischem Zusammenhang (Frequenzverhältnis zwischen den Tönen bspw.: $\sqrt[13]{2}$ (kleine Sekunde), 8:9, 15:16) als negativ wahrgenommen werden. Analog dazu werden Akkorde mit dissonanten Intervallen, wie verminderte Akkorde, im Vergleich zu harmonischen Dur-Akkorden eher als negativ empfunden (Pallesen et al., 2005; Vieillard et al., 2008). Höhere Töne oder Akkorde mit höheren Grundtönen entsprechen in der Regel positiven Emotionen, während tiefere Töne mit negativen Emotionen verbunden sind. (Coutinho & Cangelosi, 2011).

Neben der harmonischen Zusammensetzung können weitere musikalische oder charakteristische Elemente wie rhythmische, perkussive Klänge, sowie zischende und rauschende Geräusche das emotionale Erleben eines Musikstücks oder Klangs hinsichtlich von Emotionen wie Angst, Traurigkeit oder Freude beeinflussen. (Coutinho & Dibben, 2013; Koelsch et al., 2013; Västfjäll, 2001). Koelsch et al. haben erfolgreich Emotionen bei ihren Probanden hervorgerufen, die angstauslösende, freudauslösende und neutrale Musik als Stimulus hörten, und Zusammenhänge zwischen den empfundenen Emotionen und den Klangcharakteristiken der Stimuli identifiziert. Sowohl die Freude- als auch die Angst-Stimuli (aber nicht die neutralen) waren sehr reich an Akkorden. Die Angst-Stimuli enthielten im Gegensatz zu den Freude-Stimuli zahlreiche perkussive Klänge sowie zischende Geräusche. Die sensorische Dissonanz (hohes Maß an harmonischer Dissonanz, das zu Schwebungen oder Rauheit in einem Klang führt) war bei neutralen Reizen am geringsten, bei Freude-Reizen mittel und bei Angst-Reizen am höchsten. Die Akkordstärke (misst wie stark ein Klang dem Klang eines Akkords ähnelt) war bei Freude höher als bei Angst und neutralen Stimuli. Die Tonartstärke (misst, wie eindeutig die Klänge eines Reizes einem einzigen Ton/einer einzigen Tonhöhe zugeordnet werden können) war bei Freude und neutralen Reizen höher als bei Angstreizen. Der spektrale Fluss (ein Maß für die spektrale Variation innerhalb von Klängen), der spektrale Scheitelpunkt (ein Maß für die Inhomogenität oder das Rauschen innerhalb eines Spektrums) und die spektrale Komplexität (die mit der Anzahl von verschiedenen Klangfarben in einem Stück korreliert) waren bei neutralen Reizen signifikant niedriger als bei Angst und Freude. (Koelsch et al., 2013).

Es zeigt sich, dass die emotionale Wirkung von Geräuschen und Klängen mit unterschiedlichen mehr oder minder spezifizierten Klangcharakteristiken oder Strukturen in Zusammenhang gebracht werden kann. Für die bspw. von Koelsch et al. verwendeten Maße existieren jedoch keine etablierten Analyse-Umgebungen oder -Werkzeuge. Für die Quantifizierung der Klangcharakteristiken der in dieser Arbeit erstellten Sounds und des Sound Design sollen deshalb die standardisierten Größen der Psychoakustik verwendet werden.

2.5 Psychoakustische Größen zur Quantifizierung der Wahrnehmung akustischer Merkmale von auditiven Reizen

Alternativ zur Beschreibung der Klangcharakteristiken von Geräuschen oder Klängen mittels musiktheoretischer Begrifflichkeiten oder abstrakter spektraler Parameter existieren mit den psychoakustischen Größen weitere Maße, die das Ziel verfolgen, die subjektive Wahrnehmung von Geräuschen zu objektivieren und messbar zu machen. Psychoakustische Größen sind quantitative Parameter, die die Wahrnehmung und Bewertung von Geräuschen und Klängen durch das menschliche Gehör beschreiben. Sie umfassen verschiedene Aspekte der Klangwahrnehmung, die über die rein physikalischen Eigenschaften von Schall hinausgehen und psychologische Reaktionen auf akustische Reize miteinschließen (Alt & Jochum). Diese Größen, die auf physikalischen Parametern wie Frequenz, Modulationsgrad und Schalldruckpegel basieren, sind proportional zum menschlichen Hörempfinden kalibriert (Hauswirth, 2018a, 2018b). Es gibt insgesamt sechs zentrale psychoakustische Größen:

- **Lautheit:** Diese psychoakustische Größe entspricht der durch Menschen wahrgenommene Lautstärke von akustischen Luftschallereignissen und Geräuschen und wird in der Einheit Sone angegeben. Ein Anstieg der Lautheit verdoppelt den Sone-Wert entsprechend der Verdoppelung der empfundenen Lautstärke (Genuit, 2009; Hauswirth, 2018a).
- **Rauigkeit:** Die psychoakustische Rauigkeit entspricht einer wahrgenommenen Klangeigenschaft, ähnlich einer stark ausgeprägten sensorischen Dissonanz, die durch höherfrequente Schwankungen (Modulationen) in Amplitude oder Frequenz entsteht. Diese Eigenschaft ist insbesondere für die Klangqualitätsbewertung in der Automobilindustrie relevant, in der ein rauer Motorlauf als qualitativ minderwertig wahrgenommen wird. Rauigkeit wird empfunden, wenn Geräusche Amplituden- oder Frequenzmodulierungen zwischen 20 und 300 Hz aufweisen. Sie wird als unangenehm und aggressiv wahrgenommen und in Asper angegeben (Hauswirth, 2018b; Sottek & Genuit, 2013).

- **Schwankungsstärke:** Diese Größe ähnelt der Rauigkeit, hängt aber mit deutlich niedrigeren Modulationsfrequenzen zusammen. Schwankungsstärke beeinflusst die Wahrnehmung von Geräuschen, indem sie eine Art "Vibrieren" des Klanges erzeugt, das als angenehm oder unangenehm empfunden werden kann. Schwankungsstärke wird empfunden bei sehr niedrigen Modulationsfrequenzen bis zu 4 Hz. Die Schwankungsstärke wird in Vacil angegeben (Becker, Sottek & Lobato, 2022; Hauswirth, 2018b).
- **Schärfe:** Diese psychoakustische Größe gibt an, wie dominant hochfrequente Anteile eines Geräusches, wie bspw. Zischen, sind und das Hörempfinden prägen. In praktischen Anwendungen hilft die Schärfe dabei, die Durchdringungsfähigkeit von Warnsignalen oder Alarmsystemen zu optimieren. Die psychoakustische Schärfe wird in Acum angegeben. Diese Größe steht ebenfalls in direktem Verhältnis zum menschlichen Empfinden, was durch eine Verdoppelung des Acum Wertes mit einer Verdoppelung der wahrgenommenen Schärfe abgebildet wird. (Hauswirth, 2018a; Sottek, 2016).
- **Tonhaltigkeit:** Die psychoakustische Tonhaltigkeit ist ein Maß dafür, wie stark ein Klang als tonaler oder harmonischer Klang wahrgenommen wird, im Gegensatz zu einem rauschhaften oder geräuschhaften Klang. Sie ist ein wichtiger Faktor in der Musikproduktion, der Akustik und dem Sounddesign, da sie beschreibt, wie klar oder deutlich ein Ton als Ton wahrgenommen wird, und hilft zu verstehen, warum bestimmte Klänge melodisch oder musikalisch erscheinen. Tonhaltigkeit wird angegeben in tonality units nach Hörmodell von Sottek (tuHMS). (Hauswirth, 2018b; Sottek, 2015).
- **Impulshaltigkeit:** Mit diesem einheitslosen Maß werden Spitzen oder sprungartige Änderungen in der Lautheit bezeichnet, die kurzfristig den Geräuschpegel erhöhen. Sie ist entscheidend für die Beurteilung von Geräuschen, wie sie etwa bei impulsartigen Schussgeräuschen oder Explosionslärm auftreten, oder aber bei schlagenden, perkussiven Geräuschen. Die Impulshaltigkeit wird auch in der Normung und Lärmregulierung verwendet, um die Auswirkungen solcher Geräusche auf Menschen zu bewerten. Impulshaltigkeit wird angegeben in impulsiveness units (iu). (Sottek, Vranken & Busch, 1995)

Die Analyse der psychoakustischen Parameter von Geräuschen kann mittels professioneller Akustik-Auswertesoftware, wie bspw. der HEAD Acoustics Suite (HEAD Acoustics, 2024), und dem dazugehörigen erweiterten Analysepaket „psychoakustik“ (HEAD Acoustics, 2023) erfolgen.

Zusammengefasst bieten diese psychoakustischen Größen eine Methode zur quantitativen Beschreibung und Analyse von Geräuschen, die weit über die bloße Messung physikalischer Eigenschaften von Schall hinausgeht. Sie erlauben es

Forschenden und Ingenieur*innen, Geräusche in einer Weise zu bewerten, die die menschliche Wahrnehmung direkt berücksichtigt.

2.6 Verwendete Prinzipien und Technologien zur Erzeugung, Steuerung und Bearbeitung der emotionalisierenden Sounds und des Sound Designs.

Abgeleitet aus den Erkenntnissen aus den Kapiteln 2.3 und 2.4 werden im Rahmen dieser Arbeit Sounds und ein aktives Sound Design entwickelt. Hierfür werden unterschiedliche grundlegende technische Möglichkeiten zur Synthese und Veränderung von unterschiedlichsten Tönen und Klängen verwendet. Das grundlegende Prinzip des entwickelten Sound Designs ist, dass zunächst ein neutrales grundlegendes aktives Sound Design erzeugt wird, und dieses im Nachgang verändert / nachbearbeitet wird, um den gewünschten emotionalisierenden Charakter herauszuarbeiten. Das Sound Design muss zusätzlich entsprechend eines aktiven Sound Design anhand des Fahrzeugzustands gesteuert werden. Im Folgenden sollen die in dieser Arbeit verwendeten Prinzipien dargelegt werden. Zusätzlich sollen am Ende des Kapitels Softwarelösungen, die zur Erzeugung und Nachbearbeitung der Sounds sowie des Sound Design in dieser Arbeit verwendet wurden, vorgestellt werden.

2.6.1 Additive Klangsyntax zur Erzeugung künstlicher Fahrzeuggeräusche

Das in dieser Arbeit entwickelte Sound Design, im Speziellen seine emotionalisierenden dynamischen Aspekte, geht weit über die in Fahrzeugen üblichen Geräuschkulissen hinaus. Dennoch ist das Ziel für das grundlegende aktive Sound Design, unabhängig des emotionalisierenden Aspekts, eine fahrzeugtypische Geräuschkulisse beim Fahren darzustellen. Das Fahrgeräusch in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ist, von Wind- und Rollgeräuschen in hohen Geschwindigkeiten abgesehen, primär durch das Geräusch der Antriebseinheit geprägt. Die Antriebseinheit, bestehend aus dem Verbrennungsmotor und dem Getriebe sowie den Ladungswechselkomponenten der Ansaug- und Abgasanlage, ist die Hauptquelle vibroakustischer Erregung in einem Fahrzeug. (Zeller, 2012, S. 217). Die periodische vibroakustische Erregung der Antriebseinheit lässt sich als eine Summation einzelner tonaler Geräuschanteile, sogenannter Ordnungen, der verschiedenen rotierenden Antriebskomponenten verstehen. Motorordnungen entstehen bspw. durch Unwucht-induzierte Kräfte während der Rotation der Kurbelwelle oder durch Ladungswechselkräfte sowie anderer periodischer

Geräuschanteile. Die Grundordnung ist die Drehzahl des Motors. Höhere Ordnungen sind Vielfache dieser Grundfrequenz. Jede Ordnung steht für eine entsprechende Anzahl von Schwingungen pro Umdrehung der Kurbelwelle, bspw. durch die Modulation des Motordrehmoments mit der Zündfrequenz und deren Vielfachen. Dieses Zusammenspiel der unterschiedlichen Ordnungen definiert den jeweiligen Klangcharakter eines Motors. (Zeller, 2012, S. 219). Im Rahmen des entwickelten Sound Designs soll keine spezifische Klangcharakteristik eines Verbrennungsmotors nachgebildet werden, es wird jedoch dennoch auf dem Prinzip der Ordnungen aufgebaut, um einen fahrzeugähnlichen Klangcharakter zu ermöglichen. Hierzu wird das Prinzip der additiven Synthese verwendet.

Die additive Synthese basiert auf der Addition elementarer, häufig sinusförmige, Wellenformen zur Erzeugung oder Approximation komplexer Audiosignale (Roads, 2023, S. 209). Um eine Wellenform mit einem bestimmten Spektrum zu erzeugen, werden die relativen Amplituden einer Reihe von Obertönen (analog zu höheren, ganzzahligen Ordnungen) bzgl. einer bestimmten Grundfrequenz (Grundordnung) eingestellt. Neben der Addition von Obertönen kann auch eine Addition von Partialen (Teiltönen) verwendet werden (Roads, 2023, S. 212–213). In der Akustik bezieht sich ein Teilton auf eine beliebige Frequenzkomponente in einem Spektrum. Der Teilton kann ein harmonischer Teilton (ganzzahliges Vielfaches) einer Grundfrequenz sein oder auch nicht (Roads, 2023, S. 216–217). Die Phasenlage zwischen den einzelnen Teiltönen ist bei der additiven Synthese ein mehr oder weniger wichtiger Faktor, je nach Kontext. Phasenbeziehungen sind primär in der Wahrnehmung von sehr kurzen transienten Klängen relevant sowie in komplexen Klängen, bei denen sich die Phasen bestimmter Komponenten im Laufe der Zeit verschieben. (Roads, 2023, S. 216)

2.6.2 Subtraktive Klangsintese

Subtraktive Synthese ist eine der ältesten und verbreitetsten Methoden zur Klangerzeugung in elektronischen Musikinstrumenten, insbesondere in Synthesizern. Der Kern dieser Technik liegt darin, reiche und komplexe Klangfarben zu erzeugen, indem einfache, aber harmonisch reiche Wellenformen wie Sägezahn-, Rechteck-, Dreieckswellen oder weißes Rauschen gefiltert werden, um bestimmte Frequenzen zu entfernen oder zu reduzieren. Der Prozess beginnt mit einem Oszillator, der ein ständiges, harmonisch volles Signal erzeugt. Dieses Signal wird dann durch einen oder mehrere Filter geleitet, die spezifische Frequenzbereiche abschwächen oder verstärken können. Diese Filter, oft Tiefpass-, Hochpass-, Bandpass- oder Notch-Filter, entfernen Teile des Frequenzspektrums und formen so den ursprünglichen Ton in eine neue Klangfarbe um. Neben ihrer Verwendung in der Synthese sind Filter auch für die

Klangbearbeitung und -abmischung und damit für das gesamte Sound Design von zentraler Bedeutung. Die Charakterisierung von Filtern erfolgt durch eine Amplituden-Frequenz-Antwortkurve, die festlegt, wie ein Filter auf verschiedene Frequenzen reagiert. (Roads, 2023, S. 309–310) Zudem gibt es Shelving-Filter, die alle Frequenzen ober- oder unterhalb eines bestimmten Schwellenwertes anheben oder absenken können. Moderne digitale Filter sind in der Lage, komplexe und vielfältige Filtereffekte in Echtzeit zu erzeugen. Sie sind ein wesentlicher Bestandteil von digitalen Audio-Workstations und Soundbearbeitungssoftware, wo sie dazu verwendet werden, das Klangspektrum fein abzustimmen und anzupassen. (Roads, 2023, S. 311–314)

2.6.3 Audio-Effekte

Audio-Effekte sind Komponenten in der Klanggestaltung, die auf bereits synthetisierte Geräusche angewendet werden können, um nachträglich deren Klangeigenschaften zu verändern. Auf die in dieser Arbeit verwendeten Effekte wird im Folgenden eingegangen.

Amplitudenmodulation

Amplitudenmodulation ist eine Technik, bei der die Stärke (Amplitude) eines Trägersignals entsprechend den Informationen eines Modulationssignals variiert wird. In der Audiotechnik wird diese Methode verwendet, um Klänge zu erzeugen, die reich an Obertönen sind. Dazu werden zwei oder mehr Wellenformen kombiniert, wobei eine die Amplitude der anderen kontrolliert. Wenn das Modulationssignal eine niedrige Frequenz (20 Hz bis 300 Hz) aufweist, führt die Amplitudenmodulation zu einem rauen Klangcharakter. (Roads, 2023, S. 359–360)

Delay-Effekt

Delay (Verzögerung) ist ein Audio-Effekt, der ein eingehendes Signal aufnimmt und es nach einer festgelegten Zeitdauer wieder abspielt, was zu einem Echo-Effekt führt. Dies kann zur Erzeugung räumlicher Effekte oder zur Verdichtung von Klangtexturen verwendet werden. Einstellbare Parameter umfassen in der Regel die Verzögerungszeit, Feedback (wie oft das Echo wiederholt wird), und manchmal auch die Tonhöhe des Echos. Besonders bei sehr kurzen Verzögerungszeiten (10 - 20 ms) kann der Einsatz eines Delays zu sogenannten Kamm-Effekten führen. In Zusammenhang mit einem Eingangssignals mit hohen Frequenzanteilen führt dies zu einem metallischen Klang, ähnlich einer angeschlagenen Metallplatte. (Roads, 2023, S. 726–730)

Chorus-Effekt

Der Chorus-Effekt wird erzeugt, indem das Originalsignal mit einem oder mehreren leicht zeitverzögerten und tonhöhenmodulierten Kopien des Eingangs-Signals gemischt wird. Dies wirkt, als ob mehrere Stimmen oder Instrumente gleichzeitig spielen, was eine wärmere und dichtere Klangtextur ergibt. Chorus wird oft verwendet, um eine klangliche "Verbreiterung" zu erreichen. (Roads, 2023, S. 738–739)

Hall-Effekt (Reverb)

Hall oder Reverb simuliert die natürliche Akustik eines Raumes, indem die Reflexionen eines Geräuschs an den Wänden, der Decke und dem Boden nachgebildet werden. Dies verleiht dem Klang eine räumliche Tiefe und kann die Illusion erzeugen, dass die Geräusche in unterschiedlichen physischen Umgebungen wiedergegeben werden. Parameter wie Hallzeit, Dämpfung und Diffusion können eingestellt werden, um verschiedene Umgebungen wie kleine Zimmer oder große Hallen zu simulieren. (Roads, 2023, S. 818–820)

Verzerrer (Distortion)

Verzerrer oder Distortion ist ein Effekt, der das Audiosignal absichtlich verformt, indem er die Wellenform des Signals übersteuert. Dies fügt mehr oder minder harmonische Obertöne hinzu und verändert den Klangcharakter, was oft in der Rock- und Metalmusik zur Verstärkung der Gitarren eingesetzt wird. Distortion kann von leichtem, warmem Knistern bis zu aggressivem, verzerrtem Klang reichen und wird oft genutzt, um einem Instrument mehr Präsenz und Durchsetzungskraft zu verleihen. (Roads, 2023, S. 412–416)

2.6.4 Steuerungsmöglichkeiten von synthetisierten Sounds

2.6.4.1 Shepard-Risset-Glissando

Grundsätzlich werden die in diesem Abschnitt beschriebenen Synthese-Verfahren im Kontext von Musikproduktion und Sound Design angewendet und die erwähnten Syntheseprinzipien über eine Klaviatur oder ähnliche Noten-basierten Eingabemöglichkeiten gesteuert oder gespielt, um die gewünschten Tonhöhen für die Sounds zu erzielen. Ein aktiven Sound Designs muss hingegen als akustisches Feedback bzgl. des aktuellen Fahrzeugzustands gesehen werden. Entsprechend ergibt sich die Tonhöhe des aktiven Sound Designs analog zu den Geräuschen eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotors aus der oder den Drehzahlen der Subsysteme des Antriebssystems. Da die Elektromotoren in Elektrofahrzeugen

einen deutlich größeren Drehzahlbereich aufweisen als bspw. Verbrennerfahrzeug mit einem Mehrganggetriebe, ist eine lineare Beziehung zwischen Tonhöhe eines aktiven Sound Designs und der E-Motor-Drehzahl nicht zielführend. Die Tonhöhe eines aktiven Sound Designs wäre dann aufgrund des hohen Drehzahlbereichs entweder bei niedrigen Drehzahlen viel zu niedrig, oder bei hohen Drehzahlen viel zu hoch, wodurch die Akzeptanz des grundlegenden Sound Design als natürlich und angenehm empfundenes Fahrzeuggeräusch beeinträchtigt werden könnte. Um diesem Problem bei einem aktiven Sound Design für elektrisch angetriebene Fahrzeuge aus dem Weg zu gehen, wurde bspw. von Denjean et al. (2021) das Prinzip des Shepard-Risset-Glissandos zur Tonhöhensteuerung eines aktiven Sound Designs verwendet.

Das Shepard-Risset-Glissando (SRG) nutzt einen psychoakustischen Effekt und wurde vom Psychologen Roger Shepard und dem Komponisten Jean-Claude Risset entwickelt, um die These der zirkulären Tonhöhenwahrnehmung zu beweisen und anzuwenden (Shepard, 1964). Ein Glissando bezeichnet in der Musik die kontinuierliche (gleitende) Veränderung der Tonhöhe. Obwohl das Shepard-Risset-Glissando immer in einem festen Frequenzbereich liegt, wird die Illusion eines unendlich aufsteigenden oder absteigenden Klangs erzeugt. Dies wird durch eine Anzahl von Einzelsound/-Tönen erreicht, die bspw. eine Oktave voneinander entfernt sind, aber gleichzeitig kontinuierlich in der Tonhöhe verschoben werden. Abbildung 2.5 zeigt eine grundlegende Darstellung der Struktur eines Shepard-Risset-Glissandos. Die zehn vertikalen, durchgezogenen Linien repräsentieren die einzelnen Töne (Shepard-Partiellen). Die Länge der Linien repräsentieren die Schalldruckpegel der jeweiligen Töne die durch eine trigonometrische Hüllkurve (ähnlich einem Band-Pass Filter) begrenzt werden. Die gestrichelten vertikalen Linien sollen die stetige Verschiebung der Partiellen im Frequenzbereich verdeutlichen. Zusätzlich ist die menschliche Hörschwelle eingezeichnet (Shepard, 1964).

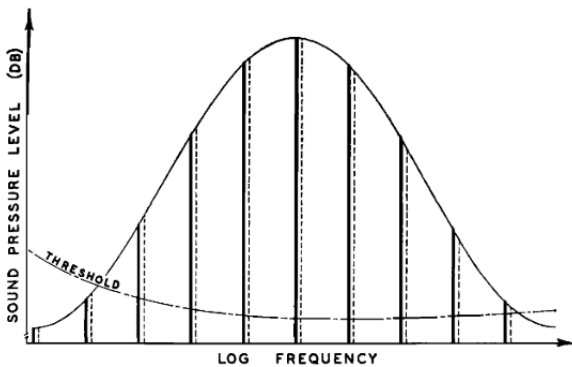


Abbildung 2.5: Schalldruckpegel (in dB) von sinusförmigen Klangkomponenten (Shepard-Partiellen), die in Oktavabständen angeordnet sind. Die gestrichelten Linien symbolisieren eine stetige Erhöhung der Frequenzen der Shepard-Partiellen. Die „Threshold“ gibt die Hörgrenze an. (Shepard, 1964)

Mursic et al. untersuchen detaillierter die Beziehung zwischen der Bewegungsrichtung eines Shepard-Risset-Glissando und seinem Einfluss auf die Vektion (Illusion der Selbstbewegung) (Mursic, Riecke, Aphorpe & Palmisano, 2017). Die Bewegungsrichtung, die während des ansteigenden Shepard-Risset-Glissando am häufigsten empfunden wird, ist aufwärts, gefolgt von vorwärts. Bei der absteigenden Variante sind hingegen die beiden häufigsten Vektionsrichtungen abwärts und rückwärts. Das Shepard-Risset-Glissando eignet damit für die Vermittlung einer steigenden oder fallenden Drehzahl, sowie einer Vorwärts- oder Rückwärtsbewegung. Zusätzlich bietet das Shepard-Risset-Glissando den Vorteil, ein damit umgesetztes aktives Sound Design auf einen bestimmten Frequenzbereich zu begrenzen und somit eine gezieltere Gestaltung des Sound Designs durch eine Anreicherung mit weiteren Klangkomponenten zu ermöglichen, solange diese nicht die wahrgenommene Vektion der Fahrenden zerstört.

2.6.4.2 MIDI- und OSC-Steuersignale

MIDI, oder Musical Instrument Digital Interface, ist ein technischer Standard, der 1983 von einer Gruppe von Musikinstrumentenherstellern eingeführt wurde, um die

Kommunikation zwischen verschiedenen elektronischen Musikinstrumenten und Computern zu ermöglichen. MIDI-Signale bestehen aus digitalen Nachrichten, die Informationen wie Tonhöhe, Lautstärke, und die Dauer einer Note übermitteln. Diese Nachrichten werden in Echtzeit gesendet und empfangen, was eine flexible und umfassende Steuerung von Musikgeräten ermöglicht. MIDI bietet eine 7-Bit-Genauigkeit, was 128 mögliche Werte für Parameter wie Anschlagsdynamik und Controller-Werte bedeutet. Diese Präzision ist für viele musikalische Anwendungen ausreichend, kann jedoch bei komplexeren Klangdesigns oder feineren Steuerungen begrenzt sein. (*MIDI Spezifikationen*, 2024a)

Open Sound Control (OSC) ist ein Kommunikationsprotokoll, das Ende der 1990er Jahre als flexiblere und erweiterbare Alternative zu MIDI entwickelt wurde. OSC verwendet Netzwerkprotokolle wie UDP und TCP/IP, um Daten zwischen Computern, Synthesizern und anderen Multimedia-Geräten auszutauschen. Im Gegensatz zu MIDI ist OSC nicht auf eine spezifische Datenstruktur oder Auflösung beschränkt, was eine größere Präzision und Flexibilität ermöglicht. OSC-Nachrichten bestehen aus Adresspfaden und Argumenten, die Parameterwerte enthalten. Adresspfade sind ähnlich wie URLs strukturiert, was eine hierarchische und gut organisierte Adressierung von Steuerbefehlen ermöglicht. Diese Struktur ermöglicht eine detaillierte Steuerung und eine einfachere Integration in moderne Netzwerkumgebungen. Ein weiterer Vorteil von OSC ist die Unterstützung von unterschiedlichen Datentypen, was eine größere Bandbreite an Ausdrucksmöglichkeiten bietet. (*OSC Spezifikationen*, 2021)

Im Kontext der Entwicklung und Validierung von Sound Designs und interaktiven Systemen kann die Wahl zwischen MIDI und OSC entscheidend sein. MIDI ist geeignet für Anwendungen, die auf etablierte Standards und einfache Implementierungen setzen, während OSC für Anwendungen geeignet ist, die erweiterte Funktionalitäten, Netzwerkintegration und eine hohe Genauigkeit und Auflösung der Steuersignale erfordern.

2.6.5 Software für Soundsynthese und Nachbearbeitung

2.6.5.1 MAGIX Acid Pro 11 und Ableton Live 11

MAGIX Acid Pro 11 und Ableton Live 12 sind digitale Audio-Workstations (DAWs) (MAGIX Software, 2023). Diese werden üblicherweise von Komponisten, Musikproduzenten und Sound Designern verwendet, um Projekte zu realisieren. DAWs bieten eine intuitive Benutzeroberfläche, und integrieren eine Vielzahl von leistungsfähigen Werkzeugen, die den gesamten Produktionsprozess von der Aufnahme über die Bearbeitung von Instrumenten und Geräuschen unterstützen.

Auch bieten DAWs eine nahtlose Integration von MIDI-Sequenzierung und Mehrspur-Tonaufnahme, was DAWs aktuell zu einer idealen Lösung für Projektstudios und professionelle Anwender macht. Ein besonderes Merkmal von Acid Pro 11 sind die bereits integrierten spezialisierten Synthesizer-Plugins, die es Benutzern ermöglichen, unterschiedliche Instrumente und Geräusche zu erschaffen. Zu den in dieser Arbeit verwendeten Plugins gehören der Analog Synth, der Cinematic Synth und die Cinematic Soundscapes. Mit Ihnen wurde der initiale Lösungsraum für emotionalisierende Sounds erstellt (Kapitel 5.1.1). Im Folgenden werden sie näher vorgestellt.

Analog Synth

Der Analog Synth in Acid Pro 11 ist ein subtraktiver Synthesizer, und darauf ausgerichtet, die „warmen“ und „reichen“ Klänge klassischer analoger Synthesizer der 70er und 80er Jahre nachzubilden. Dieses Plugin bietet eine breite Palette einstellbarer Parametern, die es ermöglichen, grundsätzlich in die Klangsynthese einzugreifen. Nutzer können klassische Synth-Leads (monophone solistische Töne), Basslines (Töne für den Bass-Bereich) und Pads (weitläufige mehrstimmige Klangtexturen) erstellen, die sich besonders für elektronische Musik und Retro-Musik eignen. (MAGIX Software, 2023)

Cinematic Synth

Das Plugin Cinematic Synth ist darauf spezialisiert, dramatische und eindringliche Klänge zu erzeugen, mit einem Fokus auf Film-, Fernseh- und Videospiel-Soundtracks. Das Synthese-Prinzip basiert hier eher auf dem Abspielen und Mischen mehrerer unterschiedlich komplexer zuvor aufgenommener Sounds mit weniger Möglichkeiten zur Parametrierung oder grundlegenden Erstellung der Sounds. Cinematic Synth bietet jedoch eine umfangreiche Bibliothek voreingestellter Sounds, die von durchdringende Solo-Sounds bis hin zu atmosphärischen Sound Effekten reichen. Diese können mittels nachgeschalteter Effekte wie Hall oder Delay an spezifische Bedürfnisse angepasst werden. Haupteinsatzzweck des Cinematic Synth ist die Unterstützung von Komponisten, die emotionale Wirkung bestehender musikalischer Untermalungen zu verstärken. (MAGIX Software, 2023)

Cinematic Soundscapes

Cinematic Soundscapes ist ein weiterer Synthesizer, der eine Vielzahl von texturierten Klangflächen und Umgebungsgeräuschen darstellen kann. Das Synthese-Prinzip basiert hier ebenfalls eher auf dem Abspielen und Mischen unterschiedlicher existierender Sounds mit weniger Möglichkeiten zur

Parametrierung oder grundlegenden Erstellung. Er bietet sich besonders an, um hintergründige Atmosphären zu schaffen, die die Stimmung und das Setting eines visuellen Ereignisses zu unterstreichen. Von subtilen Windgeräuschen bis hin zu komplexen, sich entwickelnden musikalischen Texturen ermöglicht Cinematic Soundscapes die Gestaltung unterschiedlicher akustischer Umgebungen. (MAGIX Software, 2023)

2.6.5.2 Reaktor

Der Soundgenerator (Kapitel 6), der für die Erzeugung einiger der emotionalisierenden Sounds bzw. des ESDs verwendet wird, wurde mit der visuellen Audio-Programmierungsumgebung Reaktor 6 des Berliner Unternehmen Native Instruments entwickelt (*Reaktor 6 – digital modular synthesizer* | *Komplete*, 2024b). Die Plattform ermöglicht es, durch die Nutzung von Modulen, Instrumente und logische Systeme zur Sound-Synthese und Soundveränderung zu erstellen. Ein Projekt in Reaktor, das als Ensemble bezeichnet wird, entsteht durch die modulare Verknüpfung verschiedener Funktionsbausteine. Diese Bausteine, die Ein- und Ausgänge besitzen, können untereinander mit virtuellen Kabeln verbunden werden. Ein solches Ensemble kann über Eingangsgrößen aus MIDI- und OSC-Signalen angesteuert werden. In der Entwicklungsoberfläche gibt es eine große Auswahl an Funktionsbausteinen, sogenannte Module, die akustische Elemente wie Oszillatoren oder Filter sowie mathematisch-logische Operatoren nachbilden. Durch die Verknüpfung dieser Module können funktionale Gruppen, bspw. ein Synthesizer oder der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Soundgenerator, erstellt werden. Die zwischen den Modulen kommunizierten Werte sind skalar, dimensionslos und können in Audio- und Steuersignale unterschieden werden. Sowohl Audio- wie auch Steuersignale können sowohl monophon (einstimmig) als auch polyphon (mehrstimmig) vorliegen. Die Entwicklung innerhalb der Software Reaktor kann je nach Ansprüchen an den Funktionsumfang und Ausführungsgeschwindigkeit eines zu entwickelnden Systems auf einer abstrakteren grafischen Ebene und zusätzlich einer codebasierten Ebene erfolgen (Hanley, 2015; Zavalishin, 2018).

2.7 Versuchsumgebungen, Datenerhebung und Auswertung im Kontext von Probandenversuchen

Im Rahmen dieser Arbeit werden innerhalb der methodischen Untersuchung (Kapitel 5, 7, und 8) und der abgeleiteten Validierungsmethodik (Kapitel 10) des ESD quantitative Experimente (Kapitel 2.1.3.1) in Form von Probandenstudien durchgeführt. In den folgenden Kapiteln werden die relevanten Bestandteile dieses Untersuchungsvorgehens bestehend aus Versuchsumgebungen, Stichprobe, Datenerhebungsverfahren und Verfahren der Datenauswertung studienübergreifend dargestellt. Eine detailliertere Darstellung der jeweils angewendeten Methode der durchgeführten Studien erfolgt innerhalb der jeweiligen Methodenkapiteln der Studien (Kapitel 5.1.2, 7.1.4 und 8.1.7).

2.7.1 Versuchsumgebungen für experimentelle Probandenversuche

Die experimentelle Forschung zielt darauf ab, kausale Zusammenhänge zwischen Variablen zu untersuchen, wobei abhängige und unabhängige Variablen betrachtet werden. Ein zentraler Aspekt der experimentellen Forschung ist die systematische Überprüfung der Untersuchungsergebnisse in Bezug auf die Forschungsfragen und daraus abgeleiteten Hypothesen oder geplanten Validierungszielen (Field, 2024, S. 17–19). Dies erfolgt durch den Vergleich von Bedingungen, in denen die vermutete Ursache (unabhängige Variable) – bspw. auditive Stimuli oder Emotionen – vorhanden oder abwesend ist oder variiert wird, um deren jeweiligen Einfluss auf eine abhängige Variable – bspw. das Verhalten von Subjekten – zu messen. Experimentelle Methoden streben danach, diese Bedingungen kontrolliert zu vergleichen und dadurch kausale Schlüsse zu ziehen. Dabei können auch Störvariablen identifiziert und ausgeschlossen werden, um die Gültigkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Deshalb muss die Versuchsumgebung bei experimentellen Studien gewisse Anforderungen erfüllen, um interne und externe Validität (Bortz & Döring, 2006, S. 53) zu erreichen, die sich auf die Gültigkeit von Ergebnissen auswirkt. Eine Studie ist intern valide, wenn ihre Ergebnisse eindeutig kausal interpretiert werden können (Bortz & Döring, 2006, S. 53). Die interne Validität nimmt ab, wenn die Zahl der plausiblen alternativen Erklärungen für die Ergebnisse steigt. Demgegenüber ist eine Studie extern valide, wenn ihre Ergebnisse über die spezifischen Bedingungen der Studiensituation und über die untersuchten Personen hinaus verallgemeinert werden können. Die externe Validität nimmt mit zunehmender Unnatürlichkeit der Studienbedingungen oder mit abnehmender Repräsentativität der untersuchten Stichproben ab (Bortz & Döring, 2006, S. 53). Eine wichtige Anforderung ist deshalb, dass die Untersuchung einer

Wirkung eines Stimulus innerhalb einer angemessenen Kontextualisierung bzgl. bspw. Fahrzeug und Verkehr stattfindet, um die externe Validität zu steigern (Bortz & Döring, 2006, S. 57). Die hierfür verwendeten Versuchs-Szenarien innerhalb der Versuchsumgebungen sollten im besten Falle realistische Verkehrssituationen repräsentieren, die ähnlich genug sind, um einen Vergleich innerhalb von Probanden zu ermöglichen, jedoch unterschiedlich genug, um im Fall wiederholter Messungen einen Lerneffekt zu verhindern, der die Ergebnisse verfälschen könnte (Babić, Babić, Sucha, Stanić & Toman, 2021, S. 405).

Eine Variation der dargestellten Geschwindigkeiten oder Sicherheitsabstände innerhalb der verwendeten Versuchsszenarien, können dabei helfen, den Lerneffekt zu umgehen (Horswill & McKenna, 1999), und damit die interne Validität der Studie zu erhöhen (Bortz & Döring, 2006, S. 53). Laut Winner, Fecher, Regh und Hoffman Jens (2009, S. 71) muss im Kontext der Untersuchung von Unterstützungssystemen für Fahrende das zu untersuchende System möglichst realistisch innerhalb der Studie abgebildet sein. Je nachdem, ob eine Studie online, vor Ort unter kontrollierten Bedingungen, in einem Simulator oder im realen Verkehrsgeschehen durchgeführt wird, sind diese Anforderungen jedoch nur bedingt erfüllbar, jedoch weiterhin zielführend um eine möglichst hohe externe Validität zu erreichen. Eine ausreichende Kontextualisierung innerhalb eines Hörversuchs kann bspw. eine reine Imagination/Vorstellung (Brandstätter, Schüler, Puca & Lozo, 2018, S. 188) des Sitzens in einem Fahrzeug beim Bewerten von Fahrzeuggeräuschen sein, wodurch zusätzlich eine mögliche Beeinflussung durch visuelle Reize reduziert werden kann (Menzel, Fastl, Graf & Hellbrück, 2008). Für eine Untersuchung einer möglichen Wirkung eines Stimulus auf das Fahrverhalten ist eine visuelle Kontextualisierung hingegen sinnvoll. Dem eigentlichen Fahrverhalten geht die Wahrnehmung, also Aufnahme und Verarbeitung von Informationen, voraus (Vollrath, Krems, Hasselhorn, Heuer & Rösler, 2011, S. 33). Beim Fahren wird angenommen, dass 90 % der relevanten Informationen zur Bewältigung einer Fahraufgabe visuell aufgenommen werden (Hills, 1980). Eine Untersuchung der potenziellen Wirkung auditiver Reize auf das Fahrverhalten anhand der erfassten Wahrnehmung kann damit schon durch eine Kopplung von Bild, oder besser Videomaterial, mit auditiven Reizen erfolgen. Ein wesentlicher Vorteil der Verwendung von Videomaterial besteht darin, dass alle Studienteilnehmenden denselben visuellen Reizen ausgesetzt sind, und damit eine Varianz in dem dargestellten Material zwischen Probanden als wichtiger Störfaktor eliminiert und die interne Validität erhöht wird. Auch wenn der Versuchsaufbau basierend auf Videos von Verkehrsszenarien vereinfacht ist, kann er dennoch aussagekräftige Ergebnisse liefern (Groeger & Chapman, 1996; Horswill & McKenna, 1999; Vogel, Kircher, Alm & Nilsson, 2003). Bei dieser Art Versuch sollte jedoch auf offene textbasierte Selbstberichtsfragen bspw. zum gewählten Abstand beim Folgen eines

Fahrzeugs verzichtet werden, da diese sich nicht als effektiv herausgestellt haben (Horswill, Hill & Silapurem, 2020). Ein genereller Vorteil bei der Untersuchung auf Basis von Geräuschen oder Geräusch-Video-Kombinationen besteht darin, dass hierdurch groß angelegte und dezentrale Online-Studien relativ einfach ermöglicht werden (Horswill et al., 2020).

Für die Untersuchung der Wirkung von externen visuellen oder auditiven Reizen auf das tatsächliche Fahrverhalten bieten sich hingegen realitätsnahe Fahrsimulator-Konfiguration an. Diese bieten im besten Fall eine natürliche Fahrerfahrung (externe Validität) und gute Messbarkeit des Fahrverhaltens. Gleichzeitig wird eine hohe Kontrolle und damit interne Validität durch eine Willkürlichkeit, Wiederholbarkeit und Variierbarkeit gewährleistet (Heller, 2012, S. 171). Bzgl. der Steigerung der externen Validität haben Winner et al. (2009, S. 71) die „3R“-Anforderung für Fahrsimulator-Umgebungen festgelegt. Die untersuchten Systeme (bspw. ein Fahrerassistenzsystem) müssen real sein, die präsentierten Szenarien realistisch wirken und relevant für die Untersuchung des Systems sein. Final untersucht und validiert werden sollte ein solches System dann innerhalb von Fahrten in einem realen Fahrzeug in realen Verkehrsbedingungen für eine Maximierung der externen Validität (Albers, Behrendt et al., 2016; Breuer, Hugo, Mücke & Tattersall, 2015, S. 188–189). Dies erschwert jedoch eine Kontrollierbarkeit der Randbedingungen und damit die Ansprüche eines experimentellen Versuchs an die interne Validität hinsichtlich der Willkürlichkeit, Wiederholbarkeit und Variierbarkeit (Heller, 2012, S. 171). Reale Fahrten sind daher besonders zur Validierung von Wirkungen geeignet, die zuvor in kontrollierten Bedingungen unter hoher interner Validität festgestellt wurden.

2.7.2 Datenerhebung

Damit durch experimentelle Probandenstudien Erkenntnisse über einen Zusammenhang zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen gewonnen werden können, müssen aussagekräftige Daten erhoben werden. In Studien in einem Fahrsimulator oder während realer Fahrten kann die Wirkung eines Reizes auf das Fahrverhalten von Teilnehmenden mittels objektiver Größen auf Basis des Fahrverhaltens in Relation zur Umwelt direkt gemessen und verglichen werden. So können bspw. längsdynamische Größen wie das Abstandsverhalten im Folgeverkehr oder die gewählten Geschwindigkeiten erhoben werden (Breuer et al., 2015, S. 187).

Subjektive Größen, wie eine emotionalisierende Wirkung von Reizen oder eine Wirkung auf die Wahrnehmung von dargestelltem Fahrverhalten oder Verkehrsszenarien, werden im Rahmen dieser Arbeit hingegen auf Basis der

Selbstauskunft von Studienteilnehmenden untersucht. Die hierfür notwendige Datenerhebung bzgl. der Aussagen und Selbstauskünfte der Teilnehmenden erfolgt durch Fragebögen. Eine sorgfältige Einführung der Teilnehmenden der Studie in die Fragebögen ist entscheidend, um Fehlinterpretationen und folglich falsche Angaben zu vermeiden. Um die subtilen und oft unbewussten Einflüsse von bspw. auditiven Reizen zu messen, sollte den Teilnehmenden der eigentliche Zweck der Studie vorenthalten werden (Bortz & Döring, 2006, S. 44). Dies verhindert eine mögliche Beeinflussung der Probandinnen und Probanden, die das Studienergebnis verzerren könnte. Offenheit über das Studienziel könnte dazu führen, dass Probanden ihre Reaktionen unbewusst anpassen, insbesondere, wenn sie Vorurteile gegen bestimmte Sound Designs haben, wie von Babić et al. diskutiert (Babić et al., 2021). Es ist jedoch ethisch geboten, die Probanden nach Abschluss über die tatsächlichen Ziele der Studie aufzuklären (Bortz & Döring, 2006, S. 44). Daraus folgend sollten die jeweiligen Teilnehmenden für zukünftige Themen ähnlichen Inhalts ausgeschlossen werden.

Für eine Erfassung der Wahrnehmung oder Bewertung von fahrverhaltensrelevanten Parametern wie Geschwindigkeit oder Sicherheitsabständen gibt es keine standardisierten Fragebögen, Fragen oder Skalen. Diese ergeben sich üblicherweise explizit aus den jeweiligen betrachteten Fragestellungen bspw. von Sicherheitsempfinden oder Kritikalität von Verkehrssituationen (Breuer et al., 2015, S. 187). So verwenden Horswill und McKenna (1999) eine quantitative Schätzung der Geschwindigkeit von Fahrzeugen in Videos, und fragen den Änderungswunsch bzgl. der gezeigten Geschwindigkeit ab, um riskantes Fahrverhalten zu erfassen. Groeger und Chapman (1996, S. 364) verwenden hingegen eher empfindungsbasierte Fragen. So wurden Teilnehmende zur Bewertung der Geschwindigkeit in gezeigten Videos gefragt („zu schnell“ bis „zu langsam“) oder wie sie einen gezeigten Sicherheitsabstand empfanden („zu gering“ bis „zu groß“).

Die Erfassung einer emotionalen Wirkung von Reizen erfolgt üblicherweise auf Basis von Skalen und Items (Einzelaussagen) innerhalb der Fragebögen. Für die Erfassung von Emotionen werden hierfür meist standardisierte Ratingskalen und Fragebögen genutzt, um körperliche als auch kognitive Zustände ermitteln zu können (Breuer et al., 2015, S. 187). Die Konstruktion der Fragen und Skalen muss sorgfältig erfolgen, um Missverständnisse zu vermeiden und die Qualität der erhobenen Daten zu sicherzustellen (Funke et al. 2011). Die Ratingskalen sollten weiterhin einfach und klar verständlich gestaltet sein, um eine hohe Antwortrate zu gewährleisten (Finn 1972). Solche Ratingskalen und Items ermöglichen im Gegensatz zu einer qualitativen Erhebung in offenen Fragen eine quantitative Auswertung, die auch eine große Zahl von Befragten ermöglicht. Für die Erfassung

von Emotionen, die Studienteilnehmende während des Hörens von Fahrzeuginnengeräuschen empfanden, und der Emotionen, die sie mit den Geräuschen assoziierten, wurde von Hempel (2001) eine Ratingskala auf Basis von semantischen Differentialen bestehend aus verbalen Deskriptoren (bspw. angenehm, aufregend, etc.) entwickelt. Diese Skala basiert wiederum unter anderem auf Arbeiten zum Zusammenhang verbaler Deskriptoren und stationärer Geräusche (Bismarck, 1974), psychologischen Dimensionen von Klängen (Solomon, 1959) und wahrgenommener Qualität von Naturgeräuschen (Björk, 1985). Semantische Differentiale (Osgood, 1957) bestehen typischerweise aus einer Reihe von bipolaren verbalen Deskriptorpaaren, die auf einer mehrstufigen Skala angeordnet sind (bspw. angenehm – unangenehm). Das semantische Differenzial wird häufig in Fragebögen eingesetzt, um die affektiven Bedeutungen von Konzepten oder Produkten zu messen und die emotionalen Reaktionen der Befragten zu erfassen. Die Skala von Hempel (2001) beinhaltet einerseits eine Vielzahl von Deskriptorpaaren, die die Dimensionen Valenz (angenehm – unangenehm), Erregung (erregend – beruhigend) repräsentieren. Damit ist sie geeignet, um potenzielle emotionale Reaktionen auf auditive Stimuli detailliert zu erfassen. Zusätzlich beinhaltet die Skala auch Adjektivpaare, die Erkenntnisse über die subjektive Wahrnehmung von Klangeigenschaften von Geräuschen ermöglichen.

Es existieren auch dedizierte standardisierte Skalen zur Erfassung der emotionalen Zustände von Testpersonen, bspw. die deutsche Version der „Positive and Negative Affective Schedule“ (PANAS) Skala (B. Breyer & Bluemke, 2016) oder die Self-Assessment-Manikin (SAM) Skala (Bradley & Lang, 1994). Die deutsche Version der PANAS-Skala (B. Breyer & Bluemke, 2016) ist ein psychologisches Messinstrument, das zwei unabhängige affektive Dimensionen erfasst: positiven Affekt und negativen Affekt. Das Instrument verwendet zehn verbale Adjektive für negative und zehn für positive Zustände, um die Intensität oder Häufigkeit dieser Emotionen bei den Befragten zu messen. Das PANAS dient dazu, sowohl den aktuellen (state) als auch den langfristigen (trait) affektiven Zustand einer Person zu bestimmen. (Brandstätter et al., 2018). Die SAM-Skala hingegen misst Valenz, Erregung und Dominanz als Dimensionen affektiver Reaktionen. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass es ohne sprachliche Elemente auskommt, was es unabhängig von kulturellem Hintergrund, Alter oder Bildungsstand macht. Es umfasst drei bildhafte Ratingskalen, die jeweils eine dieser Dimensionen veranschaulichen. Die verschiedenen Bewertungsstufen werden durch Figuren dargestellt, wodurch affektive Reaktionen auf diverse Stimuli dimensional klassifiziert werden können. (Brandstätter et al., 2018).

Beide Skalen ermöglichen eine detaillierte Wiedergabe und Einordnung der emotionalen Zustände. Die PANAS-Skala enthält jedoch nicht den emotionalen Zustand „bedroht“, der insbesondere für den betrachteten Ansatz des ESDs in dieser Arbeit erfasst werden muss. Die SAM-Skala ermöglicht eine sehr intuitive und unmittelbare Möglichkeit, um empfundene Emotionen in den Dimensionen Valenz, Erregung und Dominanz auszudrücken. Es ist jedoch schwierig, spezifischere emotionale Zustände wie „ängstlich“ oder „bedroht“ zu unterscheiden. Aus diesen Gründen wird für die vorliegende Forschungsarbeit eine auf die für die Forschungsfragen relevanten Dimensionen reduzierte Version der Skala von Hempel (2001) verwendet.

2.7.2.1 Stichprobengrößen in Probandenstudien

Die Stichprobengröße innerhalb von Probandenstudien bedingt grundsätzlich die Aussagekraft der Ergebnisse. Je nach gewähltem (statistischen) Auswerteverfahren gibt es unterschiedliche Mindeststichprobengrößen. Im Rahmen der Untersuchung von Fahrerassistenzsystemen, die eine systemische Nähe zu einem ESD darstellen, sollten nach Breuer et al. (2015, S. 185–186) mindestens 20 gültige Datensätze pro Szenario für eine valide Studie vorhanden sein. Für statistische Nachweise nach ISO 26262 für die Absicherung von Sicherheits-Systemen ist eine Mindestanzahl von 29 Probanden erforderlich (ISO 26262-1, 2018). Generell empfehlen Breuer et al. (2015) eine initiale Probandenzahl von 30 bis 50, um relevante demografische Merkmale abzudecken, während umfassendere Systemüberprüfungen ein Vielfaches dieser Anzahl benötigen können (Breuer et al., 2015, S. 186).

2.7.2.2 Auswahl der Teilnehmenden für die Probandenstudien

Bei Probandenstudien ist eine Vielzahl von Gruppierungen von Testpersonen möglich. Grundsätzlich sollten zunächst die beiden Gruppen „Fachkundige“ und einfache Testpersonen unterschieden werden. Studien mit Fachkundigen sind besonders hilfreich, wenn Konzepte untersucht werden und dazu ein fachkundiges Feedback eingeholt werden soll (Breuer et al., 2015, S. 185). Diese Fachkundigen können mit ihrer Expertise neues Wissen oder Ideen beitragen, jedoch können sich die mit dieser Gruppe erzielten Ergebnisse stark von den Eindrücken und Rückmeldungen von Personen mit weniger oder keiner Expertise in einem bestimmten Bereich unterscheiden (M. Wang, Sun & Chen, 2012, S. 5051). Innerhalb der vorliegenden Arbeit soll das Konzept des ESDs anhand dessen Wirkung auf Fahrende ohne besonderes Fachwissen untersucht werden. Die Auswahl der Teilnehmenden an einer Studie sollte also die spätere Zielgruppe repräsentieren, analog zu Studien bzgl. Fahrerassistenzsystemen, wo die Interaktion zwischen den Assistenzsystemen und gewöhnlichen Fahrenden zentral

ist (Breuer et al., 2015, S. 185). Je nach Experiment und Untersuchungsgegenstand muss darauf geachtet werden, dass die Studienteilnehmenden keine beeinträchtigenden körperlichen Einschränkungen haben in Bezug auf das Hörvermögen, das für die Untersuchung der auditiven Aspekte relevant ist, oder das Sehvermögen, das für Untersuchung in Bezug auf die Wahrnehmung oder das Fahrverhalten relevant ist. Sollten diese vorliegen, muss abgefragt werden, ob diese mittels verwendeter Korrekturen (Brille, Hörgerät etc.) eine Beeinträchtigung ausgleichen können (Heller, 2012, S. 175). Die weiteren Vorgaben für die Auswahl sind, dass die Testpersonen für die Bewältigung von Fahraufgaben einen Führerschein besitzen sollten und in generell fahrfähigen Zustand und Alter sind. Die Teilnehmenden sollten des Weiteren über keine speziellen Vorkenntnisse bzgl. der Studien verfügen, die über das Wissen der generellen Zielgruppe hinausgehen (Breuer et al., 2015, S. 185). Weitere oder unbekannte Störgrößen können innerhalb eines Experimente außerdem vermieden werden, indem Probandinnen und Probanden randomisiert, also zufällig, bestimmten Versuchsgruppen zugeordnet werden (Heller, 2012, S. 183).

Im nächsten Kapitel soll auf die statistischen Verfahren, die im Rahmen dieser Arbeit für die Auswertung der erhobenen Daten genutzt wurden, näher eingegangen werden.

2.7.3 Statistische Auswerteverfahren

Statistik ist ein fundamentales Instrument der wissenschaftlichen Forschung, das es ermöglicht, aus Datenmengen sinnvolle Schlüsse zu ziehen. Statistische Methoden helfen dabei, Muster und Beziehungen in Daten zu identifizieren, Hypothesen zu testen und die Unsicherheit von Schlussfolgerungen quantitativ zu bewerten (Field, 2024, S. 51). Im Kern umfasst die Statistik zwei Hauptbereiche: die deskriptive Statistik, die Daten durch Kennzahlen und Grafiken beschreibt (Bortz & Döring, 2006, S. 76), und die inferentielle Statistik, die darauf abzielt, von einer Stichprobe auf eine Grundgesamtheit zu schließen (Bortz & Döring, 2006, S. 32). Moderne statistische Verfahren reichen von einfachen Mittelwertberechnungen und Standardabweichungen bis hin zu komplexen multivariaten Analysetechniken wie der Regressionsanalyse, logistischen Regressionen und maschinellem Lernen. Die zu verwendenden Verfahren ergeben sich primär aus den Daten-Niveaus (binär-, nominal-, kategorial-, ordinal-, intervall- oder metrisch skaliert) der abhängigen und unabhängigen Variablen, zwischen denen ein Zusammenhang untersucht werden soll (Bortz & Döring, 2006, S. 67). Des Weiteren bestimmen Faktoren wie die Größe der Stichprobe oder die Art der Verteilung der Daten das jeweils zu verwendende Verfahren. Die Ergebnisse werden typischerweise auf Signifikanz geprüft, wobei ein signifikantes Ergebnis darauf hinweist, dass eine überzufällige Abhängigkeit

zwischen den Variablen besteht. Des Weiteren kann je nach Verfahren noch eine Effektstärke errechnet werden, die angibt, wie stark der Effekt der unabhängigen Variable auf die abhängige Variable ist (Field, 2024, S. 405). Im Rahmen dieser Arbeit wurden die folgenden Verfahren angewendet.

2.7.3.1 Spearman-Rangkorrelationskoeffizient

Der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman, auch als Spearman's Rho bekannt, ist ein nicht-parametrisches Maß der statistischen Abhängigkeit zwischen zwei Variablen. Er wird verwendet, um den Grad und die Richtung einer Korrelation zwischen zwei Rangdaten zu bewerten. Dieser Koeffizient eignet sich besonders für Daten, die nicht normalverteilt sind, oder für Fälle, in denen die Beziehung zwischen den Variablen nicht linear ist. Die Berechnung des Spearman's Rho erfolgt durch die Zuordnung von Rängen zu den Datenpunkten jeder Variablen. Sobald die Ränge zugewiesen sind, wird der Korrelationskoeffizient als Spearman-Korrelationskoeffizient zwischen diesen Rängen berechnet. Das bedeutet, dass Spearman's Rho die Stärke und Richtung des linearen Zusammenhangs zwischen den Rängen der Beobachtungen darstellt. Ein Vorteil von Spearman's Rho gegenüber anderen Korrelationsmaßen, wie dem Pearson-Korrelationskoeffizienten, ist seine Robustheit gegenüber Ausreißern. Da nur die Ränge und nicht die tatsächlichen Werte der Daten in die Berechnung einfließen, haben extrem hohe oder niedrige Werte einen geringeren Einfluss auf das Ergebnis der Korrelation. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Flexibilität von Spearman's Rho bei der Analyse von sowohl ordinalen als auch metrischen Daten. Der Wertebereich von Spearman's Rho liegt zwischen -1 und +1, wobei Werte nahe +1 oder -1 eine starke positive bzw. negative monotone Korrelation anzeigen und ein Wert nahe 0 keine oder eine sehr schwache monotone Korrelation suggeriert. (Field, 2024, S. 382–383)

2.7.3.2 Student's t-Test

Der Student's *t*-Test ist eine statistische Methode, mit der geprüft wird, ob die arithmetischen Mittelwerte zweier Gruppen statistisch signifikant voneinander abweichen. Dieser parametrische Test ist besonders nützlich, um Hypothesen über die arithmetischen Mittelwerte intervallskalierter Daten zu testen. Der einseitige *t*-Test wird angewendet, wenn die Forschungshypothese eine spezifische Richtung der Unterschiede vorgibt. Bei diesem Test wird geprüft, ob der Mittelwert einer Gruppe signifikant größer oder kleiner als der Mittelwert der anderen Gruppe ist, abhängig von der Hypothese. Im Kontext dieser Arbeit bedeutet dies bspw., dass untersucht wird, ob die Schätzung des Sicherheitsabstands in Metern bei negativen Sounds signifikant geringer ist als bei neutralen oder positiven Sounds. Der

zweiseitige t -Test wird hingegen verwendet, wenn die Richtung des Unterschieds zwischen den Gruppen a priori nicht bekannt ist.

Der t -Test für unabhängige Stichproben erfordert zunächst die Prüfung der Varianzhomogenität, das heißt, die Varianzen der beiden Gruppen sollten ähnlich sein. Bei Verletzung dieser Annahme kann eine Korrektur, wie der Welch-Test, angewendet werden. Der t -Test für abhängige Stichproben, auch als t -Test für gepaarte Stichproben bekannt, wird verwendet, wenn Messungen innerhalb derselben Probanden unter verschiedenen Bedingungen (bspw. unterschiedliche akustische Stimuli) verglichen werden. Dieser Test berücksichtigt, dass die Messungen innerhalb derselben Probanden korreliert sind. Die Stichprobengröße für den Student's t -Test sollte über 30 liegen (Kwak & Kim, 2017), wenn keine normalverteilten Daten vorliegen, was mit einem Shapiro-Wilk-Test überprüft werden kann. (Field, 2024, S. 484–486)

Zusätzlich zur Signifikanzprüfung mittels des t -Test wird häufig Cohens d verwendet, um die Effektstärke zu bestimmen. Cohens d ist ein Maß für die Stärke des Effekts und wird als die standardisierte Differenz zwischen zwei Mittelwerten berechnet (Cohen, 1992). Dies ermöglicht es, die praktische Bedeutung eines statistisch signifikanten Ergebnisses unabhängig von der Stichprobengröße zu beurteilen. (Field, 2024, S. 127–129)

Für die statistische Analyse des Unterschieds von zwei Gruppen bei nicht-normal verteilten Daten oder bei kleineren Stichprobengrößen bietet sich der Einsatz nicht-parametrischer Tests an, wie bspw. der Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben und der paarweise Wilcoxon Signed-Rank-Test für abhängige Stichproben (Field, 2024, S. 326–329). Diese Methoden werden anstelle des Student's t -Tests verwendet, um die spezifischen Anforderungen der Datenstruktur und -verteilung zu erfüllen.

2.7.3.3 Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben

Der Mann-Whitney-U-Test, auch bekannt als Wilcoxon Rank Sum Test, ist ein nicht-parametrischer Test zur Überprüfung von Unterschieden zwischen zwei unabhängigen Stichproben. Er ist besonders nützlich, wenn die Verteilungen der zu vergleichenden Gruppen nicht der Normalverteilung folgen. Dieser Test vergleicht die Mediane der zwei Gruppen, indem er die Rangsummen der Beobachtungen in den Gruppen analysiert. In der praktischen Anwendung wird für jede Beobachtung in den Gruppen ein Rang zugewiesen und die Summe dieser Ränge wird für jede Gruppe berechnet. Die Nullhypothese des Tests besagt, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Beobachtungen aus der einen Gruppe gleich ist wie die Beobachtungen aus der anderen Gruppe. Der Mann-Whitney-U-Test ist

besonders effektiv für Stichprobengrößen, die größer als 30 sind, aber immer noch als marginal betrachtet werden können. (Field, 2024, S. 326–329)

2.7.3.4 Paarweiser Wilcoxon Signed-Rank-Test für abhängige Stichproben

Der paarweise Wilcoxon Signed-Rank-Test ist ein nicht-parametrischer Test, der verwendet wird, um zwei abhängige Stichproben zu vergleichen, welche die gleichen Teilnehmende unter verschiedenen Bedingungen beinhalten. Dieser Test ist besonders geeignet, um Veränderungen in den Messungen über die Zeit oder unter unterschiedlichen experimentellen Bedingungen zu analysieren. Hierbei werden die Differenzen zwischen den gepaarten Messungen betrachtet und geordnet. Positive und negative Ränge werden getrennt summiert. Der Wilcoxon Signed-Rank-Test prüft die Hypothese, dass der Mittelwert der Differenzen zwischen den gepaarten Beobachtungen Null ist. Ähnlich wie beim Mann-Whitney-U-Test basiert die Berechnung auf Rängen, was den Test robust gegenüber Ausreißern und nicht normalverteilten Daten macht. Dies macht ihn ideal für die Analyse von Daten, bei denen die Annahmen einer parametrischen Analyse verletzt sind. (Field, 2024, S. 326–329)

2.7.3.5 Binomiale logistische Regression

Die binomiale logistische Regression ist ein statistisches Verfahren, das verwendet wird, um den Zusammenhang zwischen einer binären abhängigen Variablen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen zu modellieren. Ein solches Modell ist geeignet, um die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Ereignisses basierend auf den Einflüssen verschiedener unabhängiger Variablen zu analysieren. Das Eintreten eines Ereignisses wird immer in Bezug auf einen Intercept bewertet. Der Intercept ist der vorhergesagte Wert des Modell-Kriteriums, wenn alle unabhängigen Variablen innerhalb einer Regression Null sind. Null entspricht dabei einer frei festgelegten Konfiguration der unabhängigen Variablen, die als Bezugspunkt oder Ausgangspunkt angesehen werden kann. Eine Änderung in der abhängigen Variable wird dann immer in Bezug auf eine Verschiebung der unabhängigen Variablen vom Intercept betrachtet. (Field, 2024, S. 927–936)

Im Rahmen der binomialen logistischen Regression wird eine lineare Kombination der unabhängigen Variablen gebildet. Diese wird dann verwendet, um die Logit-Transformation der Wahrscheinlichkeit des Zielereignisses (zum Beispiel die bewertete Angemessenheit des Sicherheitsabstands) zu modellieren. Die Koeffizienten der logistischen Regression werden üblicherweise durch die Maximum-Likelihood-Methode geschätzt. Die resultierenden Koeffizienten können als Odds Ratios interpretiert werden. Diese geben das Verhältnis der Chancen

(Odds) für das Eintreten des Ereignisses unter Berücksichtigung der unabhängigen Variablen an. (Field, 2024, S. 934–935)

Modellauswahl und -bewertung

Für die Auswahl des optimalen Modells werden häufig Informationskriterien wie das Akaike-Informationskriterium (AIC) und das Schwarz-Bayes-Informationskriterium (BIC) verwendet (Field, 2024, S. 1004). Das AIC misst die relative Entfernung zwischen der wahren Likelihood-Funktion der Daten und dem Modell, zuzüglich einer Konstanten, und favorisiert Modelle mit dem kleinsten AIC-Wert. Das BIC berücksichtigt die Posterior-Wahrscheinlichkeit eines wahren Modells unter einer bestimmten bayesianischen Konfiguration und bevorzugt ebenfalls Modelle mit dem niedrigsten BIC-Wert. (Field, 2024, S. 1004)

Die marginalen und pseudobedingten R^2 -Werte sind Bestimmtheitsmaße, und bieten eine Einschätzung darüber, wie viel der Varianz durch das Modell erklärt wird. Das marginale R^2 bezieht sich auf den Anteil der Varianz, der durch die fixen Effekte (bspw. akustischer Stimulus) erklärt wird, während das pseudobedingte R^2 den Anteil der Varianz angibt, der durch die Kombination aus den fixen und zufälligen Effekten (bspw. Probanden-Unterschiede) erklärt wird. Diese Werte sind nützlich, um die Erklärungskraft des Modells im Kontext der verfügbaren Daten zu beurteilen. (Field, 2024, S. 957)

Weiterführende Modellprüfung

Zur weiteren Bewertung des Modells kann das DHARMA-Paket von Hartig (2022) für die Programmiersprache R verwendet werden. DHARMA steht für Diagnostics for Hierarchical Regression Models und nutzt eine simulationsbasierte Strategie, um skalierte (Quantil-)Residuen (Abweichung eines auf Basis des Modells vorhergesagten Wertes vom tatsächlich beobachteten Wert) zu generieren. Diese Residuen sind für angepasste Binomiale Logistische Regressions-Modelle leicht interpretierbar und bieten eine elegante Methode, um die Güte der Anpassung (Goodness-of-Fit) des Modells und die Annahmen des Modells zu überprüfen. (Hartig, 2022)

3 Motivation und Zielsetzung

3.1 Motivation

Im Kapitel Grundlagen und Stand der Forschung wurde dargestellt, dass auditive Signale häufig in Form von informationell hinweisenden kurzen Geräuschen im Fahrzeuginnenraum zur Motivation zur Anpassung des Fahrverhaltens auch im Kontext der Steigerung der Fahrsicherheit verwendet und erforscht werden (Kapitel 2.3.1). Zur Verwendung emotionalisierender auditiver Reize für die Veränderung oder Beeinflussung des Fahrverhaltens hinsichtlich einer Erhöhung der Fahrsicherheit gibt es jedoch noch keine konkreten oder etablierten Ansätze. Dies ist bemerkenswert, da in unterschiedlichen Forschungsarbeiten gezeigt wurde, dass Emotionen einen Einfluss auf Fahr- und Risikoverhalten im Kontext relevanter Parameter für die Verkehrssicherheit haben können (Kapitel 2.4.2) und unterschiedliche Emotionen wiederum durch auditive Reize stimuliert und induziert werden können (Kapitel 2.4.3). Im Kontext eines aktiven Sound Design spielt eine Emotionalisierung bereits eine Rolle, jedoch ausschließlich im Kontext einer Steigerung positiver Emotionen bezüglich des Fahrens von entsprechend ausgestatteten Fahrzeugen selbst, im speziellen in E-Fahrzeugen (Kapitel 2.3.2). Um diesem Forschungsbedarf zu begegnen, soll im Rahmen dieser Arbeit ein emotionsstimulierendes aktives Sound Design entwickelt und hinsichtlich seiner Wirkung auf die Erhöhung der Verkehrssicherheit untersucht werden.

Mit dem Fehlen von Ansätzen oder Lösungen für die Nutzung emotionalisierender auditiver Reize im Mobilitätskontext geht auch eine Lücke in der methodengestützten Validierung und entsprechend notwendiger Validierungsumgebungen einher. Dieser Mangel an etablierten Methoden zur Validierung von emotionalisierenden Sound Designs erschwert die Entwicklung und Untersuchung dieser Konzepte zur Steigerung der Verkehrssicherheit. Daher besteht ein Bedarf an der Entwicklung einer Validierungsmethodik sowie Validierungsumgebung, die es ermöglichen, die Effektivität solcher Sounds hinsichtlich ihrer emotionalen Wirkung und ihres Einflusses auf das Fahrverhalten messen und validieren zu können. Diese Arbeit zielt darauf ab, auch diese Lücke zu schließen und durch die Etablierung neuer Validierungsansätze für emotionalisierende Sound Designs einen Beitrag zur validierungsgestützten Entwicklung dieser Sound Designs zu leisten.

3.2 Zielsetzung

Diese Arbeit verfolgt zwei Ziele: Einerseits soll erstmalig ein emotionalisierendes Sound Design (ESD) entwickelt und hinsichtlich einer Steigerung der Verkehrssicherheit untersucht werden. Andererseits soll eine Validierungsmethodik aus den getätigten Untersuchungen abgeleitet werden und eine Validierungsumgebung aus den Versuchsumgebungen entwickelt werden, um die kontinuierliche Validierung eines ESD zu ermöglichen.

Wie in Kapitel 2.4.2 gezeigt, haben Emotionen mit negativer Valenz und hoher Erregung (zu denen Angst und Bedrohung gehören) einen Einfluss auf die Risikowahrnehmung, Risikobereitschaft und das Fahrverhalten in Verkehrssituationen. Dediziert wurde gezeigt, dass die Emotionen Angst oder Furcht mit einer erhöhten Risikowahrnehmung einhergehen, die Risikobereitschaft senken und bspw. zu einer reduzierten gewählten Geschwindigkeit führen. Das in dieser Arbeit entwickelte ESD baut auf diesen Erkenntnissen auf und soll die Induktion von Angst bzw. Bedrohung durch ein entsprechend gestaltetes emotionalisierendes aktives Sound Design für eine Beeinflussung des Fahrverhaltens nutzen. Als der zu beeinflussende Fahrparameter wird der für die Verkehrssicherheit relevante Parameter Sicherheitsabstand (Kapitel 2.2) gewählt.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte ESD soll auf einem grundsätzlich angenehmen aktiven Sound Design (positive Valenz, niedrige Erregung) aufbauen, das in ein bedrohlich wirkendes (negative Valenz, hohe Erregung) Sound Design, als beeinflussenden Stimulus, verändert werden kann. Die Veränderung soll dabei dynamische auf Basis des aktuellen Sicherheitsabstands gesteuert werden, um eine Beeinflussung des Fahrverhalten bzgl. des Sicherheitsabstands hervorzurufen. Mittels der Entwicklung und Untersuchung dieses Sound Designs soll *Hauptforschungsfrage 1* beantwortet werden:

Hauptforschungsfrage 1:

Kann eine dynamische Emotionalisierung mittels eines aktiven Sound Designs dazu genutzt werden, mittels einer Beeinflussung des Fahrverhaltens am Beispiel des Sicherheitsabstands die Verkehrssicherheit zu erhöhen?

Um das final zu untersuchende ESD entwickeln zu können, müssen initial Sounds gefunden werden, die einerseits für das grundsätzliche aktive Sound Design als Basis, sowie als emotionalisierende Stimuli innerhalb des ESD eingesetzt werden können. Des Weiteren sollten für eine mögliche Optimierung dieser Sounds Eigenschaften von Sounds identifiziert werden, die zu einer Veränderung der

emotionalen Gemütslage führen, und als potenzielle Optimierungsparameter dienen können. Hierfür wird folgende Forschungsfrage formuliert:

Unterfrage 1.1: Welche Arten von Sounds eignen sich für eine Stimulation von Emotionen innerhalb eines emotionalisierenden Sound Design und welche Soundeigenschaften führen zu einer Veränderung der emotionalen Gemütslage während des Hörens?

Um die Wirksamkeit des ESD auf das Fahrverhalten schon frühzeitig untersuchen und validieren zu können, wird untersucht, wie sich die Wirkung emotionalisierender Sounds schon auf die reine visuelle Wahrnehmung von Sicherheitsabständen auswirken können, die wiederum das Fahrverhalten mitbedingt. Hierfür soll folgende Forschungsfrage beantwortet werden:

Unterfrage 1.2: Wie wirken sich beruhigende positive Sounds und bedrohliche negative Sounds auf die Wahrnehmung von Sicherheitsabständen aus?

Negative Emotionen wie Bedrohung und Angst, auf denen das ESD aufbaut, wirken steigernd auf Risikowahrnehmung und reduzierend auf die Risikobereitschaft (Kapitel 2.4.2). Eine vorhandene Wirkung von bedrohlichen Sounds auf die Risikowahrnehmung sollte sich deshalb sowohl auf die visuelle Einschätzung sowie die Bewertung eines Sicherheitsabstands auswirken. Die reduzierte Risikobereitschaft wiederum sollte sich auf den Änderungswunsch des Sicherheitsabstandes zeigen. Um dies zu überprüfen, wurden folgende Hypothesen aufgestellt:

Hypothese 1.1. Sounds, die (a) negative/(b) positive Emotionen hervorrufen/mit diesen Emotionen assoziiert werden, führen zu einer (a) Verringerung/(b) Erhöhung der Schätzung eines gezeigten Sicherheitsabstands in Videoaufnahmen von Fahrzeugfolgefahrten.

Hypothese 1.2. Sounds, die negative oder positive Emotionen hervorrufen/ mit diesen Emotionen assoziiert werden, haben einen Einfluss auf die gewünschte Erhöhung des gezeigten Sicherheitsabstands in Videoaufnahmen von Fahrzeugfolgefahrten.

Hypothese 1.3. Sounds, die (a) negative/(b) positive Emotionen hervorrufen/mit diesen Emotionen assoziiert werden, führen zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit, dass ein dargestellter Sicherheitsabstand als (a) zu gering/(b) angemessen bewertet wird.

Negative Emotionen wie Furcht und Angst verstärken die Risikowahrnehmung (J. Lu et al., 2013), und wirken positiv auf die Verkehrssicherheit durch bspw. eine reduzierte gewählte Geschwindigkeit und stärkere Verzögerung (Roidl et al., 2014). Damit das entwickelte ESD zu einer Erhöhung der Verkehrssicherheit beitragen kann, muss es eine vergrößernde Wirkung auf den von Fahrenden gewählten Sicherheitsabstand während des Fahrens haben. Um dies zu untersuchen soll folgende Sub-Forschungsfrage beantwortet werden:

Unterfrage 1.3: Wirkt sich ein sich mit dem Zeitabstand (THW) dynamisch änderndes emotionalisierendes Sound Design, bestehend aus beruhigendem positivem Basis-Sound und bedrohlichem negativem Sound, positiv auf den gewählten Sicherheitsabstand während des Fahrens aus?

Zur Überprüfung der Wirksamkeit eines veränderten Fahrverhaltens für die Verkehrssicherheit werden zwei Hypothesen auf Basis des durch das Kraftfahrt-Bundesamt empfohlenen Zeitabstand von 1,8 s THW geprüft (Kraftfahrt-Bundesamt, 2023):

Hypothese 2.1: Die Aufenthaltsdauer in THW-Bereichen $< 1,8$ s während des Fahrens wird verringert, wenn die Fahrenden einem negativen emotionalisierenden akustischen Stimulus ausgesetzt ist, der durch den THW gesteuert wird, im Vergleich zum Fahren ohne diesen Stimulus.

Hypothese 2.2: Der gefahrene durchschnittliche THW wird in THW-Bereichen $< 1,8$ s erhöht, wenn die Fahrenden einem negativen emotionalisierenden akustischen Stimulus ausgesetzt ist, der durch den THW gesteuert wird, im Vergleich zum Fahren ohne diesen negativen Stimulus.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer ganzheitlichen Validierungsmethodik gemäß des Validierungsansatzes der KaSPro (Kapitel 2.1.2) sowie der Entwicklung einer Validierungsumgebung in Form eines XiL-Validierungsframeworks auf Basis des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes (Kapitel 2.1.3), um zukünftige Entwicklungs- und Forschungsbestrebungen im Kontext eines ESD zu unterstützen. Die Validierung muss dabei kontinuierlich von der initialen Validierung von Einzelsounds bis zur Validierung der prototypischen Umsetzung des Sound Designs erfolgen können. Die Entwicklung der Validierungsmethodik und des XiL-Validierungsframeworks soll auf Basis der durchgeführten Untersuchungen des ESD und den dabei verwendeten Versuchsumgebungen geschehen. Dementsprechend lautet die zweite Hauptforschungsfrage:

Hauptforschungsfrage 2: Welche Validierungsmethodik sowie ein hierfür notwendiges XiL-Validierungsframework für eine kontinuierliche Validierung

emotionalisierender Sound Designs von initialen Einzelsounds bis zur prototypischen Umsetzung des Sound Designs kann aus den durchgeführten Untersuchungen abgeleitet werden?

Zur Beantwortung dieser Frage sollen drei Unterfragen beantwortet werden:

Unterfrage 2.1: Wie können ein notwendiges XiL-Validierungsframework sowie dessen Validierungskonfigurationen für eine kontinuierliche Validierung von initialen Einzelsounds bis zur prototypischen Umsetzung des emotionalisierenden Sound Designs auf Basis des IPEK-XiL-Ansatzes gestaltet sein?

Unterfrage 2.2: Wie kann eine Validierungskonfiguration im Realfahrzeug technisch ermöglicht werden?

Unterfrage 2.3: Wie kann eine abgeleitete notwendige Validierungsmethodik bestehend aus Validierungstätigkeiten für eine kontinuierliche Validierung emotionalisierender Sound Designs von initialen Einzelsounds bis zur prototypischen Umsetzung des Sound Designs auf Basis der durchgeführten Untersuchungen sowie des entwickelten XiL-Validierungsframework gestaltet sein?

4 Forschungsvorgehen

Das Forschungsvorgehen zur Beantwortung der *Hauptforschungsfragen 1* und *2* soll im Folgenden kurz dargelegt werden.

Hauptforschungsfrage 1 wird mittels experimenteller Probandenstudien beantwortet (Kapitel 2.7.2). Die Studien, deren Ergebnisse sowie die Diskussion der Ergebnisse werden in den Kapiteln 5, 7 und 8 dargestellt.

Das Forschungsdesign für die Beantwortung von *Unterfrage 1.1* bzgl. der Identifikation von emotionalisierenden Sounds und Optimierungs-Parametern für diese Art von Sounds folgt einem explorativen Forschungsansatz. Hierfür wird eine größere Menge an unterschiedlichen Sounds auf Basis von harmonischen Strukturen (extrahiert aus nachweislich emotionalisierenden Musikstücken) mittels bereits etablierten Sound Design Tools (Kapitel 2.6.5.1) generiert. Diese Sounds werden auf ihre emotionalisierende Wirkung hin auf Basis der Skala nach Hempel (2001) innerhalb einer Online-Probandenstudie von den Teilnehmenden bewertet (Kapitel 2.7.2). Zusätzlich werden die Klangeigenschaften der erstellten Sounds mittels psychoakustischer Analysen quantifiziert. Aus den subjektiven Bewertungen sowie den psychoakustischen Analysen wird dann mittels einer Korrelationsanalyse nach Zusammenhängen gesucht, um mögliche Optimierungs-Parameter für emotionalisierende Sounds zu identifizieren. Das gesamte Vorgehen und die Ergebnisse werden in Kapitel 5 beschrieben und diskutiert.

Das Forschungsdesign für *Unterfrage 1.2* und *1.3* folgt einem explanativen Ansatz. Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden Hypothesen aufgestellt, die im Rahmen von Probandenstudien geprüft werden.

In *Unterfrage 1.2* liegt der Fokus auf der Untersuchung einer Wirkung beruhigender positiver Sounds und bedrohlicher negativer Sounds auf die Wahrnehmung von Sicherheitsabständen. Hierfür werden die bezüglich der angestrebten emotionalen Wirkungen effektivsten Sounds aus Studie 1 sowie neue, auf Basis der identifizierten Optimierungsparameter erzeugte Geräusche verwendet. Die Wirkung auf die Wahrnehmung soll dabei in Anlehnung an das Vorgehen von (Horswill et al., 2020) sowie (Groeger & Chapman, 1996, S. 364) auf Basis einer Online-Probandenstudie erfolgen. Dabei werden Videos von realen Folgefahrten verwendet (Kapitel 2.7.1 / 2.7.2). Die Videos werden mit den bestehenden emotionalisierenden Sounds gekoppelt. Die Wirkung der Sounds auf die Wahrnehmung des Sicherheitsabstands wird dann mittels der quantitativen

Schätzung des gezeigten Sicherheitsabstands (*H1.1*) und des quantitativen Änderungswunsches (*H1.2*) diesbezüglich (Horswill et al., 2020) sowie einer Bewertung der Angemessenheit (*H1.3*) des gezeigten Sicherheitsabstands (Groeger & Chapman, 1996, S. 364) überprüft. Das gesamte Vorgehen und die Ergebnisse werden in Kapitel 7 beschrieben und diskutiert.

In *Unterfrage 1.3* liegt der Fokus auf der Untersuchung der Wirkung des ESD auf das Fahrverhalten bzgl. des Sicherheitsabstands. Hierfür wird eine Probandenstudie innerhalb eines Fahrsimulators mit einem prototypisch umgesetzten ESD (2.7.1) durchgeführt. Dieses ESD basiert auf Ergebnissen aus Studie 2 und verändert sich dynamisch auf Basis des aktuellen THW. Die Wirkung auf das Fahrverhalten wird innerhalb unterschiedlicher THW-Bereiche mittels der Aufenthaltsdauer in einem THW-Bereich sowie der arithmetischen Mittel des eingehaltenen THW in den jeweiligen THW-Bereichen untersucht. Der Nachweis über eine Erhöhung der Verkehrssicherheit durch das ESD wird dann auf Basis der Aufenthaltsdauer in THW-Bereich $< 1,8\text{ s}$ (*H2.1*) und dem mittleren gefahrenen THW in THW-Bereich $< 1,8\text{ s}$ (*H2.2*) überprüft. Das gesamte Vorgehen und die Ergebnisse werden in Kapitel 8 beschrieben und diskutiert.

Für die Beantwortung von *Hauptforschungsfrage 2* werden die für *Hauptforschungsfrage 1* durchgeführten Untersuchungen sowie die dafür verwendeten Versuchsumgebungen in eine Validierungsmethodik und das hierfür notwendige Validierungsframework sowie deren Validierungskonfigurationen überführt.

Für *Unterfrage 2.1* werden die verwendeten Versuchsumgebungen in ein gesamtheitliches Validierungsframework gemäß des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes (Kapitel 2.1.3) von der Validierung auf WSP-in-the-Loop-Ebene bis hin zur System-in-the-Loop-Ebene überführt (Kapitel 2.1.3). Im nächsten Schritt werden dann die einzelnen Versuchsumgebungen in explizite Validierungskonfigurationen innerhalb des Frameworks gemäß IPEK-XiL-Ansatz überführt. Das Validierungsframework sowie die Validierungskonfigurationen werden in Kapitel 9 beschrieben.

Da innerhalb dieser Arbeit keine Untersuchung auf der System-in-the-Loop-Ebene stattgefunden hat, wurde jedoch eine technische Lösung für eine Validierungskonfiguration für die Validierung eines ESD in einem realen Fahrzeug geschaffen. Mit dieser Lösung soll *Unterfrage 2.2* zur Validierung im Realfahrzeug beantwortet werden. Die technische Lösung für die Validierung in realen Fahrzeugen wird in Kapitel 9.2 beschrieben.

Abschließend wird zur Beantwortung von *Unterfrage 2.3* auf Basis der durchgeführten Untersuchungen sowie des Validierungsframeworks und dessen Validierungskonfigurationen eine Methodik zur Validierung gemäß des Validierungsansatzes der KaSPro – Karlsruher Schule der Produktentwicklung (Kapitel 2.1.1 und 2.1.2) abgeleitet. Die abgeleitete Methodik für die Validierung wird in Kapitel 10 beschrieben.

Abbildung 4.1 bietet eine Übersicht über das Forschungsvorgehen sowie das Forschungsdesign, inklusive der beschriebenen Abhängigkeiten zwischen Untersuchungen und Versuchsumgebungen sowie Validierungsframework und Validierungsmethodik.

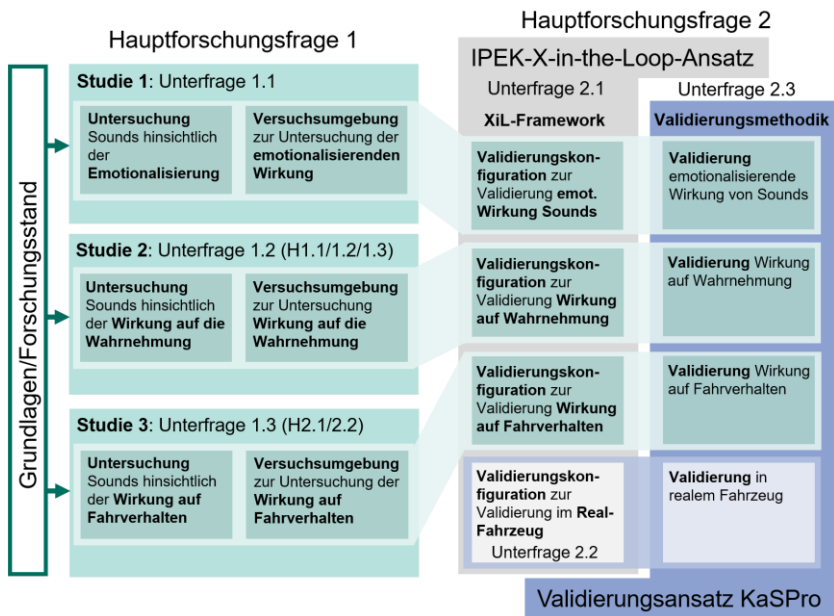


Abbildung 4.1: Übersicht über das Forschungsvorgehen und das Forschungsdesign inklusive der Forschungsfragen. Zusätzlich werden die Abhängigkeiten zwischen den Untersuchungen und Versuchsumgebungen sowie dem daraus abgeleiteten Validierungsframework und der Validierungsmethodik dargestellt

5 Identifikation und Eingrenzung von emotionalisierenden Sounds und psychoakustischen Optimierungsgrößen

Um das geplante ESD entwickeln zu können, müssen zunächst Geräusch identifiziert werden, die einerseits als Grundlage für das allgemeine aktive Sound Design, andererseits als emotionalisierende Stimuli innerhalb des ESD verwendet werden können. Darüber hinaus sollen für eine eventuell notwendige Optimierung der identifizierten Sounds Klangeigenschaften identifiziert werden, die zu einer Veränderung des emotionalen Gemütszustandes führen und als mögliche Optimierungsparameter dienen können. Zu diesem Zweck wurde die folgende Unterfrage formuliert:

Unterfrage 1.1: Welche Arten von Sounds eignen sich für eine Stimulation von Emotionen innerhalb eines emotionalisierenden Sound Design und welche Soundeigenschaften führen zu einer Veränderung der emotionalen Gemütslage während des Hörens?

Zur Beantwortung dieser Frage wurde eine explorative Studie zur Identifikation von emotionalisierenden Sounds sowie der Findung objektiver Optimierungsgrößen durchgeführt, die in diesem Kapitel vorgestellt wird.

Dieses Kapitel basiert gesamtheitlich auf der folgenden Veröffentlichung:

Petersen, M.; Zaimovic, M.; Albers, A. Evaluating emotionalizing effects of active sound designs. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* **2023**, 268, 4689–4700, doi:10.3397/IN_2023_0666. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Die Studie wurde in Teilen innerhalb einer kooperativen, durch den Autor Co-betreuten Masterarbeit aufgebaut und durchgeführt. Die gesamte Auswertung der Studie war nicht mehr Teil der Abschlussarbeit. Abschlussarbeit:

Zaimovic, M. Untersuchung der Suggestivität von Fahrzeuggeräuschen im Elektroauto.: Zum Einfluss musikalischer Attribute auf das Fahrverhalten. (unveröffentlicht) Masterarbeit; Technische Universität Berlin, Berlin, 2022/23. (Zaimovic, 2022)

Das Forschungsdesign zur Beantwortung der Unterfrage 1.1 bzgl. der Identifikation von emotionalisierenden Sounds und Optimierungsparametern für diese Art von Sounds folgt einem explorativen Forschungsansatz, da es bisher keine eindeutigen empirischen Belege zu emotionalisierenden Fahrzeuggeräuschen und deren Wirkung, oder hierfür relevanten Klangcharakteristiken gibt. Für die Studie wurden unterschiedliche Sounds auf Basis neu generierter harmonischer Strukturen mittels professioneller Sound Design-Tools erstellt. Diese werden im Rahmen eines Online-Hörversuchs von den Teilnehmenden hinsichtlich ihrer emotionalisierenden Wirkung auf Basis einer geeigneten Skala nach Hempel (2001) bewertet. Darüber hinaus werden die Klangeigenschaften der erzeugten Sounds mittels psychoakustischer Größen analysiert. Mittels einer Korrelationsanalyse wird anschließend nach Korrelationen zwischen den subjektiven Bewertungen und den psychoakustischen Größen gesucht, um mögliche Optimierungsparameter für emotionalisierende Sounds zu identifizieren. Im Folgenden wird die Studie beschrieben. Initial werden die verwendeten Stimuli (Sounds) beschrieben und wie diese generiert wurden. Im Anschluss erfolgt die Beschreibung der Methode zur Datenerhebung und Auswertung. Daraufhin werden die Studienergebnisse dargelegt und diskutiert.

5.1 Methoden und Materialien

5.1.1 Stimuli

Die Sounds, die innerhalb der Studie evaluiert wurden und als Grundlage bzw. emotionaler Stimulus innerhalb eines ESD verwendet werden sollen, wurden in mehreren Schritten iterativ erzeugt. Im ersten Schritt lag der Fokus auf der harmonischen Grundstruktur der Sounds, also den zugrundeliegenden Akkorden und Noten-Clustern sowie deren zugrundeliegende Einzeltöne. Hierfür wurden verschiedene Teile von Musikstücken aufgrund ihrer nachgewiesenen emotionalisierenden Wirkung, ihrer beabsichtigten emotionalen Wirkung oder der von Autoren bewerteten emotionalen Wirkung ausgewählt. Eine Übersicht über die ausgewählten Stücke ist in Tabelle 5.1 dargestellt.

Die Musikstücke wurden in ihre induzierenden oder angestrebten primären und sekundären Emotionen eingeteilt, die in den Klammern hinter dem Titelnamen angegeben sind. Die Stücke Mozart – Eine kleine Nachtmusik (positiv, ernst) (Mecklenbräuker & Hager, 1986), The Beatles – Yellow Submarine (positiv, heiter) (Mecklenbräuker & Hager, 1986), Mozart – 40th Symphony in G-Minor (Neutral, Majestätisch) (Stratton & Zalanowski, 1989), Frederic Chopin – Funeral March Sonata (negativ, traurig) (Västfäll, 2001), Tomaso Albioni – Adagio in G-Minor (negativ, ernst) (Eich & Metcalfe, 1989; Martin & Metha, 1997) zeigten in verschiedenen Studien emotionalisierende Wirkungen und wurden deshalb verwendet. Drei von Philip Glass komponierte Musikstücke wurden dem Soundtrack des Films Koyaanisqatsi entnommen. Die Stücke waren von minimalistischer und repetitiver Natur, wurden aber mit dem Ziel komponiert, einen emotionalisierenden Charakter (unter anderem bedrohlich) zu haben, wodurch sie sich für die Verwendung im Fahrzeugsound-Kontext besonders eigneten (Berg, 1990; Zaimovic, 2019). Drei weitere Stücke wurden aufgrund ihrer beabsichtigten Wirkung (bspw. Entspannung) oder ihrer angestrebten Assoziation durch die Komponisten ausgewählt: Relaxing Music with Nature – Waterfall (Cassio Toledo, 2022), Tibetan Meditation Music (Zone, 2022), Kraftwerk – Computer Love (Sutton, Teasdale & Broadbent, 1988). (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Tabelle 5.1: Überblick über die ausgewählten Musikstücke und ihre jeweiligen primären und sekundären Emotionen (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Primäre Emotion	Sekundäre Emotion	Musikstücke	Quellen bzgl. der emotionalen Wirkung der Stücke
Positiv	Aufregend	Koyaanisqatsi – Clouds (5:04)	(Berg, 1990; Zaimovic, 2019)
	Ernst	Mozart – Eine kleine Nachtmusik (4:40)	(Mecklenbräuker & Hager, 1986)
	Heiter	The Beatles – Yellow Submarine (2:23)	(Mecklenbräuker & Hager, 1986)
Neutral	Aufregend	Kraftwerk – Computer Love (4:54)	(Sutton et al., 1988)
	Majestätisch	Mozart – 40 th Symphony in G-Minor (1:23)	(Stratton & Zalanowski, 1989)
Negativ	Traurig	Koyaanisqatsi – Intro (1:28)	(Berg, 1990; Zaimovic, 2019)
	Traurig	Chopin – Funeral March Sonata (8:38)	(Västfjäll, 2001)
Gefahr	Ernst	Albinoni – Adagio in G-Minor (8:25)	(Eich & Metcalfe, 1989; Martin & Metha, 1997)
	Bedrohlich	Koyaanisqatsi – Resource (4:41)	(Berg, 1990; Zaimovic, 2019)
	Ernst	Koyaanisqatsi – Resource (3:23)	(Berg, 1990; Zaimovic, 2019)
Entspannung	Ausgelassen	Relaxing Music with Nature – Waterfall (2:42)	(Cassio Toledo, 2022)
	Ausgelassen	Tibetan Meditation Music (3:21)	(Zone, 2022)

Die Musikstücke sind nicht direkt als strukturelle Grundlage für Fahrzeuggeräusche verwendbar, da sie die zugrundeliegenden Akkorde und Noten im Laufe der Zeit abrupt und häufig wechseln. Um dies abzumildern und das Ergebnis der endgültigen Sounds vollständig von persönlichem Geschmack und Assoziation mit bereits bekannten Stücken zu lösen, wurden auf der Grundlage der ausgewählten Stücke neue harmonische Strukturen mittels eines trainierten Recurring Neural Network (RNN) mit zwei LSTM-Schichten (Long Short Term Memory) generiert (Karpathy, Johnson & Fei-Fei, 2015). Für die Erstellung der Sounds ist in diesem Schritt nur die harmonische Struktur der ursprünglichen Musikstücke als Grundlage für die neu generierten Sounds von Interesse. Aus diesem Grund wurden nur die MIDI-Daten (Kapitel 2.6.4.2) als Eingabetrainingsdaten für das RNN verwendet. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Das verwendete RNN wurde ursprünglich von Karpathy et. al für die zeichenbasierte Sprachmodellierung entwickelt (Karpathy et al., 2015). Es wurde entwickelt, um englische Sätze zu formulieren, bei denen das nächste (Wort-)Zeichen auf der Grundlage der vorherigen Eingabe und der Logik hinter den vorherigen Zeichen vorhergesagt wird. Um MIDI-Daten ein- und ausgeben zu können, wurde die zeichenbasierte Konfiguration des RNN gegen eine klaviaturbasierte Konfiguration ausgetauscht (Pot, 2017). Die Qualität der Ausgabe eines RNN hängt von der Menge und Qualität der Trainingsdaten ab (Kavzoglu, 2009). Um beides zu erhöhen, werden die MIDI-Musikstücke zusätzlich in kleinere MIDI-Sequenzen (verschiedene Instrumentenspuren, Frequenzbereiche oder Teile) unterteilt, die auf dem zugrunde liegenden Stück basieren (MidiWorld, 1995-2009). Diese zusätzliche Trennung ergab insgesamt 62 MIDI-Übungsdateien für die ausgewählten Stücke. In der Generierungsphase wird das RNN verwendet, um harmonische Strukturen zu erzeugen. Bei diesem Prozess wird eine Anfangssequenz als Eingabe in das Modell geladen und das RNN erzeugt eine Vorhersage für das nächste Element. Diese Vorhersage wird in der nächsten Iteration als Eingabe für das RNN verwendet, um wiederum das nächste Element zu generieren, und so weiter. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis die gewünschte Länge der generierten Sequenz erreicht ist. (Pot, 2017).

Von den ursprünglich 32 generierten Ausgabesequenzen wurden 24 Sequenzen von zwei wissenschaftlichen Mitarbeitern des Instituts ausgewählt. Die Sequenzen wurden so ausgewählt, dass sie zu den verschiedenen angestrebten Emotionen passen, aber auch stationär genug sind, um dem Anwendungsfall eines Fahrzeuggeräusches gerecht zu werden. Diese Ausgangs-MIDI-Sequenzen wurden mittels Software-Synthesizer in hörbare Sounds überführt. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Basierend auf einem Vortrag des Sound Designers Theo Green (Blade Runner 2049, Dune) auf der UFA Berlin 2019 wurden die Synthesizer Analog Synth, Cinematic Synth und Cinematic Soundscapes von MAGIX Software ausgewählt (Kapitel 2.6.5.1). Innerhalb der Synthesizer wurde eine Reihe von Presets (voreingestellte Sounds) ausgewählt, die von unterschiedlichen Sound Designern für verschiedene emotionale Effekte erstellt wurden. Diese Presets wurden auf der Grundlage der jeweiligen Kategorien (Atmo, Drones usw.) sowie ihrer sprechenden Namen (Pink Sky, Danger Zone, Black Shadow usw.) ausgewählt. Darüber hinaus flossen auch die akustischen Eigenschaften der Presets in die Auswahl ein. Dies erfolgte einerseits subjektiv, andererseits mit Hilfe psychoakustischer Metriken: Es wurde bewertet und geprüft, inwieweit sie den Faktoren von Koelsch et al. in Bezug auf freudige, neutrale oder ängstliche Emotionen entsprechen (Koelsch et al., 2013). Für die negativen Sounds war das Ziel, bedrohliche und angsteinflößend klingende Geräusche zu erstellen. Für die positiven Geräuschen war das Ziel, nicht zu fröhliche/positive Sounds zu erhalten, die als ausgelassen oder übermütig wahrgenommen werden könnten. Stattdessen sollte ein eher unbeschwerter, ruhiger Sound als generelle Grundlage für das aktive Sound Design dienen, der dann in einen sehr bedrohlichen angsteinflößenden Sound als emotionalisierenden Stimulus geändert werden kann. Eine Übersicht der generierten Sounds mit ihren sprechenden Namen, ihren jeweiligen Eingabestücken sowie den verwendeten Synthesizern und ihren jeweiligen Presets ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Der Sound *danger_negative_1_overlay_dif_eqd* wurde zusätzlich mit einem Equalizer weiterbearbeitet, um die hohen Frequenzen des Geräuschs stärker hervorzuheben. Aus den 24 generierten Sounds wurden von einem Konsortium aus fünf NVH-Experten des IPEK 16 endgültige Sounds ausgewählt, die am besten zu den angestrebten Emotionen passten. Um die Wahrnehmung der generierten Sounds als Fahrzeuggeräusche zu erhöhen und die Hörbedingungen im Fahrzeugkontext darzustellen, wurden die Sounds über die HiFi-Anlage eines BMW i3 abgespielt und mit einem Kunstkopf (Manakin Mk1 Cortex, dBSONic, Eseneler, Istanbul, Türkei) im Fahrzeuginnenraum binaural aufgenommen. Die binaurale Aufnahme erfasst den Schall so, wie er von Fahrzeuginsassen wahrgenommen wird, und ermöglicht die realistische Wiedergabe eines räumlichen Klangs, der bei der Wiedergabe über Kopfhörer den Eindruck vermittelt, als ob sich Schallquellen im Raum um den Hörer herum befinden. Die resultierenden Sounds sind 26 Sekunden lang und hatten eine Ein- und Ausblendzeit von 3 Sekunden, um den Start und das Ende während des Abspielens innerhalb des Hörversuchs weniger abrupt zu gestalten. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Tabelle 5.2: Übersicht über die erzeugten Sounds mit ihren Namen, ihren jeweiligen Eingabestücken, den verwendeten Synthesizern und Synthesizer-Presets (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023).

Preset(s)	Synthesizer	Input Musikstücke	Synthetisierte Sounds
Atmo: Black Shadow Pad: Jimmy's Tremolo	Cinematic Synth	Resource, Intro, Adagio in G-Minor (Organ)	danger_negative_1_overlay1
Atmo: Black Shadow Pad: Mullet Tremobow	Cinematic Synth	Resource, Intro, Adagio in G-Minor (Strings)	danger_negative_1_overlay_diff_eqd
Drones: Dragon Lair	Cinematic Soundscapes	Resource (Source), Computer Love	danger_neutral_1
Drones: Danger Zone	Cinematic Soundscapes	Resource (Source), Symphony in G-Minor	danger_neutral_2_1
Drones: Unfriendly	Cinematic Soundscapes	Resource (Source), Clouds	danger_serious_positive
Atmo: Jingling Waterpot	Cinematic Synth	Yellow Submarine, Tibetan Meditation Music	positive_relax_serene_2
Drones: Explorers	Cinematic Soundscapes	Eine kleine Nachtmusik, Waterfall	positive_relax_serene_3
Atmo: Pink Sky	Analog Synth	Eine kleine Nachtmusik, Tibetan Meditation Music	positive_relax_serene_4
Effects: Aliens Bypassing	Cinematic Synth	Clouds, Yellow Submarine (Chords)	positive_serene_1
Drones: Mysterious Drone	Cinematic Soundscapes	Clouds, Funeral March Sonata	serious_fear_1
Pad: Deeper Pad	Cinematic Soundscapes	Adagio in G-Minor, Funeral March Sonata, Yellow Submarine (Chords)	serious_fear_2
Effects: Detuner	Analog Synth	Computer Love, Clouds	serious_neutral_1
Atmo: Reversed Combs	Cinematic Synth	40 th Symphony in G-Minor, Clouds	serious_neutral_2
Pad: Dark Trees	Cinematic Soundscapes	Intro, Clouds, Adagio in G-Minor (Strings)	serious_serene_negative_1
Atmo: Black Magic	Cinematic Soundscapes	Intro, Clouds, Adagio in G-Minor (Organ)	serious_serene_negative_2

5.1.2 Teilnehmende

45 Probandinnen und Probanden ohne Vorwissen oder besondere Kenntnisse über den Forschungsgegenstand oder den Inhalt der Studie schlossen die Online-Studie vollständig ab und werden in der Auswertung berücksichtigt (Alter: 18-72 Jahre, arithmetisches Mittel (M) = 32,16; Standardabweichung (SD) = 10,2; Geschlecht: 26 männlich, 18 weiblich, 1 divers). 36 Personen nahmen an der Umfrage mit Kopfhörern teil, während die übrigen Lautsprecher benutzten.

5.1.3 Methode

Um zu quantifizieren, wie die erzeugten Sounds von potenziellen Fahrenden wahrgenommen werden und ob die angestrebten Emotionen bei den Probandinnen und Probanden hervorgerufen werden konnten, wurde ein Online-Hörversuch in Unipark/EFS Survey durchgeführt (Unipark, 2023). Der Hauptteil der Umfrage bestand aus Single-Choice-Fragen und bipolaren semantischen Differentialen (7-stufige bipolare Likert-Skalen). Die verbalen Deskriptoren für diese Befragung wurden aus der bestehende Skala von Hempel (2001) über die emotionale Wahrnehmung von Sounds und Geräuschen, insbesondere von Geräuschen im Fahrzeuginneren (Kapitel 2.7.2) übernommen. Die Deskriptoren aus der Skala wurden ausgewählt, weil sie in deutscher Sprache bereits verfügbar waren, im Zusammenhang mit Fahrzeuggeräuschen bereits erprobt wurden und die verschiedenen emotionalen Zustände auf eine prägnante Weise beschrieben. Deskriptoren und Deskriptoren-Paare, die für die Forschungsfrage nicht relevant waren, wurden herausgefiltert, um die Bearbeitungszeit der Studie auf unterhalb von 20-30 Minuten zu halten. Die verbleibenden Deskriptoren für die empfundenen Emotionen waren ernst, traurig, ängstlich, unbeschwert, bedroht, beruhigt und aufgeregt. Die Deskriptoren-Paare für die Likert-Skala waren bedrohlich–harmlos, unangenehm–angenehm, abstoßend–anziehend, aufdringlich–unaufdringlich, anstrengend–erholsam, beruhigend–aufregend, langweilig–anregend. Die Deskriptoren ermöglichen sowohl den Ausdruck der empfundenen Valenz (bspw. bedrohlich, angenehm, anziehend, ...) als auch der Erregung (aufregend, langweilig, aufdringlich, ...). Die Reihenfolge aller Deskriptoren wurde innerhalb der des Fragebogen für jeden Sound und für jede Person randomisiert, um systematische Reihenfolgeeffekte zu vermeiden. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Darüber hinaus wurden allgemeine Informationen über die Probanden, ihre Abspiegelgeräte und ihre Umgebung erfasst. Die Probanden wurden um Auskunft über ihr Alter, ihr Geschlecht und ihr Wohlbefinden gebeten. Außerdem wurden sie nach ihrer akustischen Umgebung (laut / geräuschvoll / leise) und den verwendeten Kopfhörern oder Lautsprechern gefragt. Sie wurden zu ihrem Musikhörverhalten

befragt, um herauszufinden, welche Art von Beziehung die Teilnehmenden zu Instrumenten, Klängen und Geräuschen haben. Nach den Eingangsfragen mussten die Probanden zur Einführung eine kurze Sounddatei eines normalen fahrenden Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor anhören und bewerten, um sie mit den Single-Choice-Fragen und der bipolaren Likert-Skala vertraut zu machen. Danach wurden die 16 Sounds in randomisierter Reihenfolge präsentiert und von den Probanden bewertet. Der in der Studie verwendete Fragebogen kann in Anhang A eingesehen werden.

Für die Analyse der akustischen Merkmale der Sounds wurde die HEAD Acoustics ArtemiS SUITE verwendet (ArtemiS SUITE, Version 14.2, HEAD Acoustics GmbH, Herzogenrath, (HEAD Acoustics, 2024)). Die folgenden psychoakustischen Analysen (Kapitel 2.5) wurden verwendet: Lautheit über Zeit (ISO 532-1, 2017), Rauheit (Hörmodell) vs. Zeit (ECMA-418-2, 2022) Fluktuationsstärke vs. Zeit (HEAD Artemis 13.2), Schärfe vs. Zeit (nach (Aures, 1985)), Tonhaltigkeit (Hörmodell) vs. Zeit (ECMA-418-2, 2022), Impulshaltigkeit (Hörmodell) vs. Zeit (HEAD Artemis 13.2) (Kapitel 2.5). Für die Berechnung der psychoakustischen Größen wurde über beide Stereokanäle der Kunstkopfmessung gemittelt. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

5.2 Ergebnisse

Für die Berechnung der Korrelationen zwischen der subjektiven Bewertung von emotionaler Wirkung und Wahrnehmung und der psychoakustischen Analysen, um wirksame psychoakustische Parameter für eine erhöhte positive oder negative Wirkung der Sounds zu finden, wurden alle Sounds einbezogen. Einzelne Bewertungen der Probanden wurden aus den Ergebnissen ausgeschlossen, wenn die Probanden angaben, dass sie Probleme bei der Wiedergabe eines bestimmten Sounds hatten. Einzelne Probanden wurden nicht ausgeschlossen aufgrund Ihrer Wiedergabegeräte oder Wiedergabesituation.

Die 16 erzeugten Sounds wurden sehr unterschiedlich bewertet. Das primäre Ziel dieser Studie besteht darin, heitere/beruhigende und besonders bedrohliche Sounds zu identifizieren. Deshalb und für eine bessere Übersichtlichkeit wird die Darstellung der Ergebnisse auf die 6 Sounds eingegrenzt, die sich in der Analyse der Befragungsdaten als die Sounds mit dem größten emotionalisierenden Effekt bzw. deutlichster Assoziation mit den gesuchten emotionalen Deskriptoren herausgestellt haben.

5.2.1 Emotionalisierende Wirkung der Sounds auf Probanden

In der ersten Frage, nachdem ein Sound präsentiert wurde, wurden die Versuchspersonen nach der Emotion gefragt, die sie beim Hören des jeweiligen Sounds empfanden. Am positivsten wurden die Sounds *positive_relax_serene_2* und *positive_relax_serene_4* wahrgenommen. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Positive_relax_serene_2 wurde von 43 Personen bewertet (siehe Abbildung 5.1). 33 % der Probandinnen und Probanden fühlten sich beim Hören des Klangs unbeschwert. 31 % gaben an, dass sie sich beruhigt fühlten. Insgesamt empfanden 64 % der Teilnehmenden positive Emotionen, während sie den Sound hörten. 21 % der Probanden gaben an, dass sie sich n ängstlich, traurig oder bedroht fühlten. 16 % gaben an, dass sie sich beim Hören des Sounds ernst fühlten, was eher keine positive oder negative Emotion (Valenz) darstellt. Keiner der Probanden fühlte sich durch das Hören des Geräusches aufgeregt, was keiner positiven oder negativen Emotion (Valenz), sondern eher einem höheren Erregungsniveau entsprechen würde. Hohe Erregung kann die positive oder negative Valenz von Emotionen jedoch verstärken (Russell & Mehrabian, 1978).

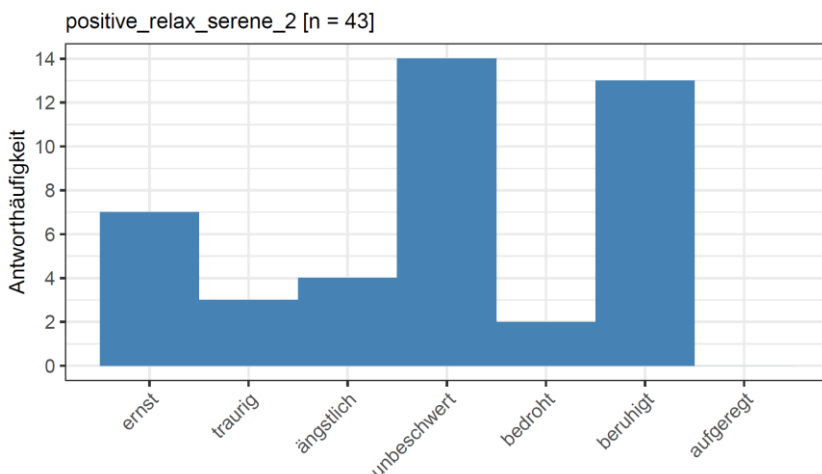


Abbildung 5.1: Antworthäufigkeit der Probanden in Bezug auf die empfundenen Emotionen während des Hörens von *positive_relax_serene_2* (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Positive_relax_serene_4 wurde von 42 Personen bewertet (siehe Abbildung 5.2). 38% der Probandinnen und Probanden gaben an, dass sie sich beim Anhören des

Klangs unbeschwert fühlten. 26 % gaben an, dass sie sich während des Hörens beruhigt fühlten. Insgesamt empfanden 64 % der Teilnehmende beim Hören des Klangs positive Emotionen. Nur 7 % der Teilnehmende empfanden insgesamt eine negative Emotion wie Traurigkeit, Angst oder Bedrohung. 19 % gaben an, dass sie sich beim Hören des Tons aufgeregt fühlten. 10 % der Probanden fühlten sich ernst.

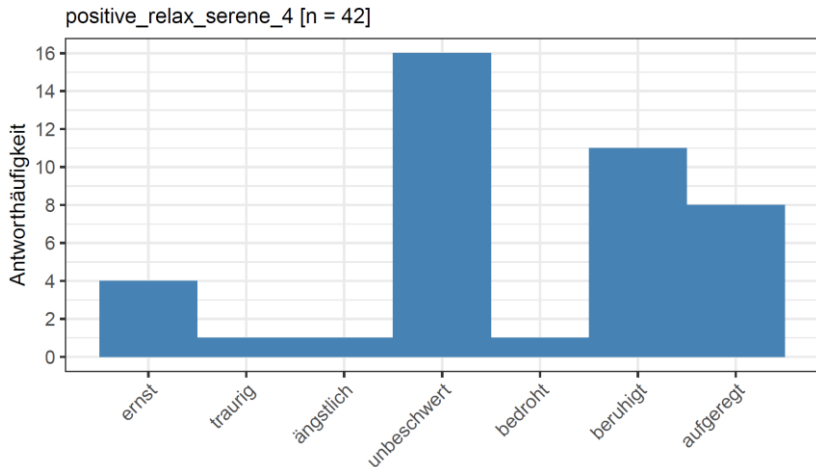


Abbildung 5.2: Antworthäufigkeit der Probanden in Bezug auf die empfundenen Emotionen während des Hörens von *positive_relax_serene_4*. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Die als bedrohlichsten und angsteinflößendsten wahrgenommenen Sounds waren *danger_negative_1_overlay_dif_eqd*, *danger_negative_1_overlay1*, *danger_serious_positive* und *serious_serene_negative_2* (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Danger_negative_1_overlay_dif_eqd wurde von 45 Personen bewertet (siehe Abbildung 5.3). Jeweils 38 % gaben an, dass sie sich beim Hören des Geräusches bedroht oder erregt fühlten. 13 % gaben an, dass sie während des Zuhörens Angst empfanden. Dies summiert sich auf 51 %, die sich bedroht / ängstlich fühlten, während 38 % Aufregung (Arousal) empfanden. Nur eine Person fühlte sich unbeschwert.

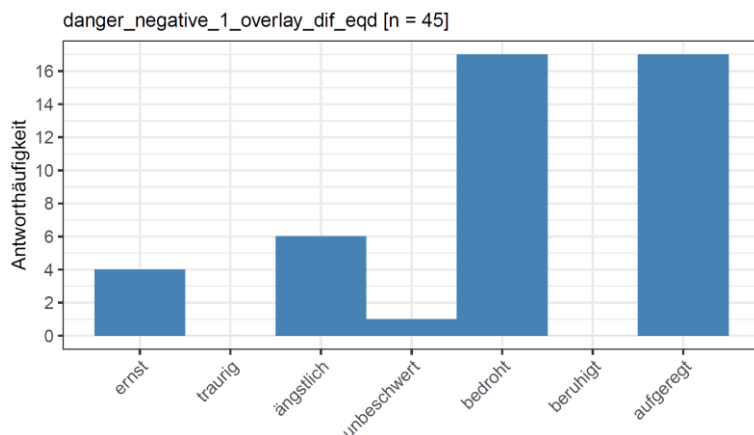


Abbildung 5.3: Antworthäufigkeit der Probanden in Bezug auf die empfundenen Emotionen während des Hörens von *danger_negative_1_overlay_dif_eqd* (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Danger_negative_1_overlay1 wurde von 44 Personen bewertet (siehe Abbildung 5.4).

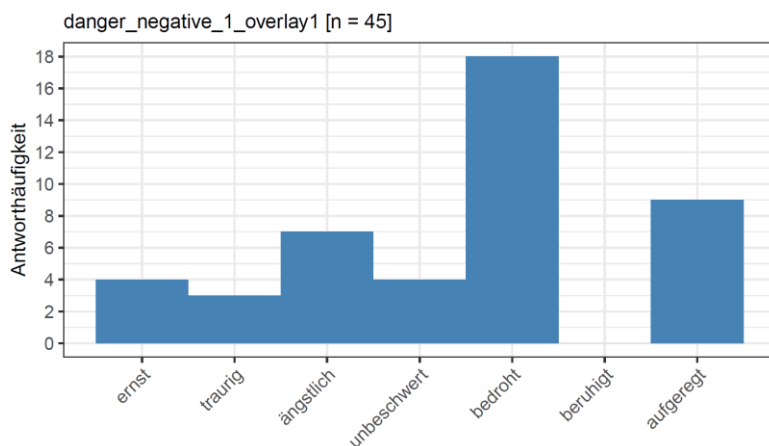


Abbildung 5.4: Antworthäufigkeit der Probanden in Bezug auf die empfundenen Emotionen während des Hörens von *danger_negative_1_overlay* (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

40 % fühlten sich beim Hören des Geräusches bedroht, 16 % ängstlich. Insgesamt empfanden 56 % der Teilnehmende beim Hören des Geräusches angsthafte Gefühle, während lediglich 9 % der Personen berichteten, dass sie sich beim Hören unbeschwert fühlten. 20 % gaben an, dass sie sich beim Hören des Geräusches aufgeregt fühlten.

Serious_serene_negative_2 wurde von 43 Personen bewertet (siehe Abbildung 5.5). 33 % gaben an, dass sie sich beim Hören des Geräusches bedroht, 21 % ängstlich fühlten. Dies ergibt eine Gesamtzahl von 54 % der Teilnehmenden, die beim Hören des Geräusches angsthafte Gefühle empfanden. Insgesamt 14 % empfanden eine positive Emotion, wie unbeschwert oder beruhigt. 14 % gaben an, dass sie sich beim Hören des Tons aufgeregt fühlten. 19 % fühlten sich während des Hörens ernst.

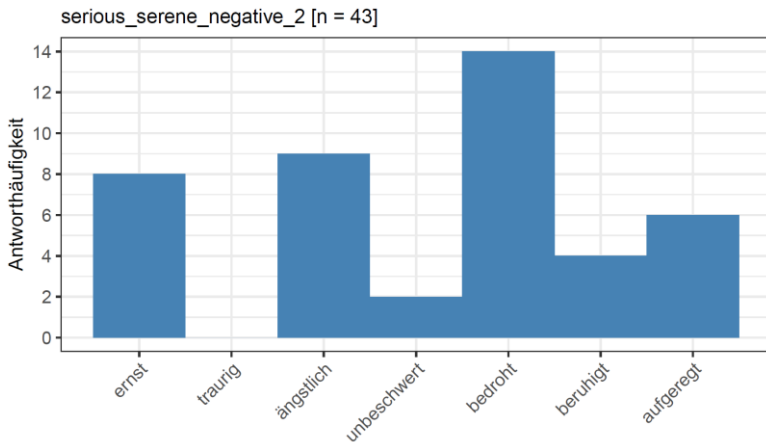


Abbildung 5.5: Antworthäufigkeit der Probanden in Bezug auf die empfundenen Emotionen während des Hörens von *serious_serene_negative_2* (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Danger_serious_positiv wurde von 43 Personen bewertet (siehe Abbildung 5.6). 35 % fühlten sich beim Hören des Geräusches bedroht, 14% ängstlich. Insgesamt empfanden 49 % der Teilnehmende beim Hören des Geräusches angsthafte Gefühle. Nur eine Testperson gab an, sich unbeschwert zu fühlen. Des Weiteren gaben 21 % an, sich beim Hören aufgeregt zu fühlen. 28 % fühlten sich beim Hören des Sounds ernst.

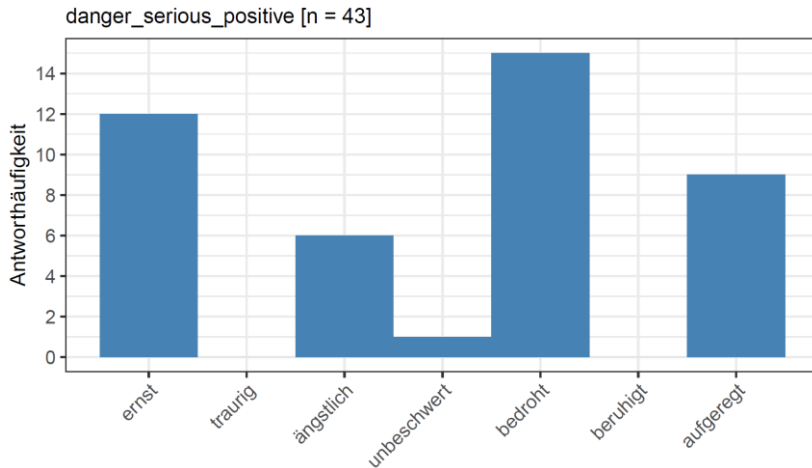


Abbildung 5.6: Antworthäufigkeit der Probanden in Bezug auf die empfundenen Emotionen während des Hörens von *danger_serious_positive* (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

5.2.2 Assoziierte emotionale Wirkung der Sounds

Im nächsten Schritt sollten sich die Probanden vorstellen, in einem Fahrzeug zu sitzen und das Geräusch anhand von Deskriptoren auf einer 7-stufigen Likert-Skala bewerten. In Abbildung 5.7 sind die gemittelten Übereinstimmungen für die bipolaren Deskriptoren dargestellt. Die Abszisse enthält den Grad der Zustimmung, während die Ordinate die verbalen Deskriptoren enthält. Im Allgemeinen ist der durchschnittliche Grad der Zustimmung für die negativen Geräusche höher als für die positiven Geräusche, wenn es darum geht, ob sie als aufdringlich, bedrohlich, unangenehm oder abstoßend (oder deren Gegenteil) empfunden werden. Die Ergebnisse für den Deskriptor „bedrohlich“ stimmen sehr gut überein mit den Aussagen des Bedrohungsgefühls aus den Single-Choice Fragen. Bedrohlich empfundene Geräusche wurden auch als eher unangenehm und abstoßend empfunden und umgekehrt. Außerdem wurden alle angsteinflößenden Geräusche als anstrengender und aufdringlicher empfunden, während positive, harmlose Geräusche als entspannender und unaufdringlicher beschrieben wurden. Bedrohlich empfundene Geräusche wurden als aufregender empfunden, während harmlose Geräusche eher als beruhigend empfunden wurden. In Bezug auf das Deskriptoren-Paar langweilig/anregend wurden alle Geräusche unabhängig von einem als ängstlich oder positiv empfundenen Geräusch im Durchschnitt recht ähnlich bewertet.

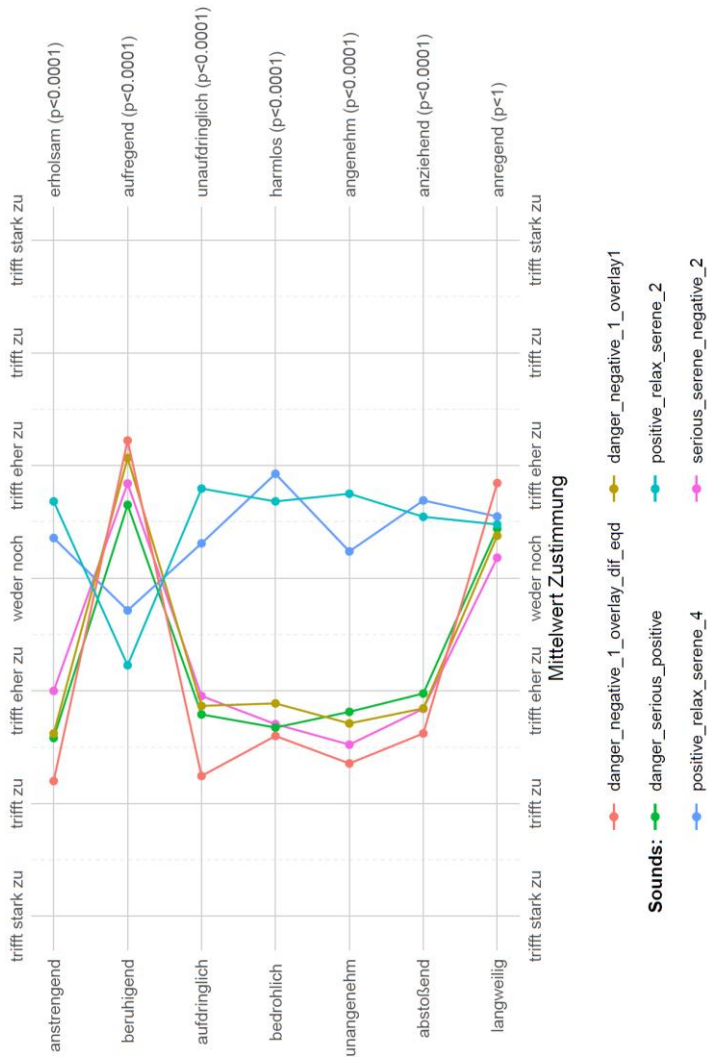


Abbildung 5.7: Mittelwert der Zustimmung der Probanden zu den bipolaren Deskriptoren für die wahrgenommene Wirkung der betrachteten Geräusche. Gesamtsignifikanz des Friedman-Rangsummentests auf der rechten Seite. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Ein Signifikanztest mit einem Friedman-Rangsummentest für unabhängige Stichproben in Blockanordnung zeigt für die 6 betrachteten Sounds signifikante Unterschiede ($p < 0,0001$) für alle Deskriptor-Paare mit Ausnahme des Deskriptorenpaars langweilig – anregend, das $p < 1$ zeigte. Über alle 16 Geräusche hinweg gerechnet war hingegen auch der Unterschied für dieses Deskriptorenpaar signifikant ($p < 0,0001$). Um die individuellen Signifikanzen zwischen zwei verschiedenen Geräuschpaaren zu bewerten, wurde ein Friedman-Post-hoc-Test durchgeführt. Dieser zeigte statistisch signifikante Unterschiede zwischen allen möglichen Paaren von ängstlichen und positiven Sounds in allen Deskriptoren mit Ausnahme von langweilig - anregend. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

5.2.3 Psychoakustische Analyse

Um Zusammenhänge zwischen den quantitativen akustischen Merkmalen und einem wahrgenommenen positiven oder negativen Klangcharakter bzw. der entsprechenden Emotion zu finden, wurden die 16 Sounds mit psychoakustischen Analysen untersucht. Abbildung 5.8 zeigt die psychoakustische Lautheit, Rauigkeit und Schwankungsstärke, und Abbildung 5.9 die Schärfe, Tonalität und Impulshaltigkeit im Zeitverlauf für die sechs betrachteten Sounds. Tabelle 5.3 stellt die gemittelten Einzahlwerte auf Basis der psychoakustischen Analysen dar.

Tabelle 5.3: Gemittelte Einzahlwerte der psychoakustischen Analyse über die betrachteten Sounds. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Soundname / Gemittelte Einzahlwerte	Lautheit vs. Zeit (sone)	Rauigkeit (Hörmodell) vs. Zeit (asper)	Schwankungsstärke vs. Zeit (vacil)	Schärfe vs. Zeit (acum)	Tonalität (Hörmodell) vs. Zeit (tuHMS)	Impulshaltigkeit (Hörmodell) vs. Zeit (iu)
serious_serene_negative_2	26,0	0,37	0,024	1,61	1,33	0,29
positive_relax_serene_4	29,8	0,37	0,011	2,12	1,19	0,30
positive_relax_serene_2	21,5	0,53	0,021	0,99	1,45	0,06
danger_serious_positive	31,6	0,38	0,028	1,91	0,71	0,25
danger_negative_1_overlay1	27,9	0,33	0,029	1,44	1,02	0,40
danger_negative_1_overlay _dif_eqd	29,7	0,29	0,154	2,87	0,82	0,89

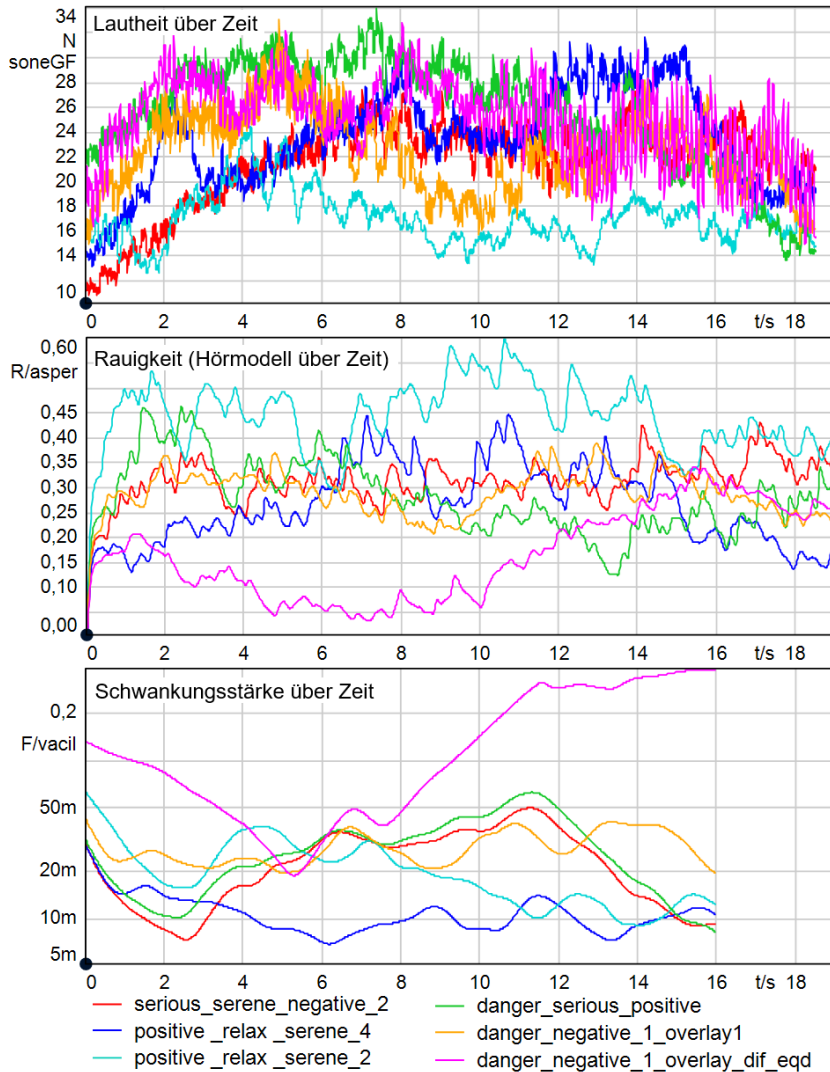


Abbildung 5.8: Psychoakustische Lautheit, Rauigkeit und Schwankungsstärke, im Zeitverlauf für die 6 betrachteten Geräusche (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

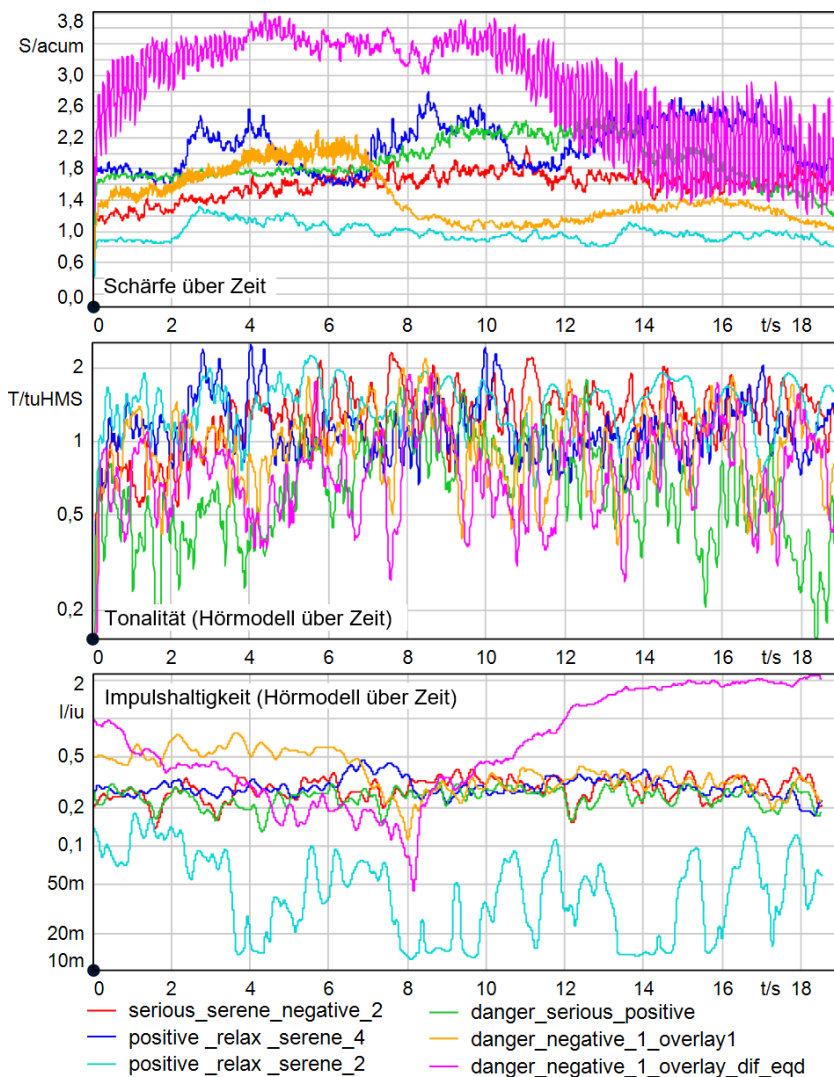


Abbildung 5.9: Psychoakustische Schärfe, Tonalität und Impulshaltigkeit im Zeitverlauf für die 6 betrachteten Geräusche (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Die einzelnen Werte aus der psychoakustischen Analyse über Zeit wurden für beide Stereokanäle der binauralen Messung separat berechnet und im Anschluss über die beiden Stereokanäle sowie Zeit gemittelt, um Einzahlwerte zu erhalten. Die analysierten Sounds wurden am Anfang und am Ende jeweils um 4 Sekunden abgeschnitten, um die Sounds von den Zeiten des Ein- und Ausfadens zu bereinigen. Zusätzlich benötigt die Analyse der Impulshaltigkeit eine gewisse Vorlaufzeit. Die Diagramme zeigen, dass die Geräusche nicht stationär waren, sondern sich über die Laufzeit in der Ausprägung der psychoakustischen Parameter ändern. Besonders auffällig ist dies bei dem Sound *danger_negative_1_overlay_diff_eqd*. Der Klang alterniert kontinuierlich zwischen einer Phase mit einem anhaltenden Zischen (zu sehen im Diagramm zur psychoakustischen Schärfe) und einer eher pulsierenden/impulsartigen Modulation des Hochfrequenzanteils (zu sehen im Diagramm der Fluktuationsstärke und Impulshaltigkeit). Auch wenn die restlichen Sounds eher stationär wirken, weisen sie doch eine zeitliche Veränderung in ihren akustischen Eigenschaften auf. Diese war erwünscht, denn sehr stationäre Sounds können einerseits steril und langweilig klingen, und würden so innerhalb von dynamischen Fahrzeuggeräusche wie bspw. einem aktiven Sound Design auch nicht vorkommen. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Bei der Impulshaltigkeit weisen die Kurven der zwei als bedrohlich empfundenen Sounds (*danger_negative_1_overlay1* und *danger_negative_1_overlay_diff_eqd*) zeitweise deutlich höhere Werte auf (bis zu 0,8 impulsiveness units (iu) für *danger_negative_1_overlay1* und 2,0 iu für *danger_negative_1_overlay_diff_eqd*) als die übrigen Geräusche. Der als positiv wahrgenommene Sound *positive_relax_serene_2* weist einen drastisch niedrigeren Wert (~0.05 iu im Mittel) auf. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Im Diagramm der Rauigkeit erreicht die Kurve des am ruhigsten und unbeschwertesten bewerteten Sounds (*positive_relax_serene_2*) die höchsten Werte auf (0.53 asper). Der Sound mit der höchsten Impulshaltigkeit (*danger_negative_1_overlay_diff_eqd*) erreicht die niedrigsten Werte für die Rauigkeit (0,29 asper). Bei der Schwankungsstärke weist einer der positiven Sounds (*positive_relax_serene_4*) die geringsten Werte auf (0,011 vacil), während der bedrohliche Sound (*danger_negative_1_overlay_diff_eqd*) den höchsten aufwies (0,154 vacil). Bzgl. der psychoakustischen Schärfe wies dieser Sound ebenfalls die höchsten Werte auf (2,87 tuHMS), allerdings nie während der Phasen hoher Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke. Der ruhige/unbeschwerte Sound mit der geringsten Impulshaltigkeit (*positive_relax_serene_2*) wies auch den niedrigsten Kurvenverlauf für die Schärfe auf. *Positive_relax_serene_4* wies hingegen höhere Werte für die Schärfe auf, obwohl der hochfrequente

Geräuschanteil dieses Sounds im Vergleich zum metallischen Zischen von *danger_negative_1_overlay_dif_eqd* subjektiv deutlich weniger scharf klingt. Im Allgemeinen gab es sowohl beruhigende/anziehende als auch angsteinflößende Sounds mit sehr ausgeprägten psychoakustischen Merkmalen. Auf Basis der Kurven und Einzahlwerte ist es jedoch nicht möglich, direkte Beziehungen zwischen den psychoakustischen Merkmalen und den jeweiligen (assoziierten) Emotionen abzuleiten. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

5.2.4 Spearman-Rang-Korrelationsanalyse

Für die Quantifizierung der Beziehung zwischen den psychoakustischen Merkmalen und den empfundenen Emotionen sowie den wahrgenommenen emotionalen Eigenschaften der Sounds wurden alle 16 Sounds hinsichtlich der in Kapitel 2.5 beschriebenen Lautheit, Rauigkeit, Schwankungsstärke, Schärfe, Tonhaltigkeit und Impulshaltigkeit analysiert. Für die empfundenen Emotionen sowie die wahrgenommenen emotionalen Eigenschaften des Klangs wurden die Mittelwerte der Bewertungen durch die Probanden verwendet. Basierend auf diesen Daten wurden Spearman's Rho Rangkorrelationskoeffizienten (Kapitel 2.7.3.1) $r(df)$ für alle möglichen Paare berechnet. Der Freiheitsgrad (df) betrug 14. Die statistische Analyse wurde in R (Version 4.2.9) unter Verwendung der Funktion "rcorr" aus dem "Hmisc"-Paket (Version 5.0) implementiert. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Die berechneten Korrelationen und ihre jeweiligen Signifikanzen (p) sind in Tabelle 5.4 dargestellt. Für die empfundenen Emotionen zeigt eine positive Korrelation eine Zunahme der jeweiligen Emotion mit einer Erhöhung des psychoakustischen Wertes. Zum Beispiel korrelierte das Gefühl, bedroht zu sein, beim Hören des Klangs stark mit einer höheren Schwankungsstärke ($r(14) = 0,46, p = 0,028$) und mittelstark mit einer höheren Impulshaltigkeit ($r(14) = 0,46, p = 0,073$) und niedrigerer Tonhaltigkeit ($r(14) = -0,43, p = 0,096$). Bei den assoziierten Emotionen/Klangeigenschaften bedeutet eine negative Korrelation, dass eine Erhöhung des psychoakustischen Wertes mit dem linken Deskriptor korreliert. Umgekehrt weist eine positive Korrelation auf einen Zusammenhang mit dem rechten Deskriptor hin. Bspw. korrelierte das Wahrnehmen des Klangs als bedrohlich stark mit einer Erhöhung der Impulshaltigkeit ($r(14) = -0,65, p = 0,008$). Absolutwerte von $r \geq 0,1$ und $< 0,4$ indizieren eine schwache Korrelation, $r \geq 0,4$ und $< 0,7$ eine mittlere und $r \geq 0,7$ und $< 0,9$ eine starke Korrelation. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Tabelle 5.4: Übersicht über die berechneten Spearman-Rang-Korrelationen zwischen psychoakustischen Merkmalen und gefühlten und assoziierten Emotionen. (Signifikanzniveaus: * = $p \leq 0,05$, ** = $p \leq 0,01$, *** = $p \leq 0,001$) (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Deskriptoren	Lautheit	Rauigkeit	Schwankungsstärke	Schärfe	Tonhaltigkeit	Impulshaltigkeit
ängstlich	<i>r</i> -0,05 <i>p</i> 0,867	0,05 0,841	0,00 0,987	-0,24 0,361	0,01 0,974	0,10 0,704
unbeschwert	<i>r</i> -0,27 <i>p</i> 0,313	-0,03 0,909	-0,57* 0,022	-0,18 0,509	0,50* 0,048	-0,59* 0,015
bedroht	<i>r</i> 0,07 <i>p</i> 0,788	0,08 0,765	0,55* 0,028	-0,15 0,586	-0,43 0,096	0,46 0,073
beruhigt	<i>r</i> -0,41 <i>p</i> 0,111	0,18 0,507	-0,59* 0,017	-0,32 0,224	0,38 0,144	-0,61* 0,012
aufgeregt	<i>r</i> 0,75*** <i>p</i> 0,001	-0,55* 0,028	0,43 0,093	0,71** 0,002	-0,18 0,517	0,50* 0,050
(-)langweilig...anregend(+)	<i>r</i> 0,81*** <i>p</i> 0,000	-0,25 0,359	0,44 0,085	0,73*** 0,001	-0,27 0,311	0,27 0,316
(-)abstoßend...anziehend(+)	<i>r</i> -0,09 <i>p</i> 0,733	0,05 0,867	-0,39 0,134	-0,11 0,696	0,27 0,316	-0,62** 0,010
(-)unangenehm...angenehm(+)	<i>r</i> -0,12 <i>p</i> 0,664	0,00 0,999	-0,44 0,085	-0,06 0,820	0,32 0,226	-0,65** 0,006
(-)bedrohlich...harmlos(+)	<i>r</i> -0,16 <i>p</i> 0,564	-0,01 0,965	-0,44 0,085	-0,13 0,629	0,42 0,109	-0,63** 0,008
(-)aufdringlich...unaufdringlich(+)	<i>r</i> -0,5 <i>p</i> 0,051	0,20 0,454	-0,55* 0,026	-0,50 0,050	0,42 0,107	-0,74** 0,001
(-)beruhigend...aufregend(+)	<i>r</i> 0,46 <i>p</i> 0,070	-0,28 0,302	0,59* 0,017	0,45 0,077	-0,35 0,178	0,73*** 0,001
(-)anstrengend...erholsam(+)	<i>r</i> -0,28 <i>p</i> 0,302	0,18 0,509	-0,43 0,095	-0,28 0,297	0,40 0,120	-0,68** 0,004

5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Für die Studie wurden 16 verschiedene Sounds mit drei verschiedenen Klangerzeugern erstellt. Basis dafür waren unterschiedliche emotionalisierende harmonische Strukturen, die aus nachweislich emotionalisierenden Musikstücken oder solchen, die aufgrund ihrer Absicht sowie Expertenbewertungen als passend erschienen, extrahiert wurden (Kapitel 5.1.1). Diese Sounds wurden von Probanden in einem Online-Hörversuch in Bezug auf die Emotionen, die die Probanden beim Hören empfanden, bewertet. Zudem gaben die Studienteilnehmenden Auskunft darüber, welche Emotionen sie den Sounds zuschrieben. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Die Ergebnisse zeigen, dass es deutliche Unterschiede in den beim Hören empfundenen Emotionen und den mit den Sounds assoziierten Emotionen gab. Auch die psychoakustische Analyse ergab, dass sich die psychoakustischen Eigenschaften zwischen den Sounds deutlich unterschieden. Die Korrelationsanalyse zeigte, dass das Gefühl, beim Hören der Sounds bedroht zu sein, mittelstark und signifikant mit einer höheren Schwankungsstärke und mittelstark aber nicht signifikant ($p = 0,073$) mit einer höheren Impulshaltigkeit korrelierte. Das Wahrnehmen eines Sounds als bedrohlich korrelierte stark und signifikant mit einer höheren Impulshaltigkeit und mittelstark aber nicht signifikant ($p = 0,085$) mit einer höheren Schwankungsstärke. Im Gegensatz dazu korrelierte ein Gefühl von Unbeschwertheit oder Beruhigung mittelstark und signifikant mit einer Verringerung der Schwankungsstärke und Impulshaltigkeit sowie mit einer Erhöhung der Tonhaltigkeit. Das Gefühl der Erregung (Arousal) beim Hören eines Sounds korrelierte stark und signifikant mit einer Erhöhung der Lautheit und Schärfe, und mittelstark mit höherer Impulshaltigkeit und Rauigkeit. Das Wahrnehmen des Sounds als aufregend/anregend korrelierte stark und signifikant mit Impulshaltigkeit/Lautheit und Schärfe sowie mittelstark mit Schwankungsstärke. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

5.4 Diskussion

Die erzeugten Sounds waren abstrakte, künstliche Geräusche mit eher vereinfachten und langsam wechselnden harmonischen Clustern oder Akkorden, um sie in den Kontext eines aktiven Sound Designs einzupassen. Dennoch zeigten die Ergebnisse hinsichtlich der von den Probanden beim Hören empfundenen Emotionen, dass die erzeugten Sounds die Emotionen unbeschwert/beruhigt oder ängstlich/bedroht hervorrufen konnten. Dies galt insbesondere für die Sounds, die auf den harmonischen Strukturen von sehr positiven oder negativen/bedrohlichen

Musikstücken aufbauten. Keiner der Sounds rief nur ein spezifisches Gefühl hervor, sondern eher die beiden positiven Gefühle (unbeschwert/beruhigt) oder die beiden negativen, angstbezogenen Gefühle (ängstlich/bedroht). Bei den am positivsten wahrgenommenen Sound *positive_relax_serene_2* und *positive_relax_serene_4* gaben die meisten Probanden (64 %) an, sich beim Hören unbeschwert oder beruhigt zu fühlen. *Positive_relax_serene_2* hatte einen höheren Anteil an induzierten negativen Emotionen, obwohl die zugrundeliegenden Musikstücke positiver waren. Dies legt nahe, dass die gewählten Synthesizer-Voreinstellungen möglicherweise einen größeren Einfluss auf die Rezeption haben als die eingehenden harmonischen Strukturen. Im Durchschnitt stimmten die Probanden bei *positive_relax_serene_2* häufiger den Sound-Deskriptoren beruhigend und angenehm zu, aber weniger dem Deskriptor harmlos, was die empfundenen negativen Emotionen widerspiegelt. Bei *positive_relax_serene_4* stimmten die Probanden im Durchschnitt häufiger dem Deskriptor harmlos zu und waren sich weniger einig, ob der Sound angenehm oder beruhigend war. Dies könnte daran liegen, dass der Sound eine höhere Impulshaltigkeit und Schärfe aufwies, die grundsätzlich mit der Emotion bedroht und der Assoziation unangenehm korrelierten. Die vorhandene Schärfe könnte die höhere Erregungsbewertung für diesen Sound erklären, was sich in den Korrelationen widerspiegelt. Die Stärke der Zustimmung für die positiven emotionalen Merkmale bei der Bewertung positiv intendierter Sounds in den Likert-Skalen waren generell deutlich niedriger als die Zustimmung zu den negativen Merkmalen bei den angsteinflößend/bedrohlich intendierten Sounds. Dies entspricht dem ursprünglichen Ziel, eher beruhigende positive Sounds zu erzeugen, aber keine extrem positiven/glücklichen Sounds, die als Grundton eines aktiven Sound Designs eher ungeeignet wären. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Für die angsteinflößenden/bedrohlichen intendierten Sounds *danger_negative_1_overlay_dif_eqd*, *danger_negative_1_overlay1*, *danger_serious_positive* und *serious_serene_negative_2* beliefen sich die empfundenen Emotionen ängstlich/bedroht auf 51 %, 56 %, 54 % bzw. 49 % der Probanden. Mit Ausnahme von *serious_serene_negative_2* riefen die Sounds bei der Mehrheit der Probanden eine ängstliche Emotion hervor und zeigten auch einen sehr niedrigen Anteil an empfundenen positiven Emotionen (ruhig/unbeschwert) von jeweils 2 %, 9 % und 2 %. Die Sounds wurden mit negativ geladenen harmonischen Strukturen aus negativ klingenden Musikstücken gewonnen sowie mit sehr düster/negativ klingenden Synthesizer-Presets bearbeitet. Die Übereinstimmung der Probanden bezüglich der wahrgenommenen emotionalen Soundeigenschaften deckte sich mit den empfundenen Emotionen während des hörens. Alle vier negativen Sounds hatten eine sehr ähnliche Kurvenprogression. *Danger_negative_1_overlay_dif_eqd* hatte die höchste unangenehme Bewertung

und wurde stärker als die anderen Sounds als aufdringlich wahrgenommen. Dies könnte an der deutlich höheren Schärfe, Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke dieses Sounds liegen. Der Hauptunterschied zwischen den vier angsteinflößenden Geräuschen war die Verteilung der Emotionen ernst und aufgeregt. Während beide hinsichtlich ihrer Valenz als neutral angesehen werden können, spiegelt aufgeregt einen Zustand der Erregung wider, der zu einer höheren wahrgenommenen Valenz im Allgemeinen führen kann und auch den Drang erhöht, aufgrund einer negativen Valenz zu handeln (Russell & Mehrabian, 1978). Dies könnte bedeuten, dass ein Sound wie *danger_negative_1_overlay_dif_eqd* mit weniger induzierten ängstlichen Emotionen (51%) im Vergleich zu *danger_negative_1_overlay1* (56%) dennoch eine erhöhte Wirksamkeit als Stimulus für das ESD haben könnte. Diese beiden Sounds zeigten auch höhere Impulshaltigkeiten, was zu den Studien von Koelsch et al. (Koelsch et al., 2013) passt, bei denen angsteinflößenden Sounds eine höhere sensorische Dissonanz (Vorhandensein von schlagenden/perkussiven Elementen) aufwiesen. *Danger_negative_1_overlay_dif_eqd* hatte weiterhin ein prominentes metallisches zischendes Geräusch, das ebenfalls in den angsteinflößenden Sounds in der Studie von Koelsch et al. dominant war. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Die Korrelationsanalyse zeigte ebenfalls Überschneidungen mit den Ergebnissen von Koelsch et al. (Koelsch et al., 2013). Es gab eine mittlere Korrelation für die empfundene Emotion bedroht mit Impulshaltigkeit, obwohl nicht signifikant ($p = 0,073$), und eine mittlere signifikante Korrelation für die bedrohliche Wahrnehmung von Sounds. Darüber hinaus zeigte die empfundene Emotion bedroht eine mittlere und signifikante Korrelation mit der Schwankungsstärke. Beide psychoakustischen Parameter können mit dem Vorhandensein von schlagenden/perkussiven Elementen aus der Studie von Koelsch et al. (2013) in Verbindung gebracht werden. Beim Gefühl unbeschwert gab es eine mittlere Korrelation zwischen psychoakustischer Tonhaltigkeit ($p = 0,048$), was zu den Ergebnissen von Koelsch et al. (2013) passt, bei denen erfreuliche Reize eine hohe Tonhaltigkeit aufwiesen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Larsson & Västfjäll (2013) zeigte eine niedrige psychoakustische Rauigkeit eine starke signifikante Korrelation mit dem Gefühl aufgeregt zu sein (hohe Erregung). Die wahrgenommenen Soundeigenschaften abstoßend oder unangenehm zeigten ebenfalls eine starke signifikante Korrelation mit Impulshaltigkeit, die den Wunsch erhöhen könnte, die aktuelle Situation zu verlassen oder zu ändern (z. B. geringer Sicherheitsabstand). Das Gefühl beim Hören der Sounds aufgeregt zu sein (hohes Erregungsniveau) korrelierte stark mit Lautheit, Schärfe und mittel mit Impulshaltigkeit und Rauigkeit, was auch die höhere Zustimmung bei dem Sound *danger_negative_1_overlay_dif_eqd* zu den negativen Deskriptoren in der Likertskala erklären könnte. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

Auf Basis dieser Erkenntnisse können für das zu entwickelnde ESD folgende Schlüsse gezogen werden: Das emotional eher beruhigende und angenehme aktive Sound Design als Basis für das ESD sollte ein niedriges Maß an Impulshaltigkeit, Schwankungsstärke, Schärfe und eine hohe Tonhaltigkeit aufweisen. Der negative/bedrohliche emotionalisierende Stimulus innerhalb des Sound Design sollte eine hohe Impulshaltigkeit, Schwankungsstärke, Schärfe und eine eher niedrige Tonhaltigkeit aufweisen. (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023)

5.4.1 Einschränkungen

Trotz signifikanter Korrelationen zwischen bestimmten psychoakustischen Parametern und den empfundenen oder wahrgenommenen emotionalen Eigenschaften sollte von einer Verallgemeinerung der Ergebnisse abgesehen werden. Die erzeugten Sounds waren komplexe Geräusche, die über normale Motoren- oder Maschinengeräusche hinausgehen – sowohl in Bezug auf den harmonischen Inhalt und den Frequenzbereich als auch die allgemeinen Soundeigenschaften, oft bestehend aus mehreren Soundcharakteristiken gleichzeitig. Aufgrund dieser Komplexität ist nicht anzunehmen, dass die verwendeten psychoakustischen Parameter für die umfängliche Erfassung der für eine Emotionalisierung relevanten Klangcharakteristika der verwendeten Sounds ausreichen. Dies könnte auch die Ergebnisse bzgl. der Rauigkeit erklären, die im Gegensatz zu den Ergebnissen von Västfjäll et al. (2013) in der vorliegenden Studie mit Aufregung korrelierte. Darüber hinaus unterschieden sich die Sounds grundlegend in Soundcharakter und Frequenzinhalten, sodass keine spezifischen Kausalitäten bestimmter Parameter in Bezug auf positiv oder negativ induzierte Emotionen angenommen werden können. Trotz dieser Einschränkungen liefern die Ergebnisse wichtige Erkenntnisse und Ansätze für die Weiterentwicklung und Optimierung im Rahmen der Entwicklung des ESD in dieser Arbeit.

5.5 Folgerungen und Beantwortung der Forschungsfrage

Im Rahmen dieser Studie sollte Forschungs-Unterfrage 1.1 beantwortet werden, die lautete:

Unterfrage 1.1: Welche Arten von Sounds eignen sich für eine Stimulation von Emotionen innerhalb eines emotionalisierenden Sound Design, und welche Soundeigenschaften führen zu einer Veränderung der emotionalen Gemütslage während des Hörens?

Aus den eingangs entwickelten Sounds wurden mehrere identifiziert, die als Basis für die weitere Entwicklung des ESD dienen können. Es wurden eher unbeschwerte und ruhige Sounds identifiziert, die als allgemeines angenehm klingendes aktives Sound Design eingesetzt werden könnten. Darüber hinaus wurden Sounds identifiziert, welche die Probanden als sehr unangenehm/bedrohlich bewerteten. Diese Sounds könnten als Stimuli eingesetzt werden, um die Fahrenden dazu zu motivieren, eine aktuelle Situation zu meiden, z. B. den Sicherheitsabstand zu vergrößern. Für diesen Zweck könnte insbesondere ein grundlegendes aktives Sound Design geeignet sein, das als unbeschwert/beruhigend (positive Valenz und niedriges Erregungsniveau) wahrgenommen wird und das situativ einen emotionalisierenden Stimulus mit hohem Bedrohungsniveau und hohem Erregungsniveau einsetzt. Die Korrelationen zwischen psychoakustischen Parametern und emotionalen Qualitäten der Sounds geben weitere Hinweise, wie die Sounds hinsichtlich einer emotionalisierenden Wirkung optimiert werden können.

Im nächsten Schritt müssen die Sounds in den im Zuge dieser Arbeit entwickelten Soundgenerator repliziert werden, um diese als ESD im weiteren Verlauf dynamisch und in Echtzeit in Fahrversuchen generieren zu können. Dies ermöglicht es, die Auswirkungen des ESD auf das Fahrverhalten zu untersuchen. Außerdem werden die effektivsten Sounds dieser Studie sowie Nachbildungen und optimierte Varianten mit dem entwickelten Soundgenerator in einem zweiten Online-Experiment verwendet, bei dem die Probanden einen gezeigten Sicherheitsabstand unter dem Einfluss von positiven und bedrohlichen Sounds bewerten und einschätzen müssen. Zunächst soll jedoch im nächsten Kapitel der entwickelte Soundgenerator vorgestellt und auf dessen Möglichkeiten zu Erstellung und Veränderung von Sounds eingegangen werden.

6 Soundgenerator zur Erzeugung emotionalisierender Sounds und eines emotionalisierenden Sound Design

In diesem Kapitel soll der im Rahmen der Forschungstätigkeit entwickelte Soundgenerator eingeführt werden. Dieser wurde einerseits entwickelt, um die Sounds für eine videobasierte Studie zur Bewertung und Einschätzung von in Videos dargestellten Sicherheitsabständen zu generieren (Kapitel 7). Des Weiteren wurde innerhalb dieses Soundgenerators das ESD umgesetzt, dessen Wirkung auf das Fahrverhalten untersucht wird (Kapitel 8). Zwar gibt es bereits bestehende Fahrzeugsoundgeneratoren, im professionellen Sektor bspw. das H3S HEAD 3D Sound Simulation System (HEAD Acoustics, 2018) oder im Gamingbereich den REV Soundgenerator (crankcaseaudio, 2018). Für die Erforschung des Effektes eines ESD wird jedoch ein sehr offenes System benötigt, bei dem jeder Parameter des Sounds gesteuert werden kann. Zudem muss ein solches System zu den Validierungskonfigurationen kompatibel sein, die für die Validierung der unterschiedlichen Reifegrade eines ESD, von ersten emotionalisierenden Sounds bis hin zur prototypischen Umsetzung, notwendig sind. Daher wurde beschlossen, den Soundgenerator selbst zu entwickeln.

Eine Übersicht über das User-Interface des Soundgenerators mit den relevantesten Haupt-Steuerungsbereichen ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Der Soundgenerator ist initial im Rahmen von zwei Abschlussarbeiten entstanden (Heizmann, 2019; Lefringhausen, 2019), die im Nachgang in eine finale ganzheitliche Lösung für die Sound-Synthese zusammengeführt und erweitert wurden. Der Soundgenerator wurde in Native Instruments Reaktor 6 realisiert, einer visuellen Audioprogrammiersprache, mit der man Soundgeneratoren, Instrumente oder Effekte erstellen kann, die über das OSC-Protokoll gesteuert werden können (Kapitel 2.6.5.2). Die grundlegende Struktur des Soundgenerators besteht aus den Komponenten, die den Sound generieren (Duale additive Oszillatoren und Geräuschgenerator für ein metallisches Zisch-Geräusch), anschließend weiterbearbeiten (Soundcharakter-Steuerung, Amplitudenmodulation) sowie den Komponenten, die das Soundverhalten steuern (Akkordsteuerung, Shepard-Risset-Glissando und Tonhöhensteuerung). Auf diese Komponenten und deren wichtigste Einstellmöglichkeiten soll im weiteren Verlauf näher eingegangen werden.

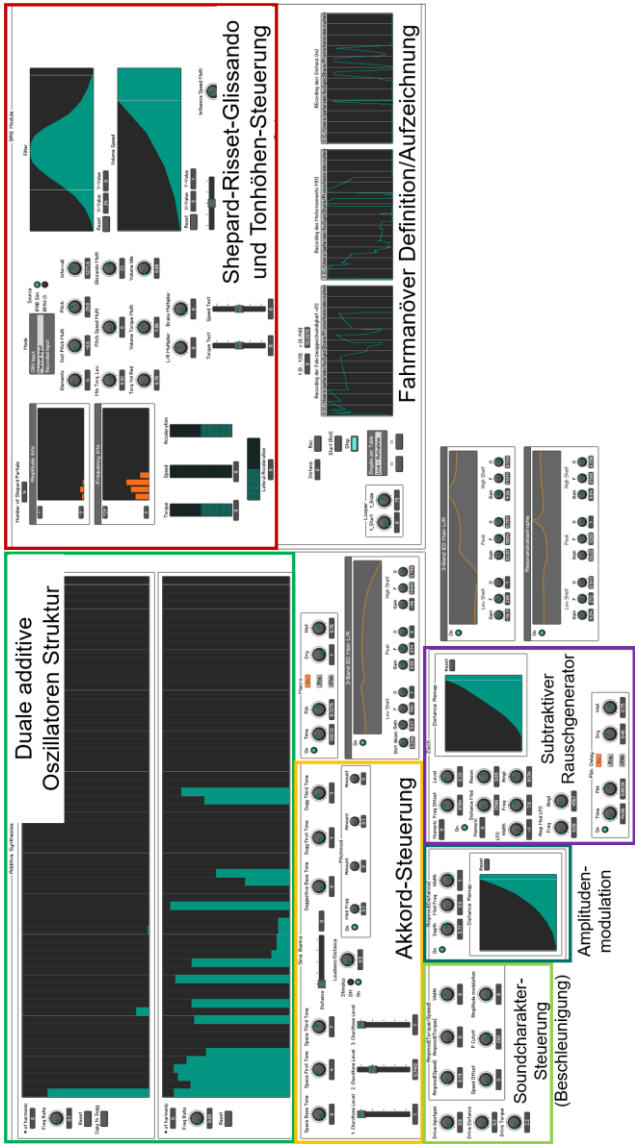


Abbildung 6.1: Übersicht User-Interface des Soundgenerators

6.1 Sound-Generierung

6.1.1 Struktur der dualen additiven Oszillatoren

Die Komponente zur Generierung der tonalen Aspekte der Sounds und des Sound Designs besteht aus in Kapitel 2.6.1 beschriebenen additiven Oszillatoren. Die Steuerung der Tonhöhen der additiven Oszillatoren baut grundsätzlich auf dem Prinzip von Akkorden auf, da diese ein wirkungsvolles Mittel zur Hervorrufung von Emotionen in der Musik darstellen (Kapitel 2.4.3). Für jeden der drei für einen musikalischen Akkord notwendigen Töne existiert ein dedizierter additiver Oszillator, analog zur üblichen Struktur von mehrstimmigen Synthesizer-Musikinstrumenten. Die Steuerungsoberfläche, dargestellt in Abbildung 6.2, besteht aus zwei getrennten Steueroberflächen für die einzelnen sinusförmigen Einzeltöne der additiven Oszillatoren, deren Summierung den grundsätzlichen Klangcharakter bestimmen. Die Einstellungen gelten dabei immer für alle drei Oszillatoren der Töne, die den Akkord aufbauen. Das obere Fenster stellt die Einstellungen für den Basis-Sound (generelles aktives Sound Design) dar. Das untere Fenster stellt die Einstellung des emotionalisierenden Stimulus (im Kontext dieser Arbeit einen bedrohlichen Sound) dar, der auf Basis eines zu kontextualisierenden Fahrzeug- / Verkehrsparameters wie dem Sicherheitsabstand zum Einsatz kommt. Innerhalb des dynamischen ESD kann der Klangcharakter kontinuierlich zwischen den getätigten Einstellungen im oberen und unteren Fenster interpoliert werden. Die Amplituden der einzelnen Teiltöne der Oszillatoren können durch die Anwendenden direkt in die Fenster eingezeichnet werden.

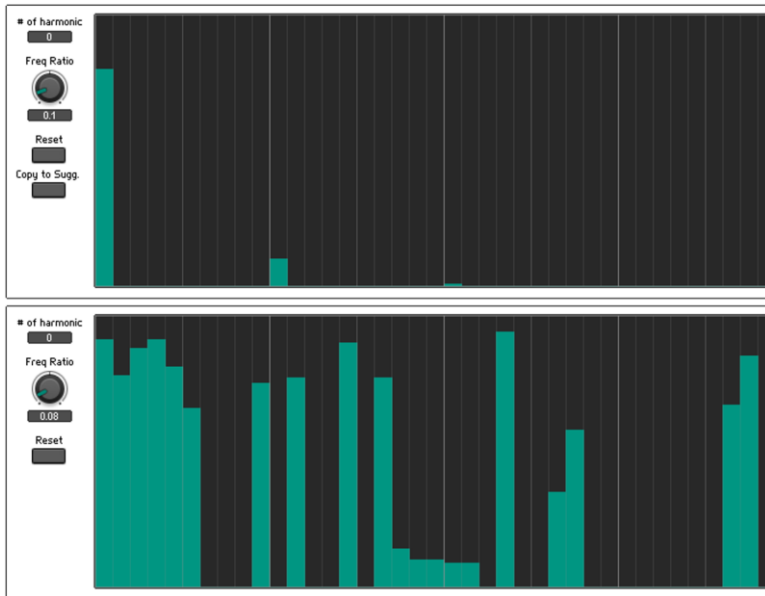


Abbildung 6.2: Steuerung der Einzeltöne der dualen additiven Oszillatoren Struktur

Der Knopf *Freq Ratio* legt den Frequenzabstand der sinusförmigen Einzeltöne des Additiven Oszillators auf der Abszisse des Fensters bezogen auf die Grundfrequenz fest. Hierdurch können bei ganzzahligen Frequenzabständen harmonische Sounds erzeugt werden, bei sehr geringen Frequenzabständen hingegen disharmonische Sounds. So entspricht bspw. die aktuelle Einstellung im oberen Fenster einem additiven Sound aus Grundfrequenz mit den ersten beiden ganzzahligen harmonischen Vielfachen des Grundtons, da das *Freq Ratio* auf 0,1 eingestellt ist, und im Fenster der 1., 10., und 20. Teilton eine Amplitude > 0 hat. Der Soundgenerator ist in der Lage, die Einstellungen für die Oszillatoren stufenlos zwischen den beiden getätigten Einstellungen zu überführen, um eine proportionale und flüssige Sound-Änderung auf Basis von externen Steuersignalen wie bspw. dem Sicherheitsabstand zu ermöglichen.

6.1.2 Subtraktiver Rauschgenerator

Um die metallischen Zisch-Geräusche, wie sie bspw. im *danger_negative_1_overlay_dif_eqd* Sound der vorherigen Studie vorliegen, nachzubilden, wurde ein subtraktiver Rauschgenerator (Kapitel 2.6.2) mit einem Delay-Effekt (Kapitel 2.6.3) für eine subtraktive Rauschgenerator-Komponente kombiniert. Die so erzeugten Zisch-Geräusche können dann parallel zu den Sounds aus den additiven Oszillatoren abgespielt werden. Die Oberfläche zur Steuerung ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Grundsätzlich kann man hier ein weißes Rauschen mit einstellbarer Amplitude (*Ampl*) mittels eines resonanzfähigen Tief-Pass-Filters formen. Zusätzlich kann das Rauschen mit einem niederfrequenten Oszillator (LFO) amplitudenmoduliert werden, um einen rhythmischen Effekt zu generieren.

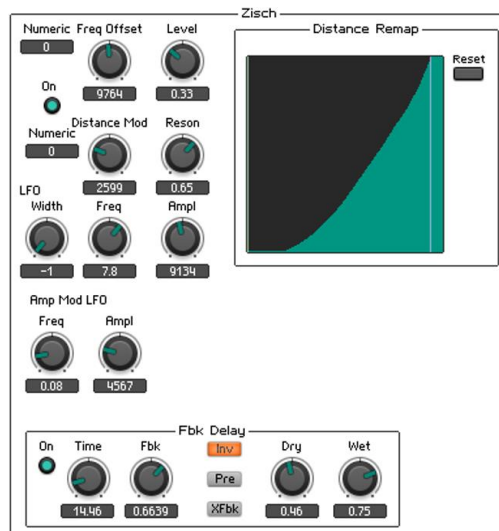


Abbildung 6.3: Subtraktiver Rauschgenerator zur Erzeugung von metallischen Zisch-Geräuschen

Zur Erzielung des metallischen Charakters ist ein finaler Nachbearbeitungsschritt nötig. Dazu wird der Delay-Effekt genutzt, der bei sehr kurzen Verzögerungszeiten einen metallischen Klang annähert (Kapitel 2.6.3). Über das kleine Fenster *Distance Remap* kann ein nicht linear-proportionaler Zusammenhang zwischen einem externen Steuersignal, bspw. dem Sicherheitsabstand, (Abszisse) und der

Lautstärkenänderung des metallischen Zisch-Geräusches (Ordinate) eingezeichnet werden.

6.2 Soundveränderung

6.2.1 Soundcharakter-Steuerung

Damit der Sound von zukünftigen Teilnehmenden akzeptiert wird, muss bei der Entwicklung großer Wert auf die Beziehung zwischen Geräuschedynamik und dem Betriebszustand des Fahrzeugs gelegt werden. In einem Fahrzeug ändert sich der Sound erheblich mit zunehmender Geschwindigkeit und Last. Dies muss durch das grundlegende aktive Sound Design repräsentiert werden, andernfalls kann das akustische Feedback potenziell schlechter von Menschen interpretiert und akzeptiert werden. Die Oberfläche zur Steuerung der Geräuschedynamik ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

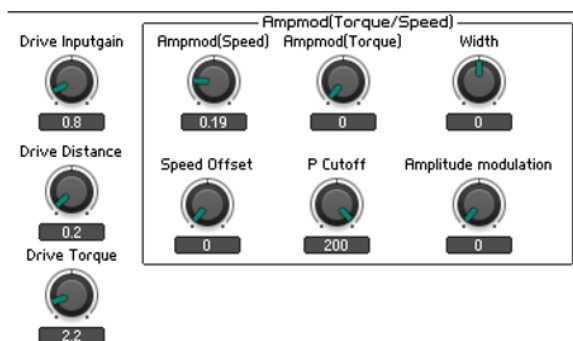


Abbildung 6.4: Soundcharakter-Steuerung für die Fahrzeug-Beschleunigung

Um das Lastfeedback zu verbessern, wird im vorliegenden Soundgenerator einerseits ein Verzerrungseffekt (*Drive Torque*) mit steigender Beschleunigung (Drehmoment) verstärkt. Zusätzlich wird eine leichte Amplitudenmodulation (*Ampmod Speed*) des Sounds mit zunehmender Geschwindigkeit hinzugefügt. Diese Kombination erzeugt einen leicht kernigeren/raueren Sound auf Basis eines externen Beschleunigungs- / Drehmomentsignals, was an die Rauigkeit eines Verbrennungsmotor angelehnt ist, und somit die assoziation mit einem generellen

Fahrzeuggeräusch erleichtert. Hierdurch soll ein gewohnter klingendes Beschleunigungsverhalten erzielt werden.

6.2.2 Amplitudenmodulation

Zusätzlich zur geschwindigkeitsabhängigen Amplitudenmodulation beinhaltet der Soundgenerator noch ein dediziertes Modul für die Amplitudenmodulation basierend auf einem externen Steuersignal zur Steuerung der Bedrohlichkeit (bspw. Sicherheitsabstand). Mit dieser kann die Impulshaltigkeit sowie die Schwankungsstärke für das gesamte Sound Design, bestehend aus dem Sound aus den additiven Oszillatoren sowie den metallischen Zisch-Geräuschen, frei eingestellt werden. Die Oberfläche hierfür ist dargestellt in Abbildung 6.5.

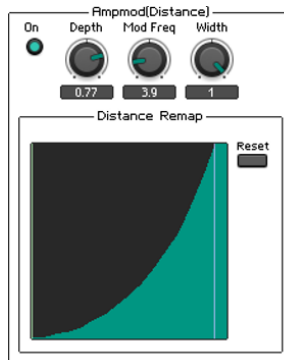


Abbildung 6.5: Steuerungsoberfläche der Amplitudenmodulation auf Basis eines externen Steuersignals.

Für die Amplitudenmodulation kann einerseits der Grad der Amplitudenmodulation eingestellt werden. Diese steuert wie stark die Amplitude des modulierten Signals moduliert wird. Zusätzlich können die Modulationsfrequenz sowie die Wellenform des modulierenden Signals eingestellt werden. Im Falle des Soundgenerators ist dies ein kontinuierlicher Übergang von einer sinusförmigen Modulationsquelle (nicht impulshaltig) bis zu einer rechteck-förmigen Modulationsquelle (sehr impulshaltig), je nach Wert des externen Steuerungssignals. Zusätzlich kann analog zum subtraktiven Rauschgenerator die Proportionalität zwischen dem externen Steuersignal (Abszisse) und dem Grad der Amplitudenmodulation und der Wellenform (Ordinate) der Modulationsquelle in dem Fenster unterhalb eingezeichnet werden.

6.3 Sound-Steuerung

6.3.1 Akkord-Steuerung

In diesem in Abbildung 6.6 dargestellten Bereich der Oberfläche des Soundgenerators können die Akkordtöne für die drei additiven Oszillatoren des ESD eingestellt werden. Die relativen Frequenzen der Akkordtöne für den im Falle dieser Arbeit positiven Grundton werden dabei über die drei Drehregler links eingestellt. *Base Tone* legt dabei den Grundton des Akkords fest, während *First Chord Tone* und *Second Chord Tone* die ersten und zweiten akkord-definierenden Töne festlegen. Die Zahl unter den Drehreglern geben dabei die Halbtonschritte an, ausgehend vom Grundton. 4 entspricht also hier der großen Terz und 7 der Quinte, was insgesamt einem sehr positiven Dur-Akkord entspricht. Auf der rechten Seite sind dieselben Einstellmöglichkeiten für den emotionalisierenden Sound-Stimulus möglich. Hier ist aktuell ein verminderter Akkord eingestellt (kleine Sekunde, und kleine Terz). Der Soundgenerator ermöglicht auch hier einen kontinuierlichen Übergang vom linken Akkord zum rechten Akkord auf Basis des externen Steuersignals. Die vertikalen Schieberegler dienen zur Einstellung der individuellen Pegel der drei Akkordtöne, um eine Feinabstimmung des Sounds zu ermöglichen.

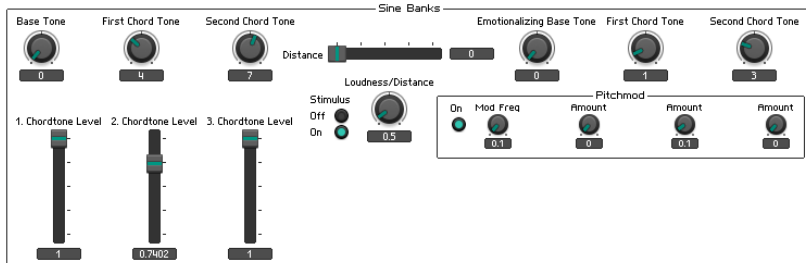


Abbildung 6.6: Oberfläche für die Einstellungen der Akkorde

6.3.2 Shepard-Risset-Glissando und Tonhöhen Steuerung

In diesem Bereich der Oberfläche (Abbildung 6.7) können die Einstellungen für das Shepard-Risset-Glissando vorgenommen werden (Kapitel 2.6.4.1). Es kann die Grundanzahl der Shepard-Partiellen eingestellt werden (Drehregler *Elements*) sowie der Frequenzabstand zwischen den Partiellen durch den Regler *Intervall*. Des Weiteren können über die Drehregler die grundlegende Tonhöhe des Sound Designs (*Pitch*) sowie die Frequenzabstände der Shepard-Partiellen untereinander

mittel *Interval* eingestellt werden. *Glissando Multi* ermöglicht die Einstellung der Proportionalität zwischen Tonhöhenänderung und externer Geschwindigkeitsänderung. Dieser Wert ist besonders wichtig für ein realistisch empfundenes Beschleunigungsverhalten. Über die restlichen Regler sind weitere Einstellungen wie Idle-Lautstärke (Fahrzeug steht) des Sounds oder Tonhöhenänderung auf Basis des externen Steuersignals möglich. Im ersten Fenster auf der rechten Seite kann der Verlauf des Shepard-Filters für die Partien über die Frequenz eingestellt werden, um eine kontinuierliche Aufwärts- oder Abwärts-Wahrnehmung der Tonhöhe zu gewährleisten. Die Filterform kann mit dem Mauszeiger eingezeichnet werden. Im Fenster darunter kann das Verhältnis zwischen Geschwindigkeit und Lautstärke des Sound Designs eingezeichnet werden. Zusätzlich bietet dieser Bereich eine Veranschaulichung der aktuellen Amplitude der Shepard-Partien sowie der Frequenzlage auf der linken Seite in Orange.

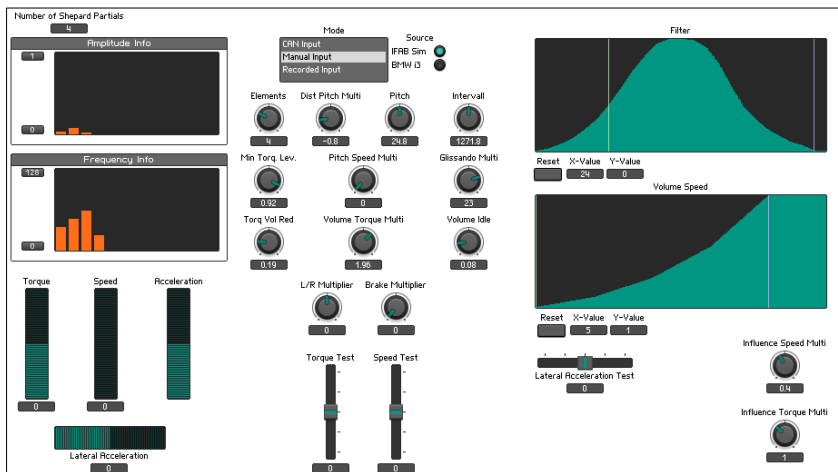


Abbildung 6.7: Einstellungsoberfläche für das Shepard-Risset-Glissando und die Tonhöhe

Mit dem Einstellungsfenster *Mode* kann eine grundsätzliche Einstellung bzgl. der Steuerung des Soundgenerators vorgenommen werden. Hier kann eingestellt werden, ob die Steuerung des Sound Designs über einen externen CAN Input aus einem Fahrzeug oder Fahr Simulator erfolgen soll, oder aber auf Basis der manuellen Steuermöglichkeiten auf der Soundgenerator-Oberfläche. Bspw. kann mit den

vertikalen Reglern *Torque Test* und *Speed Test* ein externes Steuersignal simuliert werden, um auch ohne Fahrzeug oder Fahrsimulator Sound-Einstellungen vornehmen und testen zu können. Aus denselben Gründen kann mit dem horizontalen Schieberegler im Akkord-Einstell-Bereich (Abbildung 6.6) im manuellen Modus händisch zwischen dem positiven oder negativen Sound hin- und hergewechselt werden. Hierbei werden alle Parameter kontinuierlich verändert (Amplitudenmodulation, metallisches Zischen), als ob sie durch das externe Steuersignal eines Fahrzeugs verändert werden würden. Zusätzlich ist die Einstellung des Modus *Recorded Input* möglich, auf den im nächsten Kapitel eingegangen werden soll.

6.3.3 Fahrmanöver Definition/Aufzeichnung

Im Bereich Fahrmanöver Definition/Aufzeichnung, dargestellt in Abbildung 6.8, können reale Fahrten mittels CAN-Bus oder Fahrten in einem Fahrsimulator aufgezeichnet werden und bei entsprechender Einstellung im Modus *Recorded Input* im Fahrsimulator wiedergegeben werden. Dies ermöglicht eine vom Fahrzeug losgelöste Feinjustierung des Sound Designs auf Basis von (realen) durchgeführten Fahrten. Hierbei können die gesamte Fahrt oder Teile der Fahrt (eingestellt über t_Start und t_Ende) verwendet werden. Zusätzlich ist über die Einstellung *Eingabe per Table* im Auswahlfenster auch eine ein händisches Einzeichnen von Verlaufskurven der Fahrzeugkennwerte *Fahrzeuggeschwindigkeit*, *Motormoment* und eines zusätzlichen Steuerungssignals (hier Sicherheitsabstand) möglich.

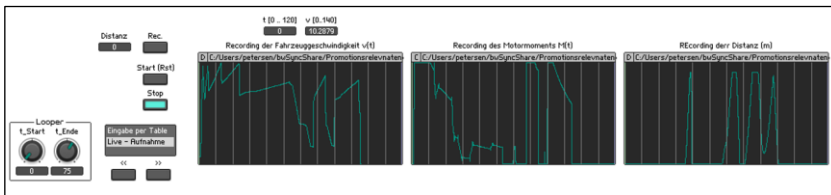


Abbildung 6.8: Oberfläche für die Definition oder Aufzeichnung und Wiedergabe von Fahrmanövern

In den folgenden Kapiteln wird die Wirkung der unter anderem mit diesem Soundgenerator erstellten Sounds sowie dem ESD auf die Einschätzung und Bewertung von gezeigten Sicherheitsabständen sowie das Fahrverhalten in einem Fahrsimulator untersucht.

7 **Auswirkung von emotionalisierenden Sounds auf die Einschätzung und Bewertung von Sicherheitsabständen**

Um den emotionalen Zustand von Fahrenden effektiv durch ein aktives Sound Design zu beeinflussen, wurden im Kontext der vorhergehenden Studie (Kapitel 5) wirksame Sounds als Stimuli erstellt und identifiziert (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023). Dafür wurden 16 Sounds mit professionellen Werkzeugen erstellt und anschließend in einer Studie hinsichtlich ihres emotionalen Charakters und ihrer emotionalisierenden Wirkung validiert. Die Bewertungen der Teilnehmenden wurden im Anschluss mit den psychoakustischen Merkmalen der Sounds korreliert, wobei sich zeigte, dass das Erleben eines Bedrohungsgefühls beim Hören der Sounds besonders mit der Schwankungsstärke und Impulshaltigkeit korrelierte. Umgekehrt zeigte das Gefühl von Beruhigkeit oder Unbeschwertheit eine starke positive Korrelation mit niedriger Schwankungsstärke, niedriger Impulshaltigkeit und einem hohen Maß an Tonalität. Diese Ergebnisse wurden für die Erstellung der Sounds für die folgende Studie genutzt, um emotionale Effekte potenziell zu verstärken. Das folgende Kapitel zielt darauf ab, zu untersuchen, ob verschiedene emotionalisierende Sounds einen Einfluss auf die für das Fahrverhalten relevante Faktoren in Bezug auf den Sicherheitsabstand haben könnten. Hiermit soll die *Unterfrage 1.2* beantwortet werden:

Unterfrage 1.2: Wie wirken sich beruhigende positive Sounds und bedrohliche negative Sounds auf die Wahrnehmung von Sicherheitsabständen aus?

Für die Untersuchung der Wirkung emotionalisierender Sounds auf die Wahrnehmung soll nicht der in Kapitel 2.2 beschriebene Zeitabstand (THW) betrachtet werden, sondern der Sicherheitsabstand, da dieser intuitiver eingeschätzt und bewertet werden kann. Diese Einschätzung und Bewertung wurden in Form der Schätzung des Sicherheitsabstands in Metern, dem Änderungswunsch des Sicherheitsabstands in Metern und der Bewertung des Sicherheitsabstands als angemessen, zu gering oder zu groß analysiert. Für die Untersuchung wurde eine videobasierte Online-Studie durchgeführt. Zur Beantwortung der Forschungsfrage und der Überprüfung, ob emotionalisierende Sounds einen Einfluss auf diese Faktoren haben, werden folgende Hypothesen aufgestellt:

Hypothese 1.1. Sounds, die (a) negative/(b) positive Emotionen hervorrufen/mit diesen Emotionen assoziiert werden, führen zu einer (a) Verringerung/(b) Erhöhung der Schätzung eines gezeigten Sicherheitsabstands in Videoaufnahmen von Fahrzeugfolgefahrten.

Hypothese 1.2. Sounds, die negative oder positive Emotionen hervorrufen/ mit diesen Emotionen assoziiert werden, haben einen Einfluss auf die gewünschte Erhöhung des gezeigten Sicherheitsabstands in Videoaufnahmen von Fahrzeugfolgefahrten.

Hypothese 1.3. Sounds, die (a) negative/(b) positive Emotionen hervorrufen/mit diesen Emotionen assoziiert werden, führen zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit, dass ein dargestellter Sicherheitsabstand als (a) zu gering/(b) angemessen bewertet wird.

Darüber hinaus wird untersucht, ob die zuvor identifizierten psychoakustischen Parameter zur Optimierung der Emotionalisierung der Teilnehmenden durch Sound geeignet sind. Zusätzlich soll untersucht werden, ob die mit dem selbst entwickelten Soundgenerator erzeugten Sounds in gleichem Maße emotionalisierend sind, wie die mit professionellen Werkzeugen erzeugten Sounds der vorherigen Studie.

Die in diesem Kapitel vorgestellte Studie wurde bereits in einer wissenschaftlichen Publikation beschrieben:

Petersen, M.; Yüksel, D.; Albers, A. Effect of Emotionalizing Sounds on the Estimation and Evaluation of Displayed Safety Distances. *Acoustics* **2024**, 6, 386–407, doi:10.3390/acoustics6020021. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Die Studie wurde in Teilen innerhalb einer internen, durch den Autor co-betreuten Bachelor-Arbeit aufgebaut und durchgeführt. Die Auswahl und Aufzeichnung der visuellen Stimuli wurden mit Unterstützung des Bacheloranten durchgeführt. Die Erstellung der Sounds sowie die gesamte Auswertung der Studie waren nicht Teil der Abschlussarbeit.

Yueksel, D. Untersuchung der Wirkung von suggestivem Sound Design auf Einschätzung des Fahrabstands. Unveröffentlichte Bachelorarbeit; Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2023. (Yueksel, 2023)

Für die Beantwortung von Unterfrage 1.2 liegt der Fokus auf der Untersuchung einer Wirkung beruhigender positiver Sounds und bedrohlicher negativer Sounds auf die Wahrnehmung von Sicherheitsabständen. Hierfür werden die effektivsten Sounds aus Studie 1 (Kapitel 5) sowie neu erzeugte Geräusche auf Basis der identifizierten Optimierungsparameter verwendet. Die Wirkung auf die Wahrnehmung soll dabei in Anlehnung am Vorgehen von Horswill et al. (2020) sowie Groeger und Chapman (1996, S. 364) auf Basis einer Online-Probandenstudie durchgeführt werden, in der Videos von realen Folgefahrten untersucht werden (Kapitel 2.7.2). Die Videos werden hierfür mit den bestehenden emotionalisierenden Sounds randomisiert gekoppelt. Die Wirkung der Sounds auf die Wahrnehmung des Sicherheitsabstands wird dann mittels der quantitativen Schätzung des gezeigten Sicherheitsabstands (*H1.1*) und des quantitativen Änderungswunsches (*H1.2*) diesbezüglich (Horswill et al., 2020) sowie einer Bewertung der Angemessenheit des gezeigten Sicherheitsabstands (*H1.3*) (Groeger & Chapman, 1996, S. 364) überprüft. Im Folgenden wird die Studie beschrieben. Initial werden die verwendeten auditiven Stimuli (Sounds) und visuellen Stimuli (aufgezeichnete Fahrten) vorgestellt. Im Anschluss erfolgt die Beschreibung der Methode. Daraufhin werden die Studienergebnisse dargelegt und im darauffolgenden Diskussionskapitels diskutiert.

7.1 Methoden und Materialien

7.1.1 Auditive Stimuli

Die akustischen Reize für die Studie setzen sich aus fünf verschiedenen emotionalisierenden Sounds zusammen. Die Sounds wurden ausgewählt und erstellt, um die Teilnehmenden beim Hören der Sounds positiv (unbeschwert) oder negativ (bedroht) zu emotionalisieren. Die fünf emotionalisierenden Sounds, die in dieser Studie verwendet wurden, setzen sich wie folgt zusammen. Zwei Sounds wurden aus der vorherigen Studie (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023) zur Untersuchung der emotionalisierenden Wirkung von 16 Sounds übernommen, die mit professionellen Sound Design-Werkzeugen erstellt wurden (Kapitel 5) . Die Auswahl umfasst den Sound mit der positivsten Wirkung (*positive_relax_serene_2*) und den Sound mit der negativsten/bedrohlichsten Wirkung (*danger_negative_1_diff_eqd*).

Zusätzlich wurden drei neue Sounds auf Basis der Erkenntnisse der vorherigen Studie mit dem eigens entwickelten Soundgenerator (Kapitel 6) erstellt. Der erste neu erstellte Sound ist der Versuch einer exakten Reproduktion des bedrohlichsten Sounds (*danger_negative_1_diff_eqd*) der früheren Studie. Er wurde einerseits nachgebildet, um zu überprüfen, ob der Soundgenerator in der Lage ist, ebenso wirkungsvolle emotionalisierende bedrohliche Sounds zu erzeugen wie mit den professionellen Werkzeugen, die für die Sounds in der ersten Studie verwendet wurden. Andererseits wurde dieser Sound gewählt, weil er die stärkste negative emotionalisierende Wirkung innerhalb der untersuchten Sounds hatte und dieser Sound somit auch für die Erstellung des dynamischen ESD zur Untersuchung auf das Fahrverhalten in Frage kommt.

Die zwei weiteren neu erzeugten Sounds wurden auf Grundlage der innerhalb der vorherigen Studie gefundenen Korrelationen zwischen psychoakustischen Parametern und einer positiven oder negativen / bedrohlichen Wahrnehmung der Sounds sowie den Erkenntnissen aus den Studien von Alt und Jochum und Koelsch et al. (2013) erstellt. Alle erstellten Sounds sind in Stereo. Um die zeitliche und logische Struktur des zugrunde liegenden Auswahl- und Erstellungsprozesses der Sounds zu berücksichtigen, behandelt der folgende Absatz zunächst die wiederverwendeten Sounds und im Anschluss die neu erstellten Sounds. Die Sounds sind in aufsteigender Reihenfolge von (intendierter) positiver zu negativer emotionaler Effektivität durchnummeriert. Eine Übersicht über die Parameter und Merkmale der fünf verschiedenen Sounds finden sich in Tabelle 7.1.

Tabelle 7.1: Überblick über die Eigenschaften der fünf verschiedenen auditiven Reize (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Klangname	Akkord/harmonische Struktur	Harmonie	Primäre Klangmerkmale	Ziel-Emotion
Sound 1	Dur-Akkord	Sehr harmonisch	Mehrere zueinander harmonische Sinusschwingungen im Bereich von 100–1000 Hz, sehr reiner Klang. Sehr geringe Bewegung in der Amplitude.	Sehr positiv, beruhigend
Sound 2	Harmonisches Noten-Cluster	Harmonisch	Orgelähnlicher Klang im Bereich von 100–2000 Hz, sehr tonal, sehr geringe Bewegung in der Amplitude.	Positiv
Sound 3	Disharmonisches Noten-Cluster	Disharmonisch	Hohlklingende, tonale Komponente (100–900 Hz), beunruhigender Klang, Metallisch zischender Klanganteil (2000–10.000 Hz) mit sinusförmiger Amplitudenmodulation mit 8–10 Hz für rhythmischen Charakter.	Negativ, beunruhigend, bedrohlich
Sound 4	Vermindert	Disharmonisch	Hohlklingende, tonale Komponente (100–1000 Hz), beunruhigender, leicht aggressiver Klang, Metallisch zischender Klanganteil (2000–10.000 Hz) mit sinusförmiger Amplitudenmodulation mit 8–10 Hz für rhythmischen Charakter.	Negativ, beunruhigend, bedrohlich
Sound 5	Dur7sus2	Sehr disharmonisch	Hohlklingende, tonale Komponente (100–1200 Hz), sehr verstimmt klingend. Metallisch zischender Klang (2000–10.000 Hz), starke Rechteckwellen-Amplitudenmodulation mit 2 Hz für hämmernde, aggressive Charakteristik.	Sehr negativ, störend, sehr bedrohlich

Im Folgenden werden die Sounds und ihre Herstellung näher beschrieben. Die beiden Sounds aus der vorherigen Studie wurden wiederverwendet, da ihr emotionalisierender Effekt bereits in der vorangegangenen Studie gezeigt wurde: Der positivste Sound, der als am ausgelassensten und beruhigendsten wahrgenommen wurde, wird im weiteren Verlauf *Sound 2* genannt. Der Sound, der in der vorherigen Studie als am bedrohlichsten wahrgenommen wurde, wird *Sound 3* genannt. *Sound 2* hat einen harmonischen, orgelähnlichen Sound, ist sehr tonal und weist eine leichte sinusförmige Amplitudenmodulation auf, um ihm etwas mehr Lebendigkeit zu verleihen. Der Sound nutzt den Frequenzbereich von 100 Hz bis 2000 Hz. Die Grundlage für den Sound war kein musikalischer Akkord, sondern eher ein harmonischer Noten-Cluster, bestehend aus mehreren Noten, die mit dem in Kapitel 5.1.1 beschriebenen neuronalen Netz erzeugt wurden, das auf Basis positiver Musik trainiert wurde. Um den Sound zu erstellen, wurden diese Noten dann als Eingabe für den Cinematic Synth von Acid Pro unter Verwendung des Presets "Jingling Waterpod" (Acid pro, Version 11, MAGIX Software GmbH, Berlin, Deutschland) verwendet. Der übernommene bedrohliche *Sound 3* besteht aus zwei primären Soundmerkmalen: einer hohl- und eher disharmonisch klingenden tonalen Komponente im Frequenzbereich von 100 Hz bis 900 Hz, die ein beunruhigendes/bedrohliches Gefühl hervorrufen soll. Die Grundlage für den Sound war ein disharmonischer Noten-Cluster, geniert mit dem neuronalen Netz, das auf Basis von negativer und bedrohlicher Musik trainiert wurde. Um den Sound zu erstellen, dienten diese Noten als Eingabe für den Cinematic Synth unter Verwendung des Presets "Black Shadow" (Acid pro, Version 11). Darüber hinaus enthält der Sound einen metallischen zischenden Klang im Frequenzbereich von 100 Hz bis 900 Hz, der mit einem sinusförmigen Modulator mit 8-10 Hz amplitudenmoduliert ist, um ihm einen rhythmischen Charakter zu verleihen, da diese Merkmale ebenfalls mit einer bedrohlichen Wahrnehmung von Sounds in Verbindung gebracht wurden (Koelsch et al., 2013). (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Für die Erstellung der neuen Sounds wird der eigens entwickelte Soundgenerator (Kapitel 6) verwendet, der mit dem Ziel entwickelt wurde, ESD zu ermöglichen, die in Echtzeit dynamisch gesteuert werden können, um sie in zukünftigen Studien in einem Fahrsimulator zu verwenden. Zur Erstellung der neuen Sounds verfügt der Soundgenerator über die Möglichkeit einer variablen Amplitudenmodulation, um damit die psychoakustische Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke erhöhen zu können. Des Weiteren beinhaltet er ein steuerbares weißes Rauschen mit nachgeschaltetem Hochpass-Filter in Verbindung mit einem Delay-Effekt mit einer sehr niedrigen Delay-Zeit (10,2 ms), um das metallische Zischen (Kapitel 2.6.3), das in *Sound 3* sehr prominent ist und nachgebildet werden musste, zu ermöglichen.

Der erste für die Studie neu erstellte *Sound 4* ist eine approximierte Nachbildung des bedrohlichen Sounds der vorherigen Studie (*Sound 3*). Er wurde reproduziert, um zu testen, ob der Soundgenerator in der Lage ist, ebenso emotional wirkungsvolle Sounds zu erstellen wie die professionellen Sound Design Werkzeuge, die zur Erstellung der Sounds in der ersten Studie genutzt wurden. Der neu erstellte *Sound 4* hat einen ähnlich hohlen Klangcharakter wie *Sound 3*, hat aber eine etwas prägnantere und aggressivere Klangcharakteristik. Er besteht aus drei kombinierten disharmonischen Tönen pro Akkordnote, um die tonalen Eigenschaften von *Sound 3* anzunähern. Seine zugrunde liegende Akkordstruktur ist ein disharmonischer verminderter Akkord, der mit negativen Emotionen assoziiert wird (Pallesen et al., 2005). Die hohle Klangcharakteristik wurde mit einem Chorus-Effekt (Kapitel 2.6.3) erreicht, der mehrere Instanzen eines Sounds mit zueinander kontinuierlich verschobenen Phasenlagen in unterschiedlichen Frequenzbereichen kombiniert. Der Klang enthält auch das amplitudenmodulierte rhythmische metallische Zischen, das auch in *Sound 3* prominent zu hören ist.

Die weiteren zwei neu erstellten Sounds wurden auf der Grundlage der Erkenntnisse aus den Korrelationen zwischen den psychoakustischen Parametern der Sounds und der emotionalen Wahrnehmung der Sounds durch die Teilnehmenden in der vorherigen Studie (Kapitel 5.2.4) erstellt. Dies war einmal ein positiver Sound (*Sound 1*) und ein bedrohlicher Sound (*Sound 5*). Der positive *Sound 1* ist ein sehr harmonischer Klang, der eine positive Emotion anstrebt. Er besteht aus drei kombinierten Sinustönen für jede Akkordnote (Grundton, 1 Oktave darüber und 2 Oktaven über dem Grundton). Er basiert auf einem Dur-Akkord, der einen positiven, sehr harmonischen Sound hat (Pallesen et al., 2005). Er zielt außerdem auf eine hohe psychoakustische Tonhaltigkeit ab, die mit positiven Emotionen korrelierte, sowie auf eine niedrige Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke, die mit negativen Emotionen korrelierten. Der neu erstellte negative/bedrohliche Sound (*Sound 5*) verwendete den nachgebildeten bedrohlichen *Sound 4* als Grundlage, um einen potenziell noch wirkungsvolleren und effektiveren Sound zu erstellen. Für die Erstellung wurde *Sound 4* mit einer starken Rechteckwellen-basierten Amplitudenmodulation über das gesamte Frequenzspektrum mit etwa 2 Hz versehen, um die psychoakustische Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke von Sound 5 zu erhöhen, die zuvor stark mit Sounds korrelierten, die als bedrohlich wahrgenommen wurden. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Nachbearbeitung der Sounds für die Studie

Um den Grad an Realismus und die Immersion während des Versuchs und die Glaubwürdigkeit der auditiven Reize zu erhöhen, wurden die erstellten Sounds mit einer binauralen Geräuschkulisse, bestehend aus Roll- und Windgeräuschen während des Fahrens, kombiniert. Diese wurde im Fahrzeuginnenraum eines Elektrofahrzeugs (BMW i3) ohne aktives Sound Design aufgenommen. Während der Aufnahme wurden alle Systeme, die zusätzliche Geräusche in den Fahrzeuginnenraum einspeisen könnten (bspw. Heizung und Radio) ausgeschaltet. Die binauralen Aufnahmen wurden während der Aufzeichnung des Videomaterials bei konstanten Geschwindigkeiten durchgeführt. Für die Aufnahmen wurde der bereits in Studie 1 verwendete Kunst-Kopf (Manakin Mk1 Cortex, dBsonic, Eseneler, Istanbul) auf dem Beifahrersitz platziert. Um einen Einfluss der binauralen Aufnahmen bei verschiedenen Geschwindigkeiten auszuschließen, wurde dieselbe binaurale Messung bei 60 km/h für alle Sounds in der Studie verwendet. Die Kombination der erstellten Sounds und der binauralen Messung wurde in Ableton Live, einer digitalen Audio-Workstation, durchgeführt (Kapitel 2.6.5.1). Die Lautstärke der binauralen Geräuschkulisse war für alle Sounds gleich und wurde auf ein Lautstärke-Niveau eingestellt, das mindestens 10 dB unter dem leisesten der 5 Sounds lag, sodass die binauralen Fahrgeräusche wahrnehmbar waren, aber keinen der auditiven Stimuli überdeckten. Die kombinierten Sounds (künstliche Sounds + Fahrgeräusche) wurden in Ableton Live angepasst, um einen ähnlichen LUFS-Wert (Loudness Units Full Scale (European Broadcasting Union, 2023)) zu haben. Mit den resultierenden fünf Sounds wurde eine iterative Anpassung der Lautstärkepegel der einzelnen Sounds durchgeführt, um die Unterschiede in der wahrgenommenen Lautstärke zwischen den kombinierten Sounds weiter zu reduzieren. Die Anpassungen wurden basierend auf dem individuellen Feedback einer subjektiven Bewertung der Lautstärkeunterschiede der Sounds durch ein Konsortium von fünf wissenschaftlichen Mitarbeitern der Abteilung NVH & Fahrzeugakustik des Instituts durchgeführt. Die zunächst wahrgenommene Lautstärke der positiven Sounds (*Sounds 1* und *2*) war geringer als die der bedrohlichen Sounds (*Sounds 3*, *4* und *5*). Basierend auf dem iterativen Feedback wurde der Pegel von *Sound 1* um 5 dB erhöht und *Sound 2* um 4 dB erhöht. Nach dieser Anpassung gaben die Mitarbeiter individuell an, dass alle Sounds von Ihnen als gleich laut wahrgenommen wurden. Der Pegel der binauralen Geräuschkulisse wurde nicht angepasst und blieb für alle Sounds identisch. Alle Sounds hatten einen Ein- und Ausblendeverlauf von 0,1 s, um zum Ein- und Ausblenden der Videos zu passen. Zusätzlich wurde das Einblenden hinzugefügt, um die Wahrnehmung von plötzlichen impulsartig auftretenden lauten Geräuschen bei den Teilnehmenden beim Abspielen der Sounds zu reduzieren und den stationären Charakter der dargestellten Situation zu unterstreichen. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

7.1.2 Visuelle Stimuli

Für die visuellen Reize wurden fünf verschiedene reale Fahrzeugfolgeszenarien mit einer GoPro 5-Kamera (GoPro, Version 5, San Mateo, CA, USA) aus einer Position nahe der üblichen Kopfposition von Fahrenden mit konstanter Geschwindigkeit und konstantem Sicherheitsabstand während der Aufnahme aufgenommen, wie von Horswill et al. (2020) empfohlen (Kapitel 2.7.2). Die Fahrten wurden auf Landstraßen rund um Karlsruhe und auf dem Campus Nord des KIT aufgezeichnet. Die den Teilnehmenden präsentierten Szenarien entsprachen wahrscheinlichen Szenarien, die in realen Fahrzeugfolgesituationen auftreten, um die Validität des Experiments zu erhöhen (Breuer et al., 2015, S. 186). Die aufgezeichneten Fahrten unterschieden sich in Ort, Fahrgeschwindigkeit und Sicherheitsabstand, um eine hohe Ähnlichkeit zwischen Videos und signifikanten Lerneffekten bei den Teilnehmenden zu vermeiden (Babić et al., 2021). Die Videos für diese Studie wurden in einer Auflösung von 1920x1080 Pixeln und 60 Bilder/Sekunde unter guten Wetterbedingungen aufgenommen, basierend auf dem Ansatz von Horswill et al. (2020) zu videobasierten Maßnahmen des Abstandsverhaltens und der Akzeptanz von Sicherheitsabständen von Fahrenden. Die verschiedenen Orte, Fahrzeuggeschwindigkeiten und tatsächlichen Sicherheitsabstände, die in den Videos dargestellt sind, sind in Tabelle 7.2 ersichtlich. Das gefahrene Fahrzeug war ein elektrisches Kleinwagenfahrzeug (BMW i3), und das vorausfahrende Auto war eine graue obere Mittelklasse-Brennstoffzellenlimousine (Toyota Mirai Erste Generation). (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Tabelle 7.2: Randbedingungen der fünf verschiedenen dargestellten Videos von realen Fahrzeugfolgeszenarien (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Video Name	Sicherheitsabstand (m)	Geschwindigkeit (km/h)	Ort
Video 1	15	60	Straße, Stadt (Bewaldet)
Video 2	12	50	KIT interne Straße
Video 3	12	80	Landstraße (Allee)
Video 4	15	80	Landstraße (Allee)
Video 5	15	80	Landstraße

Die dargestellten Sicherheitsabstände wurden von einem Konsortium aus fünf wissenschaftlichen Mitarbeitern des Instituts auf Basis des Ziels ausgewählt, der subjektiven Schwelle zwischen eines zu nahen und ausreichenden Sicherheitsabstands in Bezug auf die dargestellte Geschwindigkeit sowie der Größe des Videowiedergabefensters innerhalb der Online-Versuchs-Software (Unipark, Version 21.1, Tivian XI GmbH, Köln, Deutschland) nahe zu kommen. Die Instrumente, die die Geschwindigkeit des im Video verwendeten Fahrzeugs darstellen, wurden geschwärzt, um die Notwendigkeit zu erhöhen, eine intuitive Schätzung des gezeigten Sicherheitsabstands vorzunehmen, und den Einfluss der Bewertung hinsichtlich der Angemessenheit des gezeigten Sicherheitsabstands zu minimieren. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Um zu vermeiden, dass die Videos in einer festgelegten Reihenfolge gezeigt und somit verzerrte Ergebnisse riskiert werden (Groeger & Chapman, 1996), wurden die Videos den Teilnehmenden in zufälliger Reihenfolge präsentiert. Jedes Video wurde von den Studienteilnehmenden nur einmal bewertet. Um zusätzlich die Notwendigkeit der Neueinschätzung des gezeigten Sicherheitsabstands zu erhöhen, alternierten die Videos zufällig zwischen den möglichen Videos mit 12 und 15 Metern Sicherheitsabstand. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

7.1.3 Teilnehmende

Insgesamt nahmen 169 Personen ohne Vorwissen oder besondere Kenntnisse über den Inhalt oder das Ziel der Untersuchung an der Online-Studie teil. Die Stichprobe war eher jung (Mittelwert $M = 33,3$; Standardabweichung $SD = 12,1$; Median $Md = 28,5$; Spannweite $R = (17, 80)$), wobei sich überwiegend als männlich identifizierende Personen vertreten waren (weiblich: 59, männlich: 107, divers: 1). Insgesamt besaßen 159 Teilnehmende einen Führerschein (7 hatten keinen Führerschein), im Mittel seit ungefähr 11 Jahren ($M = 10,9$; $SD = 23,8$; Median = 10,0; $R = (1, 74)$). 9 Teilnehmende gaben an, in den letzten 2 Jahren einen Unfall gehabt zu haben (9 machten keine Angabe). Die meisten Teilnehmende gaben an, bis zu 6000 km pro Jahr zu fahren (bis zu 6000 km: 68 Teilnehmende; 6001 km–9000 km: 33 Teilnehmende; 9001 km–12.000 km: 25 Teilnehmende; 12.001 km–15.000 km: 16 Teilnehmende; mehr als 15.000 km: 17 Teilnehmende). Etwa gleich viele Teilnehmende gaben an, dass sie typischerweise in städtischen Gebieten (104 Teilnehmende), in ländlichen Gegenden (84 Teilnehmende) und auf Autobahnen (85 Teilnehmende) fahren. Es sei angemerkt, dass die Teilnehmenden hier die Möglichkeit hatten, mehrere Optionen auszuwählen. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

7.1.4 Methode

7.1.4.1 Online Experiment

Das Experiment wurde als videobasierte Online-Studie in deutscher Sprache konzipiert, welche die Teilnehmenden zuhause an ihren eigenen Computern und Audiogeräten durchführen. Zu Beginn der Studie wurden die Versuchspersonen darüber informiert, dass sie einen PC/Laptop/Tablet verwenden sollen, um die Bildschirmgröße zwischen den Teilnehmenden einigermaßen vergleichbar zu halten. Sie wurden außerdem angewiesen, während des gesamten Experiments gute Kopfhörer zu verwenden und keine externen Lautsprecher wie Laptop-Lautsprecher oder Tablet-Lautsprecher zu verwenden. Die Teilnehmenden folgten diesen Anweisungen überwiegend. Teilnehmende, die Lautsprecher verwendeten, wurden von der Studie ausgeschlossen, da hierdurch der Eindruck des Sitzens in einem Fahrzeug während der Studiendurchführung, der durch die binaurale Aufnahme unterstützt werden soll, weniger gegeben sein könnte. Die Wahl der Kopfhörer war vielfältig, von hochwertigen neutralen Studio-Kopfhörern bis hin zu kleinen In-Ear-Kopfhörern. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Die Versuchspersonen wurden gebeten, die Sicherheitsabstände intuitiv einzuschätzen und zu bewerten und keine Methoden zur quantitativen Schätzung der Sicherheitsabstände verwenden sollen. Damit sollte die Wahrscheinlichkeit verringert werden, dass Personen Schätzmethoden für den Sicherheitsabstand verwenden. Häufige Methoden sind das Zählen der Sekunden zwischen Fahrzeugen, um den Zeitabstand abzuleiten, oder die Verwendung der Leitpfosten, die in Deutschland allgegenwärtig sind und auf geraden Strecken im Abstand von 50 m platziert sind. Den Teilnehmenden wurden diese Beispiele möglicher Methoden nicht genannt. Den Teilnehmenden wurde des Weiteren mitgeteilt, dass diese Studie nur die subjektive Schätzung/Bewertung von Sicherheitsabständen betrifft. Entsprechend wussten sie vor der Studie nicht, dass auch emotionale Aspekte oder die abgespielten Geräusche in die Studie einbezogen wurden. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Die Studie besteht aus zwei Hauptteilen. Der erste Teil befasste sich mit der Schätzung und Bewertung der Sicherheitsabstände in den gezeigten Video-Sound-Kombinationen. Insgesamt wurden fünf Video-Sound-Kombinationen aus einem Pool von insgesamt 25 Videos (jede eine einzigartige Kombination von einem der fünf Video-Stimuli und fünf verschiedenen akustischen Stimuli (Sounds)) zufällig einem jeden Teilnehmenden zugewiesen. Eine Länge von 7 Sekunden pro Video wurde aus den folgenden Gründen als geeignet erachtet: Sie sollte kurz genug sein, damit die Testpersonen idealerweise keine Zeit haben, auf Methoden zur Schätzung des Sicherheitsabstands zurückzugreifen, und daher intuitive Entscheidungen

treffen. Andererseits sind die Videos lang genug, damit die Testpersonen genügend Zeit haben, die Verkehrssituation zu bewerten (Z. Lu, Happee & Winter, 2020), und damit der akustische Reiz wirken kann (Yang et al., 2018). Wenn die Videos oder Stimuli viel länger wären, könnte dies zu einem Übernahme-Effekt führen, bei dem die Teilnehmenden den Effekt eines Stimulus auf den nächsten übertragen würden (Anund, Lahti, Fors & Genell, 2015). Außerdem würden längere Videosegmente die Gesamtbearbeitungsdauer der Studie erhöhen, und damit die Teilnehmendenquote potenziell reduzieren. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Die Auswahl der fünf Ton- und Video-Kombinationen sowie die Reihenfolge, in der diese Kombinationen angezeigt wurden, wurden für jeden Teilnehmende zufällig festgelegt. Zusätzlich wurde jeder Video- und Tonstimulus, aus dem sich die Video-Sound-Kombinationen zusammensetzen, jedem Teilnehmenden nur einmal innerhalb der Studie präsentiert. Um eine erneute Bewertung für jedes gezeigte Video weiter zu fördern und Übernahme-Effekte zu reduzieren, wechselten die Videos zufällig zwischen den 12- und 15-Meter-Videos in Bezug auf die dargestellten Sicherheitsabstände. Die Teilnehmenden wurden angewiesen, die Videos nicht zu maximieren, um den Einfluss unterschiedlicher Bildschirmgrößen zu verringern. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Nach dem Ansehen eines Videos machten die Teilnehmenden ihre Aussagen zur Schätzung und Bewertung der Sicherheitsabstände. Dies erfolgte durch direkte Eingabe von Zahlen für den geschätzten Sicherheitsabstand in Metern und Auswahl einer Antwort über Optionsfelder zur Angemessenheit des dargestellten Sicherheitsabstands. Wenn der Sicherheitsabstand als zu klein oder zu groß bewertet wurde, hatten die Teilnehmenden die Möglichkeit anzugeben, um wie viel sie den Sicherheitsabstand ändern möchten. Zur Vereinfachung des Eingabeprozesses wurden Zahlen und Optionsfelder verwendet, wie von Funke, Reips und Thomas (2011) vorgeschlagen. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Der zweite Teil der Studie befasste sich mit der Bewertung der Sounds hinsichtlich des Gefühls der Teilnehmenden beim Hören der Sounds sowie der Emotionen, die die Teilnehmende mit den Sounds verbanden. Hierfür wurde erneut der Fragebogen, der für die vorherige Studie zur Bewertung der 16 Sounds verwendet wurde (basierend auf Hempel (2001)), wiederverwendet (Kapitel 5.1.2). Die Deskriptoren für die empfundenen Emotionen waren ernst, traurig, ängstlich, unbeschwert, bedroht, beruhigt und aufgeregt. Die Beschreibungs-Paare für die Likert-Skala waren bedrohlich–harmlos, unangenehm–angenehm, abstoßend–anziehend, aufdringlich–unaufdringlich, anstrengend–erholsam, beruhigend–aufregend, langweilig–anregend. Die Deskriptoren wurden wiederverwendet, da sie sich bereits in der vorherigen Studie als sinnvoll erwiesen haben. Zusätzlich war es

erforderlich, dieselben Beschreibungen zu verwenden, um zu bewerten, ob die neu erstellten Sounds ebenso effektiv wie die Sounds der vorherigen Studie sind. Außerdem ermöglicht die Übernahme einen Vergleich, ob die Sounds der vorherigen Studie anders bewertet werden, wenn sie im Kontext der neu erstellten Sounds bewertet werden. Zu Beginn beider Teilstudien gab es ein einführendes Beispiel, das den Fragebogen erklärte und zu einer Ausfüllung des Fragebogens zu Probezwecken aufforderte. Die Einführung für den ersten Teil wurde zusätzlich dazu verwendet, um die Hörbedingungen der Teilnehmenden richtig einzustellen, damit sie die Sounds laut und deutlich hören können. Die Teilnehmenden wurden angewiesen, nach diesem ersten Kalibrierungsschritt ihre Klangeinstellungen nicht mehr zu ändern. Der in der Studie verwendete Fragebogen kann in Anhang B eingesehen werden. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

7.1.4.2 Psychoakustische Analyse

Für die Analyse der akustischen Eigenschaften der Sounds wurde erneut die Artemis SUITE verwendet (Artemis SUITE, Version 14.2, HEAD Acoustics GmbH, Herzogenrath, Deutschland (HEAD Acoustics, 2024)). Die folgenden psychoakustischen Analysen (Kapitel 2.5) wurden verwendet: Lautheit über Zeit (ISO 532-1, 2017), Fluktuationsstärke vs. Zeit (HEAD Artemis 14.2), Tonalität (Hörmodell) vs. Zeit (ECMA-418-2, 2022) und Impulshaltigkeit (Hörmodell) vs. Zeit (HEAD Artemis 14.2) (Kapitel 2.5). Für die Berechnung der psychoakustischen Größen wurde über beide Stereokanäle der Kunstkopfmessung gemittelt. Es wurde sich auf diese psychoakustischen Analysen beschränkt, weil sie in der vorherigen Studie eine gute Korrelation mit positiven (unbeschwert, beruhigend) oder negativen (bedroht, ängstlich) Emotionen aufwiesen (Kapitel 5.2.4). Diese psychoakustischen Parameter wurden auch verwendet, um die neu erstellten Sounds in Bezug auf ihre emotionale Wirksamkeit zu optimieren. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

7.1.4.3 Statistische Auswertung

Für die statistische Analyse wurde ein einseitiger *t*-Test für wiederholte Messungen verwendet (Kapitel 2.7.3.2), um signifikante gerichtete Unterschiede zwischen den intervallskalierten geschätzten Sicherheitsabständen in Metern (geringer für negative Sounds) sowie der quantifizierten gewünschten Änderung des Sicherheitsabstands in Metern zwischen den verschiedenen Sounds (größer für negative Sounds) innerhalb der Aussagen der Versuchspersonen zu finden. Cohen's *d* wurde für die Berechnung der statistischen Effektstärke des Effekts der Sounds auf die Schätzung und die gewünschte Änderung verwendet (Cohen, 1992). (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Für die Analyse der Auswirkungen der Sounds auf die Bewertung des Sicherheitsabstands in Bezug auf die Angemessenheit wurde eine binomiale logistische Regression für wiederholte Messungen verwendet (Kapitel 2.7.3.5). Hierfür wurden unterschiedliche Modelle erstellt, die eine Verbindung zwischen der binären abhängigen Variablen (angemessen/zu gering) und der kategorialen unabhängigen Variablen (Sounds) herstellen. In diesem Kontext umfasst das Modell eine lineare Kombination unabhängiger Variablen, die zu Quotenverhältnissen (Odds-Ratios) führt, die die Wahrscheinlichkeit für einen Einfluss einer bestimmten Eigenschaft in Bezug auf die binäre Variable (wie die Bewertung der Angemessenheit des Sicherheitsabstands) schätzen. Diese Schätzung basiert auf den Werten der unabhängigen Variable Sounds, dem dargestellten Sicherheitsabstand und der dargestellten Geschwindigkeit. Nach Erstellung der Modelle muss das Modell ausgewählt werden, das abhängige Variable im Kontext der Daten am besten erklärt. Als Modellauswahlkriterien werden das Akaike - Informationskriterium (AIC), das Schwarz-Bayes-Informationskriterium (BIC), die Abweichung (Devianz), pseudobedingte und marginale R^2 -Werte verwendet, um das beste vorhersagende Modell auszuwählen (Kapitel 2.7.3.5). Das AIC schätzt dabei den relativen Abstand zwischen den wahren und den angepassten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Daten und des Modells plus einer Konstante. Nach dem AIC ist das Modell auszuwählen, das den kleinsten AIC hat. Das BIC gibt eine Funktion der a-posteriori-Wahrscheinlichkeit eines wahren Modells unter einem bestimmten bayesschen Setup wieder. Nach den BIC-Kriterien ist das Modell zu wählen, dass den kleinsten BIC Wert hat. Das marginale R^2 (fixe Effekte) stellt den Anteil der durch die fixen Effekte erklärten Varianz im Verhältnis zur Gesamtvarianz dar. Das bedingte R^2 (Gesamt) stellt den Anteil der durch fixe und zufällige Effekte erklärten Varianz im Verhältnis zur Gesamtvarianz dar. Beispiele für die fixen Effekt wären in dieser Studie bspw. die Sounds, oder der dargestellte Sicherheitsabstand. Für die zufälligen Effekt die Unterschiede zwischen den Teilnehmenden wie Präferenz von Sicherheitsabständen während des realen Fahrens, oder die Fähigkeit zur quantitativen Schätzung von Sicherheitsabständen in Videos. Eine weitere Bewertung des Modells wurde mit dem "DHARMa" -Paket (Version 0.4.6) für R durchgeführt (Kapitel 2.7.3.5). Es verwendet eine simulationsbasierte Strategie zur Erzeugung skalierten (Quantil-)Residuen (Abweichung eines vorhergesagten Wertes vom tatsächlich beobachteten Wert), die für angepasste (verallgemeinerte) lineare gemischte Modelle leicht interpretierbar sind (Hartig, 2022). (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

7.2 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Studie dargestellt. Die Darstellung erfolgt nicht entsprechend der Reihenfolge, wie Fragen und Items in der Studie angeordnet waren, sondern entlang der zugrundeliegenden Ursache-Wirkungs-Kette. Es erfolgt entsprechend zuerst die Darstellung der emotionalen Wirkung der Sounds, also welche Emotionen sie bei den Teilnehmenden hervorriefen, und wie die Sounds von den Teilnehmenden wahrgenommen wurden. Im Anschluss erfolgt die Darstellung der Wirkung der Sounds auf die Wahrnehmung/Bewertung der gezeigten Sicherheitsabstände. Zuvor soll jedoch auf die objektiven Klangeigenschaften der Sounds eingegangen werden. In Abbildung 7.1 sind die Spektrogramme sowie die Schalldruckpegel der fünf verschiedenen Sounds dargestellt, die innerhalb des Versuchs verwendet wurden.

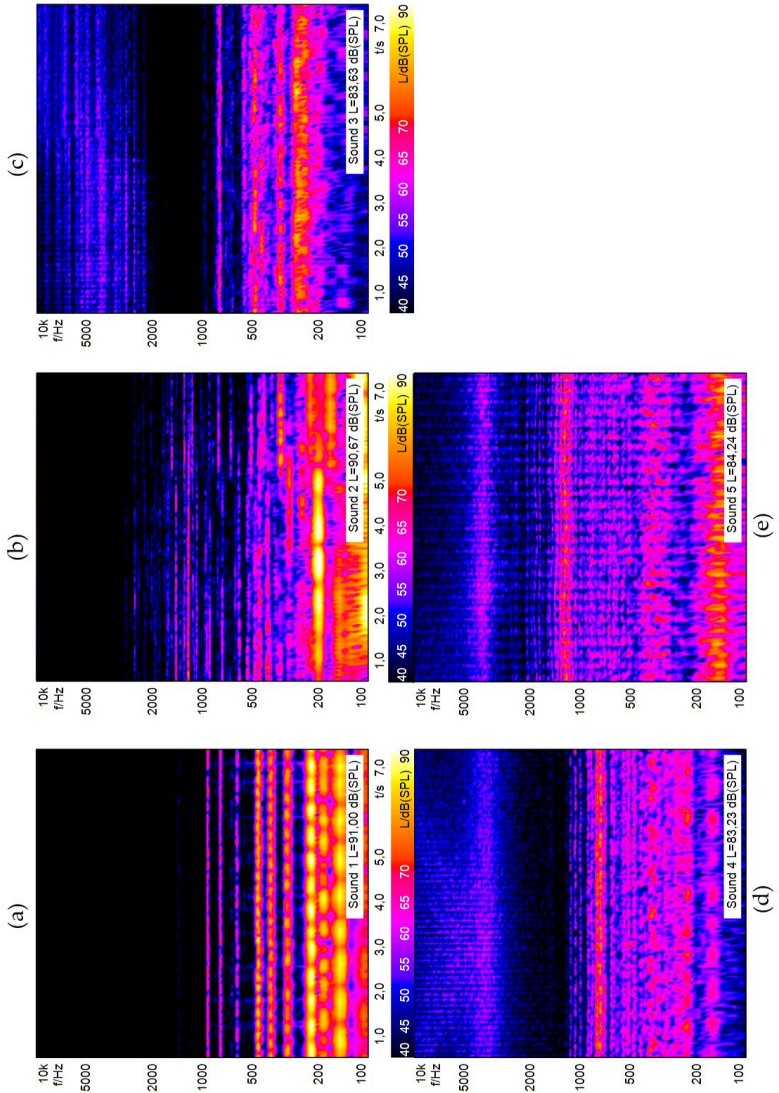


Abbildung 7.1: Spektrogramme und Schalldruckpegel der verwendeten akustischen Reize: (a) Sound 1 (Positiv); (b) Sound 2 (Positiv/Neutral); (c) Sound 3 (Negativ); (d) Sound 4 (Negativ); (e) Sound 5 (Sehr negativ) (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Die Sounds, die auf eine positive Emotionalisierung abzielten (*Sound 1* (a), *Sound 2* (b)), enthalten im Vergleich zu den auf Bedrohung abzielenden Sounds (*Sound 3* (c), *Sound 4* (d) und *Sound 5* (e)) keinen Inhalt im Frequenzbereich zwischen 2.000 Hz und 10.000 Hz. Darüber hinaus ist in den Spektrogrammen die starke Amplitudenmodulation in den bedrohlichen Sounds aufgrund der gezielten Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke erkennbar. Bei den *Sounds 3* und *4* betrifft dies nur den Bereich oberhalb von 2.000 Hz, bei *Sound 5* hingegen den gesamten Frequenzbereich. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Um zu bewerten, ob die akustischen Reize die psychoakustischen Eigenschaften enthalten, die sich als korrelierend mit einer Veränderung der Emotion oder einer Wahrnehmung der Sounds als bedrohlich oder positiv herausgestellt haben, werden die psychoakustischen Merkmale Lautheit, Schwankungsstärke, Impulshaltigkeit und Tonalität analysiert. Die Ergebnisse werden über beide Stereokanäle gemittelt. Die Analyse über die Zeit der Lautheit, der Schwankungsstärke, der Impulshaltigkeit und der Tonalität sowie die entsprechenden gemittelten Einzelwerte sind in Abbildung 7.2 dargestellt. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

In Abbildung 7.2a ist zu erkennen, dass trotz der iterativen Anpassung der Lautstärkepegel *Sound 1* im Durchschnitt immer noch etwa 7 Sone leiser ist als *Sound 2*, 3 und 4. Darüber hinaus ist *Sound 5* im Durchschnitt 4 Sone lauter als *Sound 2*, 3 und 4. Dies wurde akzeptiert, da in der vorherigen Studie die Erregung mit der Lautstärke korrelierte, und somit der Vermeidungseffekt gemäß Russell und Mehrabian (1978) bzgl. des akustischen Reizes erhöht werden müsste, was dem gewünschten Effekt für die Sounds entspricht. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

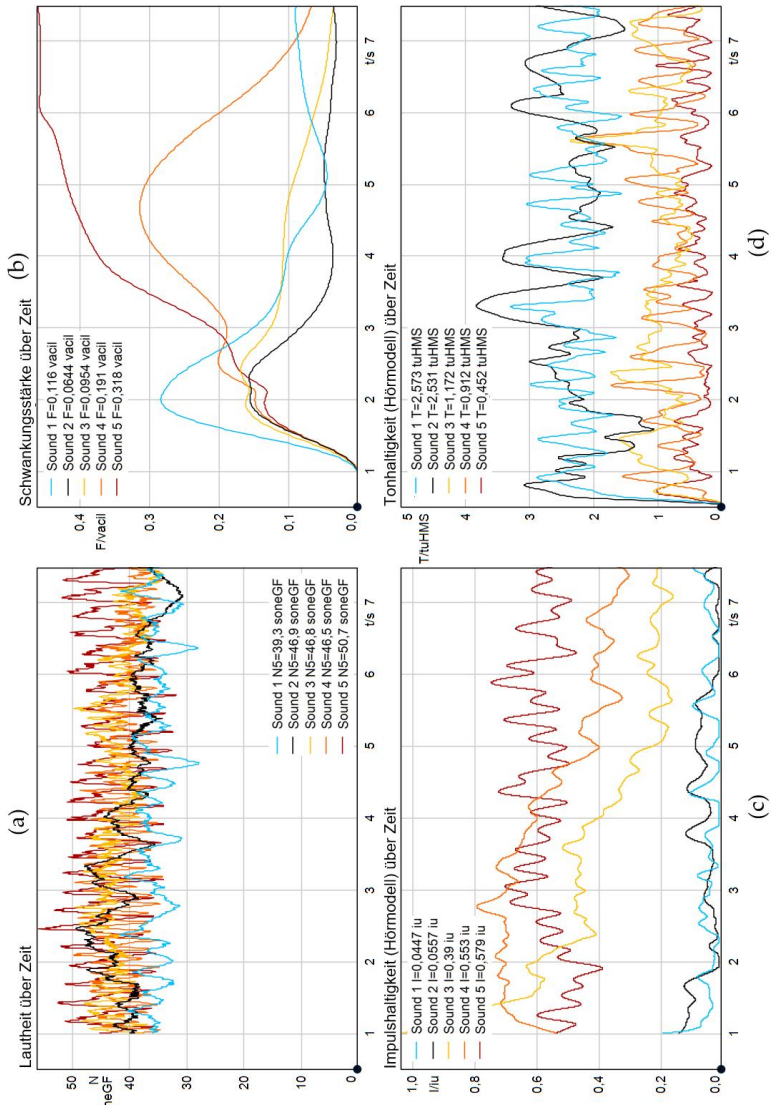


Abbildung 7.2: Psychoakustische Analyse über die Zeit und gemittelte Einzelwerte der verwendeten akustischen Reize: (a) Lautheit; (b) Schwankungsstärke; (c) Impulsivität; (d) Tonhaltigkeit (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

In Abbildung 7.2b ist die Schwankungsstärke über Zeit dargestellt, sowie die durchschnittlichen Werte für die fünf Sounds. Wie in den Spektrogrammen zu sehen ist (Abbildung 7.1), sind die Sounds in Bezug auf ihre Eigenschaften stationär. Die Analyse der Schwankungsstärke über Zeit zeigt jedoch für alle Sounds sehr niedrige Werte zu Beginn der Sounds, die erst im Verlauf der Zeit auf ihre tatsächlichen Werte ansteigen. Dies geschieht aufgrund der Einblendung der Sounds, die zu einer gewisse Einschwingzeit der Werte in der Analyse führt. Trotz dieses anfänglichen Analyse-Artefakts ist ersichtlich, dass sich die Durchschnittswerte für den neu erstellten positiven *Sound 1* (0,12 vacil) und den bedrohlichen *Sound 4* (0,19 vacil) und *Sound 5* (0,32 vacil) in Bezug auf die Schwankungsstärke erheblich unterscheiden. Wie beabsichtigt, weist der optimierte *Sound 5* die höchste Schwankungsstärke auf. Obwohl *Sound 4* eine Nachbildung von *Sound 3* war, unterscheiden sie sich in der Schwankungsstärke (0,09 vacil für *Sound 3* gegenüber 0,19 vacil für *Sound 4*). Mit dem Ziel, die wahrgenommenen Klangeigenschaften zwischen dem originalen Sound und der Nachbildung so ähnlich wie möglich zu halten, und der Erkenntnis aus der vorangegangenen Studie, dass eine höhere Schwankungsstärke, mit einem bedrohlichen Gefühl korreliert, wurde diese Abweichung zwischen den beiden Sounds akzeptiert. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Ähnliche Umstände sind in Abbildung 7.2c zu sehen. Die positiven Sounds (*Sound 1* und *2*) weisen eine sehr geringe Impulshaltigkeit von 0,05 iu bzw. 0,06 iu im Vergleich zu dem angestrebten bedrohlichen *Sound 3* (0,39 iu), *Sound 4* (0,56 iu) und *Sound 5* (0,58 iu) auf, wobei eine leichte Verschiebung zwischen *Sound 3* und *4* besteht. Auch hier wird diese Abweichung im Kontext des Ziels eines erhöhten bedrohlichen Effekts akzeptiert.

In Abbildung 7.2d ist die Tonhaltigkeit über die Zeit sowie die durchschnittliche Tonhaltigkeit dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Ziel, eine hohe Tonhaltigkeit für den positiven *Sound 1* (2,57 tuHMS) und eine niedrige Tonhaltigkeit für die bedrohlichen *Sounds 4* (0,91 tuHMS) und *5* (0,45 tuHMS) bei den neu erstellten Sounds erreicht wurde. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

7.2.1 Empfundene und assoziiert Emotionen gegenüber den Sounds

Um den emotionalisierenden Effekt der Sounds zu untersuchen, wurden die Versuchspersonen nach den Emotionen gefragt, die sie beim Hören der verschiedenen Sounds empfanden. Die emotionalen Beschreibungen der Einzelantworten waren ernst, traurig, ängstlich, fröhlich, bedroht, ruhig und aufgeregt. Abbildung 7.3 veranschaulicht die Häufigkeit der von den Teilnehmenden

gegebenen Antworten bezüglich der emotionalen Beschreibungen beim Hören der Sounds.

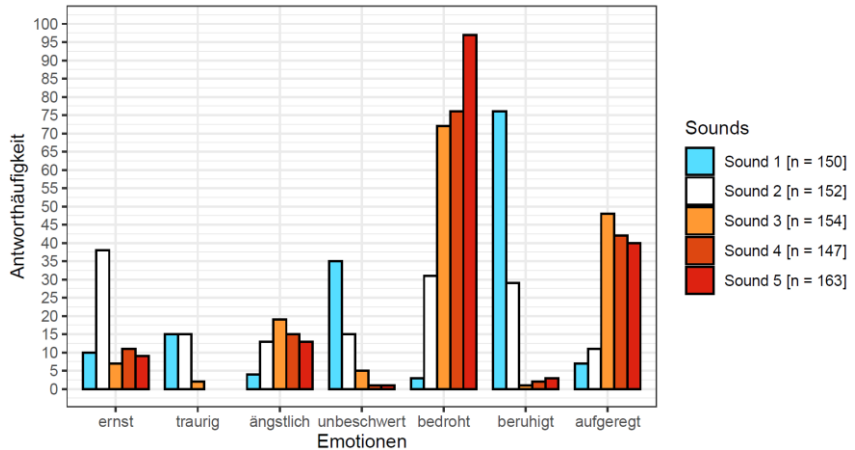


Abbildung 7.3: Antworthäufigkeit der Probanden in Bezug auf die empfundenen Emotionen während des Hörens der fünf Sounds (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Für die Bewertung der emotionalisierenden Sounds liegt das Hauptinteresse primär auf der Aktivierung positiver und negativer Emotionen, die zu einer veränderten Bewertung einer Situation und folglich zu einer Verhaltensänderung führen könnten. Für die positiven Emotionen sind dies unbeschwert und beruhigt, für die negativen Emotionen bedroht oder ängstlich. Ebenfalls von Interesse ist das Erregungsniveau bei den Teilnehmenden, das besonders den Effekt negativer Emotionen auf das Bedürfnis verstärken kann, eine Situation zu vermeiden oder zu verlassen. Ein hohes Erregungsniveau wird durch den Deskriptor aufgeregt repräsentiert.

Wie in Abbildung 7.3 gezeigt, wurde *Sound 1* von 150 Teilnehmenden bewertet, von denen sich nur 5 % aufgeregt und 5 % bedroht oder ängstlich fühlten. Insgesamt hatten 75 % der Versuchspersonen beim Zuhören positive Emotionen (unbeschwert und beruhigt). *Sound 2* wurde von 152 Teilnehmenden bewertet, von denen sich 30 % bedroht oder ängstlich fühlten, 30 % unbeschwert oder beruhigt und 26 % sich beim Zuhören neutral (ernst) fühlten. Insgesamt fühlten sich 8 % der Versuchspersonen aufgeregt beim Hören des Sounds. *Sound 3* wurde von 154 Teilnehmenden bewertet, von denen sich 68 % bedroht oder ängstlich fühlten. Nur 4 % hatten beim Zuhören positive Emotionen (unbeschwert und beruhigt).

Insgesamt fühlten sich 25 % der Versuchspersonen beim Hören des Sounds aufgeregt. *Sound 4* wurde von 147 Teilnehmenden bewertet, von denen sich 62 % bedroht oder ängstlich fühlten. Nur 2 % hatten beim Zuhören positive Emotionen (unbeschwert und beruhigt). Insgesamt fühlten sich 25 % der Versuchspersonen beim Hören des Sounds aufgeregt. *Sound 5* wurde von 163 Teilnehmenden bewertet, von denen sich 68 % bedroht oder ängstlich fühlten. Nur 3 % hatten beim Zuhören positive Emotionen (unbeschwert und beruhigt). Insgesamt fühlten sich 25 % der Versuchspersonen aufgeregt beim Hören des Sounds. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Die Teilnehmenden wurden außerdem aufgefordert, jeden Sound anhand von Deskriptor-Paaren auf einer 7-stufigen Likert-Skala zu bewerten. In Abbildung 7.4 werden die durchschnittlichen Übereinstimmungen für die bipolaren Deskriptor-Paare dargestellt. Die Abszisse enthält das durchschnittliche Maß an Übereinstimmung, während die Ordinate die verbalen Deskriptor-Paare enthält. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

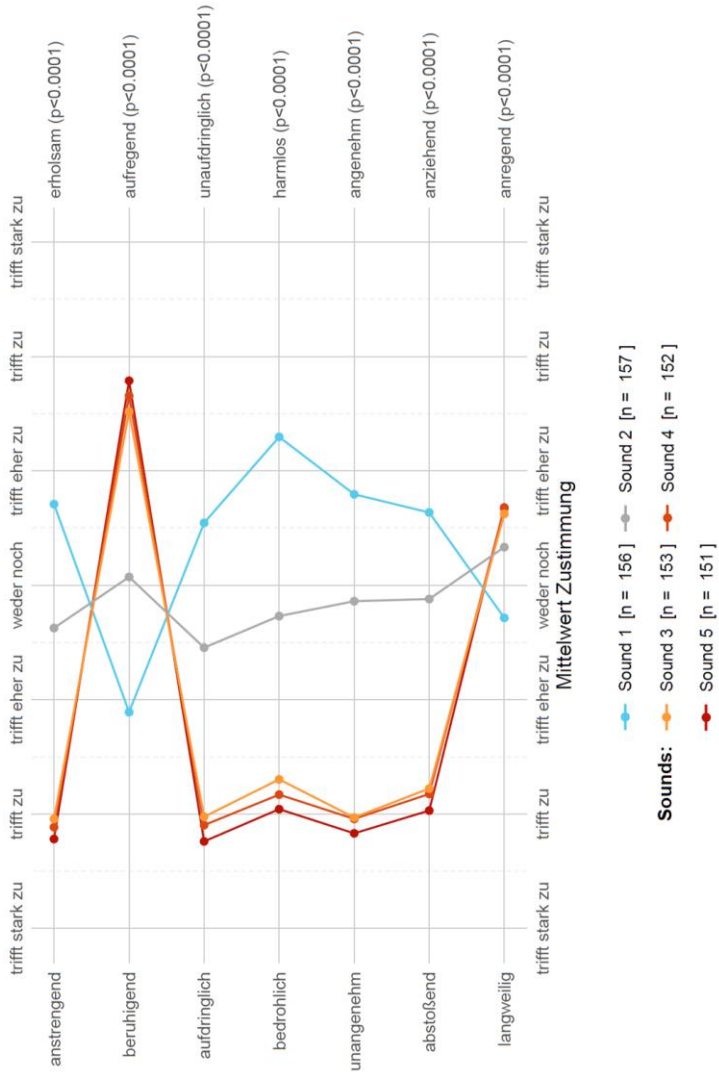


Abbildung 7.4: Mittelwert der Zustimmung der Probanden zu den bipolaren Deskriptoren für die wahrgenommene Wirkung der betrachteten Geräusche. Gesamtsignifikanz des Friedman-Rangsummentests auf der rechten Seite. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Im Allgemeinen war das durchschnittliche Übereinstimmungsniveau bzgl. der Deskriptoren für die negativen Sounds im Vergleich zu den positiven Sounds stärker ausgeprägt. Die Ergebnisse für den Deskriptor bedrohlich passten sehr gut zu den Aussagen über das Gefühl der Bedrohung (Abbildung 7.3). Als bedrohlich wahrgenommene Sounds wurden auch als unangenehm und abstoßend bewertet, und umgekehrt. Darüber hinaus wurden alle bedrohlichen Sounds als anstrengender und aufdringlicher wahrgenommen, während positive Sounds als erholsamer und unaufdringlicher wahrgenommen wurden. Bedrohlich wahrgenommene Sounds wurden als aufregender bewertet, während unbedrohliche Sounds als beruhigender wahrgenommen wurden. In Bezug auf das Deskriptor-Paar langweilig – anregend wurden alle Sounds eher ähnlich bewertet, unabhängig davon, ob der Sound bedrohlich oder positiv wahrgenommen wurde.

Ein Signifikanztest mit dem Friedman-Rangsummentest für unabhängige Stichproben in Blockanordnung zeigte Signifikanz ($p < 0,0001$) für alle Deskriptoren, wenn sie über alle fünf Sounds hinweg berechnet wurden. Um die individuellen Signifikanzen zwischen zwei verschiedenen Soundpaaren weiter zu bewerten, wurde ein Friedman-Post-Hoc-Test durchgeführt. Er zeigte statistisch signifikante Unterschiede ($p < 0,0001$) in allen Deskriptoren außer langweilig–stimulierend bzgl. aller möglichen Paaren zwischen den positiven *Sounds 1* oder *2* und den negativen/bedrohlichen *Sounds 3, 4* oder *5*. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Zusammenfassung

Sound 1 rief bei 75 % der Teilnehmende positive Emotionen (unbeschwert/beruhigend) hervor. Nur 5 % fühlten sich bedroht/ängstlich. Obwohl die Ergebnisse der Likert-Skala für *Sound 1* im Vergleich zu *Sounds 5, 4* und *3* weniger ausgeprägt sind, ähneln sie den hervorgerufenen Emotionen dennoch (Abbildung 7.3). Die durch *Sound 2* hervorgerufenen Emotionen waren sehr stark über alle möglichen Antworten verteilt, wobei 30 % der Teilnehmende negative Emotionen, 30 % positive Emotionen und 25 % neutrale Emotionen während des Hörens empfanden. In den Ergebnissen der Likert-Skala ist jedoch eine leichte Verschiebung hin zu einer negativen Bewertung ersichtlich, ähnlich den Kurvenprofilen von *Sounds 3, 4* und *5*.

In Bezug auf die positive und negative Valenz der hervorgerufenen Emotionen riefen *Sounds 3, 4* und *5* bei ungefähr 65 % der Teilnehmende negative Emotionen (bedroht/ängstlich) hervor und nur selten positive Emotionen, wobei sich nur zwischen 4 % und 2 % der Versuchspersonen unbeschwert oder beruhigt fühlten, während sie einen dieser Sounds hörten. Diese Bewertungen spiegeln sich auch in der Bewertung der Sounds in der Likert-Skala (Abbildung 7.4) wieder. In Bezug auf

die durch die Sounds hervorgerufene Erregung (die den Drang zur Handlung auf Basis von Emotionen erhöhen können) waren die Prozentsätze der Teilnehmenden, die sich beim Hören aufgeregt fühlten, bei *Sound 1* (5 %) und *Sound 2* (8 %) niedriger im Vergleich zu *Sound 3* (33 %), *Sound 4* (25 %) und *Sound 5* (25 %).

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Sounds, die mit dem entwickelten Soundgenerator erstellt wurden (*Sounds 1, 4 und 5*), tatsächlich die angestrebten Emotionen hervorrufen können und mit den gewünschten Emotionen assoziiert werden. Für die Frage nach der Steigerung der Effektivität der Sounds aufgrund der in der vorherigen Studie gefundenen Optimierungsparameter (Petersen, Zaimovic & Albers, 2023) lässt sich eine Zunahme des Gefühls der Bedrohung durch *Sound 5* mit seinen höheren Niveaus an Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke im Vergleich zu *Sound 3 und 4* beobachten, gleichzeitig jedoch auch eine leichte Abnahme des Gefühls der Angst. Für *Sound 1* zeigt sich eine wesentliche Verstärkung hinsichtlich der Hervorrufung eines angenehmen unaufgeregten Gefühls im Gegensatz zum positivsten Sound der vorherigen Studie (*Sound 2*), obwohl die Geräusche in Bezug auf ihre psychoakustischen Werte sehr ähnlich waren. Allerdings setzt sich *Sound 1* aus deutlich weniger einzelnen Tönen zusammen und verwendet einen harmonischeren Dur-Akkord im Vergleich zum harmonischen Noten-Cluster von *Sound 2*. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Im nächsten Abschnitt wird betrachtet, ob es einen Effekt von *Sounds 2, 3, 4 und 5* im Vergleich zu *Sound 1* bezüglich der Abschätzung des Sicherheitsabstands, der gewünschten Veränderung und der Bewertung des Sicherheitsabstands gibt. Der Fokus liegt auf dem Vergleich des positiven *Sound 1* mit den negativen *Sounds 3, 4 und 5*, da *Sound 2* eine eher neutrale emotionale Wirkung hatte.

7.2.2 Schätzung des Sicherheitsabstands unter Einfluss der verschiedenen Sounds

Den Teilnehmenden wurden in der Studie fünf verschiedene Video-Sound-Kombinationen präsentiert. Sie mussten den in den Videos gezeigten Sicherheitsabstand in Metern schätzen und wurden gefragt, ob sie den gezeigten Sicherheitsabstand als angemessen bewerteten. Versuchspersonen, die den Sicherheitsabstand als zu klein oder zu groß bewerteten, konnten zudem angeben, um wie viele Meter sie den Sicherheitsabstand ändern wollen würden. Die Ergebnisse für diese drei verschiedenen Fragen werden in aggregierter Form über alle Videos hinweg dargestellt. Nur Teilnehmende, die angaben, keine Methode zur Bestimmung des Sicherheitsabstands verwendet zu haben, sondern sie intuitiv geschätzt haben, wurden in die Analyse einbezogen. Abbildung 7.5 zeigt die Boxplots für den geschätzten Sicherheitsabstand der Versuchspersonen für jeden

der Sounds, aggregiert über alle Videos hinweg. Die dicke Linie repräsentiert den Median und die gestrichelte Linie den Mittelwert. Für *Sound 1* beträgt der Median bspw. 20 Meter. Die Mittelwerte sind wie folgt: *Sound 1*: 22,47 m (SD = 20,68), *Sound 2*: 19,96 m (SD = 14,11), *Sound 3*: 18,8 m (SD = 20,68), *Sound 4*: 19,05 m (SD = 13,70) und *Sound 5*: 19,7 m (SD = 16,64).

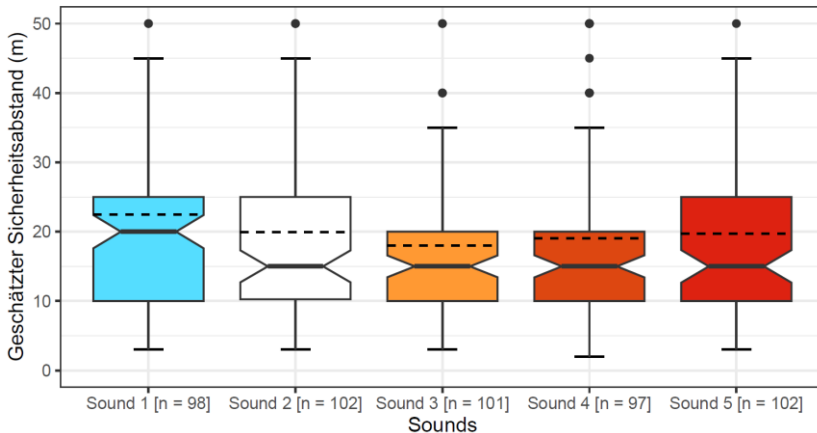


Abbildung 7.5: Boxplots zur Schätzung der Sicherheitsabstände aus den gezeigten Videos: aggregiert über die Videos und dargestellt für die fünf Sounds. Die dicke Linie repräsentiert den Median und die gestrichelte Linie den Mittelwert. Die unteren und oberen Grenzen der Box repräsentieren jeweils das 1. und 3. Quartil. Die Whisker repräsentieren $0,25-1,5 \text{ IQR} / 0,75 + \text{IQR}$ (Interquartilsabstand). Ausreißer werden unabhängig dargestellt. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Basierend auf dem Mittelwert und dem Median kann angenommen werden, dass der positive *Sound 1* im Vergleich zu den anderen Sounds zu höheren Werten bei der Schätzung des Sicherheitsabstands führt.

In Abbildung 7.6 werden die prozentualen Werte der Antworthäufigkeiten der Teilnehmenden gezeigt, wenn sie den Sicherheitsabstand als angemessen, zu klein oder zu groß bewerteten. Die Werte werden für jeden der Sounds, aggregiert über die Videos dargestellt.

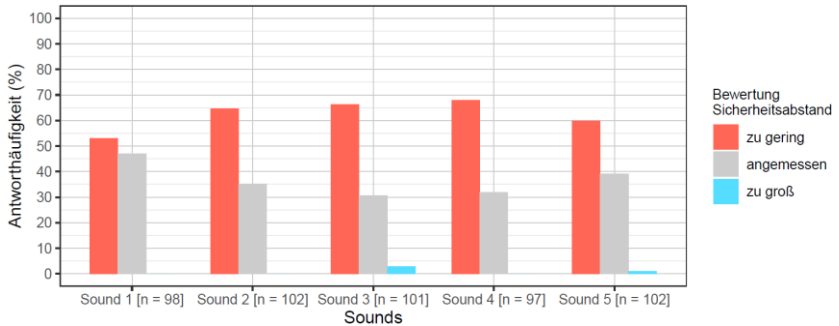


Abbildung 7.6: Prozentsätze der Antworthäufigkeit der Teilnehmenden für die Bewertung der gezeigten Sicherheitsabstände aggregiert über die fünf Videos und dargestellt über die Sounds (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Es ist erkennbar, dass die gezeigten Sicherheitsabstände kaum als zu groß bewertet wurden. Zusätzlich haben mindestens 30 % (niedrigster Wert *Sound 3*) der Teilnehmenden die gezeigten Sicherheitsabstände immer noch als angemessen bewertet, was darauf hindeutet, dass die verwendeten Videos innerhalb eines guten Interpretationsspielraums liegen. Es ist auch ersichtlich, dass der Unterschied zwischen den Aussagen *angemessen* und *zu gering* bei dem positiven *Sound 1* am kleinsten ist. Interessanterweise ist der nächstkleinste Unterschied der optimierte bedrohliche *Sound 5*.

Abbildung 7.7 zeigt die Boxplots für die angegebenen Änderungswünsche des Sicherheitsabstands in Metern für jeden der Sounds, aggregiert über alle Videos. Die Mittelwerte sind *Sound 1*: 13,10 m (SD = 10,62), *Sound 2*: 13,06 m (SD = 9,91), *Sound 3*: 14,70 m (SD = 12,24), *Sound 4*: 14,55 m (SD = 12,36) und *Sound 5*: 15,92 m (SD = 13,41).

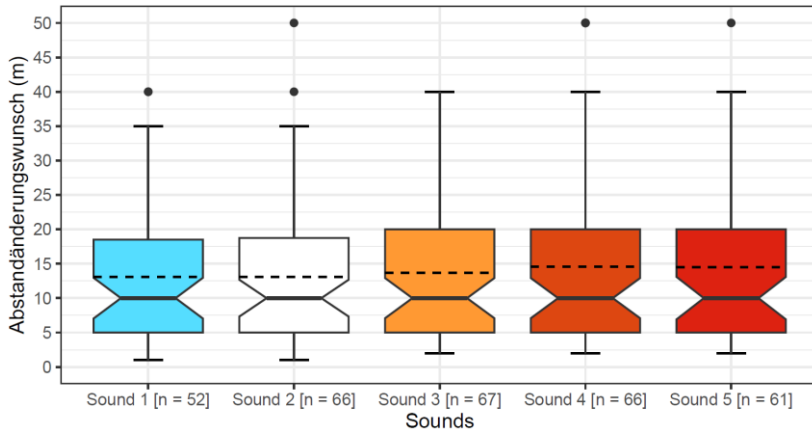


Abbildung 7.7: Boxplots für die gewünschte Änderung des Sicherheitsabstands aggregiert über die Videos und dargestellt für die fünf Sounds. Die dicke Linie repräsentiert den Median und die gestrichelte Linie den Mittelwert. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Basierend auf dem Mittelwert kann angenommen werden, dass der positive *Sound 1* und der neutrale *Sound 2* im Vergleich zu *Sounds 3, 4 und 5* zu niedrigeren Werten in Metern der gewünschten Änderung des Sicherheitsabstands führen.

7.2.3 Statistische Analyse der Auswirkungen der Sounds auf den geschätzten Sicherheitsabstand und die geforderte Änderung des Sicherheitsabstands

Um zu testen, ob die verschiedenen Sound-Video-Kombinationen einen Einfluss auf die Schätzung des Sicherheitsabstands in den Videos (*Hypothese 1.1*) sowie auf die gewünschte Änderung des Sicherheitsabstands (*Hypothese 1.2*) durch die Teilnehmenden hatten, wurde eine statistische Analyse für wiederholte Messungen durchgeführt. Die gewählte Methode ist der einseitige paarweise *t*-Test für Messwiederholungen (Kapitel 2.7.3.2). Bei einem einseitigen *t*-Test wird auf eine Abnahme der Schätzung des Sicherheitsabstands in Metern für die *Sounds 2-4* im Vergleich zu dem positiven *Sound 1* getestet. Die statistische Analyse wurde in R (Version 4.3.1) mit der R-Funktion "t.test" des nativen "stats"-Pakets von R implementiert. Die Methode wurde gewählt, weil sie einen paarweisen (*Sound A* vs. *Sound B*) Vergleich der Mittelwerte der Zunahme oder Abnahme in mindestens

ordinal abhängigen Variablen (Schätzung des Sicherheitsabstands (m) oder gewünschte Sicherheitsabstandsänderung (m)) basierend auf einer kategorialen unabhängigen Variable (*Sounds 1–5*) für Messwiederholungen ermöglicht (Teilnehmende bewerteten mehrere Sound-Video-Kombinationen).

Teilnehmende, die angaben, eine Methode zur Bestimmung des Sicherheitsabstands verwendet zu haben und diesen nicht intuitiv geschätzt haben, wurden von der Analyse ausgeschlossen. Zusätzlich wurden alle Teilnehmenden, die nicht alle Sicherheitsabstände der fünf Video-Sound-Kombinationen geschätzt und bewertet haben ausgeschlossen, da es für das statistische Verfahren notwendig ist, dass für alle Sounds dieselbe Anzahl an Datenpunkten vorliegen. Potenzielle Ausreißer wurden überprüft und gelöscht, wenn eine fehlerhafte Eingabe plausibel erschien. Einige Personen, die sehr hohe Werte für die Schätzung und gewünschte Änderung der Sicherheitsentfernung angaben, wurden jedoch in der Stichprobe behalten, da die außergewöhnliche Höhe der Werte über die Schätzungen/Wünsche der jeweiligen Teilnehmenden hinweg konsistent waren und nicht von einer fehlerhaften Eingabe auszugehen war. Dies ergibt 89 Teilnehmende, die für die Analyse miteinbezogen werden.

Die Schätzungen und Änderungswünsche bzgl. des Sicherheitsabstands sind nicht normalverteilt, was eine Prüfung mit dem Shapiro-Wilk-Test mit $p < 0,05$ zeigte. Sofern die betrachtete Stichprobengrößen jedoch $n > 30$ ist, kann der t -Test auch für nicht normal verteilte Daten verwendet werden (Kwak & Kim, 2017). Die analysierten Paare wurden als Vergleich zwischen dem positivsten *Sound 1* gegenüber allen anderen Sounds (*Sounds 2–5*) gebildet. Die Effektstärke wurde in Form von Cohen's d mithilfe der Funktion "cohens.d" des Pakets "misty" in Version 0.6.2 berechnet. Für die gewünschte Änderung des Sicherheitsabstands war eine Angabe in Metern nur möglich, wenn die Teilnehmenden den gezeigten Sicherheitsabstand als zu gering oder zu groß bewerteten. Für die Berechnung der Statistik wurden die fehlenden Eingaben der gewünschten Änderung bei der Auswahl *angemessen* durch 0 m ersetzt.

Die Ergebnisse des einseitigen gepaarten t -Tests zum Test auf eine Abnahme des geschätzten Sicherheitsabstands in Metern zwischen *Sounds 2–5* im Vergleich zu *Sound 1* sind in Tabelle 7.3 dargestellt. Sie enthält die gemittelten Differenzen der geschätzten Sicherheitsabstände innerhalb der Soundpaare, Cohen's d -Werte und t -Werte sowie die Signifikanz bzgl. der Unterschiede der geschätzten Sicherheitsabstände innerhalb aller verglichenen Soundpaare. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Tabelle 7.3: Ergebnisse des einseitigen paarweisen *t*-Tests zur Überprüfung einer Abnahme des geschätzten Sicherheitsabstands für *Sounds* 2–5 im Vergleich zu *Sound 1*: Mittelwertdifferenzen, Effektstärke (Cohens *d*), *t*-Werte und Signifikanzen. Signifikanzniveaus: * = $p \leq 0,05$, ** = $p \leq 0,01$, *** = $p \leq 0,001$

Einseitiger <i>t</i> -Test		Schätzung Sicherheitsabstand			
Sound-Paar	Mittelwert Unterschied Sicherheitsabstand (m)	Cohen's <i>d</i>	<i>t</i> (88)	<i>p</i> -Wert	
Sound 1 – Sound 2	-1,71	-0,09	1,09	0,14	
Sound 1 – Sound 3	-3,79	-0,21	2,13	0,02*	
Sound 1 – Sound 4	-3,34	-0,19	2,08	0,02*	
Sound 1 – Sound 5	-2,78	-0,15	1,97	0,03*	

Aus Tabelle 7.3 lässt sich ableiten, dass es eine signifikante ($p < 0,05$), kleine Effektstärke ($|\text{Cohen's } d| > 0,1, < 0,3$) und einen negativen Mittelwert der Unterschiede für die Schätzung des dargestellten Sicherheitsabstands zwischen *Sound 1* im Vergleich zu *Sound 3, 4* und *5* gibt. Für *Sound 1* im Vergleich zu *Sound 2* sind der Effekt und der Mittelwert der Unterschiede negativ, statistisch nicht signifikant und vernachlässigbar ($|\text{Cohen's } d|, < 0,1$). Alle Mittelwerte der Unterschiede im Sicherheitsabstand für *Sound 1* im Vergleich zu *Sounds 3–5* sind negativ und signifikant, was eine systematische Abnahme der Schätzung des Sicherheitsabstands in Metern unter negativeren Sounds bedeutet. *Hypothese 1.1* besagt, dass Sounds, die negative/positive Emotionen hervorrufen oder damit assoziiert werden, zu einer Abnahme/Zunahme des geschätzten Sicherheitsabstands führen, der in Videos dargestellt wird. Basierend auf den Ergebnissen kann die Nullhypothese (negative/positive Emotionen führen zu keiner Abnahme/Zunahme der geschätzten Sicherheitsdistanz) mit einer Sicherheit von 95 % abgelehnt werden, da die *t*-Werte für den positiven-negativen Sound Vergleich größer sind als der kritische *t*-Wert ($t(88) = [1,99, 2,08, 2,13] > t\text{-kritisch}(88) = 1,662$). Damit kann die angegebene Alternativhypothese (*H1.1*) akzeptiert werden.

Die Ergebnisse des einseitigen gepaarten *t*-Tests zur Untersuchung der Zunahme der der mittleren gewünschten Änderung des Sicherheitsabstands in Metern zwischen *Sounds 2–5* im Vergleich zu *Sound 1* sind in Tabelle 7.4 dargestellt. Sie enthält die Mittelwertunterschiede, Cohen's *d*-Werte und *t*-Werte sowie die Signifikanzen der gewünschten Änderung des Sicherheitsabstands für alle verglichenen Soundpaare. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Tabelle 7.4: Ergebnisse des einseitigen paarweisen *t*-Tests zur Untersuchung einer Zunahme der gewünschten Änderung des Sicherheitsabstands für *Sounds* 2–5 im Vergleich zu *Sound 1*: Mittelwertunterschiede, Effektstärke (Cohen's *d*), *t* -Werte und Signifikanzen. Signifikanzniveaus: * = $p \leq 0,05$, ** = $p \leq 0,01$, *** = $p \leq 0,001$ (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Einseitiger <i>t</i> -Test		Gewünschte Abstandsänderung			
Sound Pair	Mittelwertunterschied	Cohen's <i>d</i>	<i>t</i> (88)	<i>p</i> -Value	
	gewünschte Sicherheitsabstands-änderung (m)				
Sound 1 – Sound 2	0,22	0,04	–0,27	0,39	
Sound 1 – Sound 3	1,58	0,25	–1,78	0,04 *	
Sound 1 – Sound 4	1,66	0,26	–2,00	0,02 *	
Sound 1 – Sound 5	0,63	0,01	–0,74	0,23	

Aus Tabelle 7.4 lässt sich ableiten, dass es nur eine signifikante ($p < 0,05$) und kleine Effektstärke ($|\text{Cohen's } d| > 0,1, < 0,3$) im Mittelwert der Unterschiede bzgl. der gewünschten Änderung des dargestellten Sicherheitsabstands zwischen *Sound 1* im Vergleich zu *Sounds* 3 und 4 gibt. Für *Sound 1* im Vergleich zu *Sound 2* und *Sound 5* sind der Effekt und der Unterschied im Mittelwert positiv, statistisch nicht signifikant und vernachlässigbar ($|\text{Cohen's } d|, < 0,1$). Alle Mittelwerte der Unterschiede im Wunsch nach einer Änderung des Sicherheitsabstands für *Sound 1* im Vergleich zu *Sounds* 2–5 sind positiv, was für eine Zunahme des gewünschten Sicherheitsabstands unter negativeren Sounds spricht.

Hypothese 1.2 besagt, dass Sounds, die positive oder negative Emotionen hervorrufen, einen Einfluss auf die gewünschte Erhöhung des Sicherheitsabstands haben, der in Videos dargestellt wird. Basierend auf den Ergebnissen kann die Nullhypothese, dass positive/negative Sounds keinen Einfluss auf die gewünschte Erhöhung des Sicherheitsabstands in Videos haben, nicht vollständig abgelehnt werden. Obwohl es einen positiven Effekt auf die gewünschte Änderung des Sicherheitsabstands für *Sound 1* gegenüber *Sound 3* und 4 gab, sind die *t*-Werte für den positiven-negativen Vergleich nicht alle größer als der kritische *t* -Wert ($t(88) = [1,78, 2,00, 0,74] > t\text{-kritisch}(88) = 1,662$) für die negativen Sounds. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

7.2.4 Statistische Analyse des Einflusses der Sounds auf die Bewertung des Sicherheitsabstands

Um zu testen, ob die verschiedenen Sound-Video-Kombinationen einen Einfluss auf die Bewertung des im Video dargestellten Sicherheitsabstands hatten, wurde eine Auswertung der Daten auf Basis der gemischten logistischen Regressionsanalyse durchgeführt. Diese Methode schätzt, wie gut die festen Effekte (Terme des Regressionsmodells) eine Veränderung der abhängigen Variable (Bewertung des Sicherheitsabstands als angemessen oder zu gering) innerhalb der Teilnehmenden vorhersagen. Diese Methode wurde gewählt, weil sie einen Vergleich zwischen der binären abhängigen Variable — Bewertung des dargestellten Sicherheitsabstands als angemessen oder zu gering — und den verschiedenen Sounds (kategoriale Variable) ermöglicht. Teilnehmende, die angaben, eine Methode zur Bestimmung des Sicherheitsabstands verwendet zu haben, wurden von der Analyse ausgeschlossen. Darüber hinaus wurden, um die für die Methode erforderliche binomiale Bedingung zu erfüllen, die Angaben von vier Teilnehmenden ausgeschlossen, welche die dargestellten Sicherheitsabstände als zu groß bewerteten. Dies ergibt eine Stichprobengröße von $n = 103$ für die Berechnung der binomialen logistischen Regression. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Initial wird für das Modell nur der Prädiktor *Bewertung des Sicherheitsabstands* berücksichtigt. Die Teilnehmendennummer wird als Zufallseffekt modelliert, um das Design der wiederholten Messungen der Studie zu berücksichtigen. In den weiteren Modellen werden alle möglichen Kombinationen von verfügbaren Prädiktoren durchiteriert und dann jedes Modell anhand des Goodness-of-Fit-Tests und der Modellauswahlkriterien verglichen. Es wurden insgesamt vier Kandidatenmodelle erstellt, mit denen der Goodness-of-Fit-Test durchgeführt wurde. Tabelle 7.5 zeigt die Ergebnisse der Anpassung der logistischen Regressionsmodelle, bei denen die Ergebnisse über die vier verschiedenen Modelle hinweg verglichen wurden. Da das logistische Modell anfällig für hohe Korrelationen zwischen den unabhängigen Variablen ist, wurde eine Spearman-Korrelation zwischen dem tatsächlichen Sicherheitsabstand der Videos und der tatsächlichen Geschwindigkeit in den Videos berechnet. Es gab nur eine geringe Korrelation ($r = 0,32$, $p < 0,05$) zwischen diesen Variablen. Da die Sounds und Videos zufällig zugeordnet sind, gibt es keine signifikante Korrelation zwischen den Sounds und entweder der tatsächlichen Distanz ($r = -0,01$, $p = 0,77$) oder der tatsächlichen Geschwindigkeit ($r = 0,04$, $p = 0,32$). Um den potenziellen Einfluss der existierenden Korrelation zwischen der Distanz und der Geschwindigkeit auf das Modell zu verringern, werden die Terme ausschließlich additiv in der Formel verwendet. Die Modelle wurden in R (Version 4.3.1) unter Verwendung der "glmer"-Funktion in der binomialen Form des "lme4"-Pakets in Version 1.1–35.1 implementiert. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Modell 1 repräsentiert den geschätzten Einfluss nur von den Sounds, während Modell 2 das Modell mit Sounds und der tatsächlich dargestellten Distanz schätzt. Modell 3 repräsentiert den geschätzten Einfluss von den Sounds und der tatsächlichen Geschwindigkeit, während Modell 4 das Modell mit allen Prädiktoren schätzt (Sounds, tatsächliche Distanz, tatsächliche Geschwindigkeit). Die logistischen gemischten Modelle (geschätzt mittels Machine Learning-Ansätzen und BOBYQA-Optimierer) wurden angepasst, um die Aussagen zur Bewertung des Abstands mit den verschiedenen *Sounds 1–5*, der tatsächlichen Distanz und der tatsächlichen Geschwindigkeit vorherzusagen (Formel: *Bewertung des Abstands* ~ *Sound-Nummer* (alle Modelle) + *tatsächliche Distanz* (Modell 2 und 4) + *tatsächliche Geschwindigkeit* (Modell 3 und 4). Die Modelle beinhalteten die Teilnehmendennummern als Zufallseffekt (Formel: ~1|*Teilnehmendennummer*). (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Tabelle 7.5: Vorhersagemodelle für die Bewertung des Sicherheitsabstands. Die Zahlen stellen die Odds Ratios dar. Die Zahlen in Klammern geben die Standardfehler an. Signifikanzniveaus *** = $p < 0,001$; ** = $p < 0,01$; * = $p < 0,05$ (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
Intercept				
(Sound 1 / Sicherheitsabst. 12 m / Geschw. 50 km/h)	1,18 (0,28)	2,82** (0,35)	1,25 (0,41)	1,21 (0,46)
Sound 2	1,95* (0,34)	2,28* (0,38)	1,95 (0,40)	2,35 (0,45)
Sound 3	2,41** (0,35)	2,68** (0,38)	2,01 (0,40)	2,66* (0,45)
Sound 4	2,44** (0,89)	2,89** (0,39)	2,30 (0,41)	2,90* (0,46)
Sound 5	1,47 (0,34)	1,46 (0,37)	1,09 (0,40)	1,02 (0,46)
Sicherheitsabstand 15 m		0,23*** (0,27)		0,05*** (0,57)
Geschw. 60 km/h			0,16*** (0,41)	2,58 (0,15)
Geschw. 80 km/h			2,58** (0,32)	26,70*** (0,59)
AIC	606	573	540	479
BIC	632	603	574	535
Log Likelihood	-297	-279	-262	-239
Devianz	594	559	524	479
R^2 (Gesamt)	0,41	0,52	0,61	0,74
R^2 (Fixe Effekte)	0,02	0,10	0,15	0,26
n	103	103	103	103
Beobachtungen	496	496	496	496

Da es für logistische gemischte Modelle und für lineare gemischte Modelle keine Werte gibt, ob die Aussagen das ein Modell korrekt, ausreichend oder falsch ist, wird zur Auswahl des besten Modells das Verfahren der Merkmalsauswahl (Feature Subset Selection) verwendet. Hierbei werden die Kriterien AIC, BIC, Devianz, Log-Likelihood, R^2 (Gesamt) und R^2 (Fixe Effekte) (Kapitel 2.7.3.5 und Kapitel 7.1.4.3) verwendet. Eine gesteigerte Modellgüte zeigt sich mit einer Verkleinerung der Werte von AIC, BIC und Devianz und mit einem Ansteigen der Werte von Log-Likelihood, R^2 (Gesamt) und R^2 (Fixe Effekte). Wie in Tabelle 7.5 ersichtlich, nehmen die Devianz-Werte sowie die AIC- und BIC-Werte mit der sukzessiven Einbeziehung von weiteren unabhängigen Variablen (Geschwindigkeit, Sicherheitsabstand) ab,

während die Erklärungskraft des Modells R^2 (Gesamt) und die Erklärungskraft der Prädiktoren R^2 (Fixe Effekte) zunehmen. Somit ist von den erstellten Modellen Modell 4 mit der Einbeziehung aller Prädiktorvariablen am besten in der Lage, die Bewertung des Sicherheitsabstands vorherzusagen und zu erklären.

Um die Güte des Modells final zu bewerten und potenzielle Probleme des Modells zu identifizieren, wurden weitere Tests mit dem „DHARMA“-Paket durchgeführt. Abbildung 7.8 zeigt die aggregierten Ergebnisse dieser Analyse. Die Goodness-of-Fit des Modells wurde bewertet, indem neue Daten mit dem Modell simuliert und mit den beobachteten Daten der Studie verglichen wurden. Das QQ-Diagramm der Residuen in Abbildung 7.8(a) zeigt eine annähernd gerade Linie, was darauf hinweist, dass beide Quantilsätze (beobachtet vs. vorhergesagt) aus derselben Verteilung stammen. Dies wird weiter durch den nicht signifikanten Kolmogorov-Smirnov (KS)-Test unterstützt. Es wurde auf Über- oder Unterdispersion getestet, was bedeutet, dass die Residualvarianz größer/kleiner ist als unter dem angepassten Modell erwartet. Der Dispersionstest war nicht signifikant, was auf keine Über- oder Unterdispersion zwischen beobachteten und simulierten Daten hinweist. Es wurden keine Ausreißer mit dem angepassten Modell im Vergleich zu den beobachteten Daten simuliert. Diagramm (b) zeigt die Residuen gegenüber den vorhergesagten Werten, berechnet über eine Quantilregression, die die empirischen 0,25-, 0,5- und 0,75-Quantile in y-Richtung (durchgezogene Linien) mit den theoretischen 0,25-, 0,5- und 0,75-Quantilen (gestrichelte schwarze Linie) vergleicht. Der Test auf Abweichung zwischen beobachteten und vorhergesagten Quartilen ist nicht signifikant ($p = 0,86$). Die Analyse zeigte keine Probleme mit dem angepassten Modell 4. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

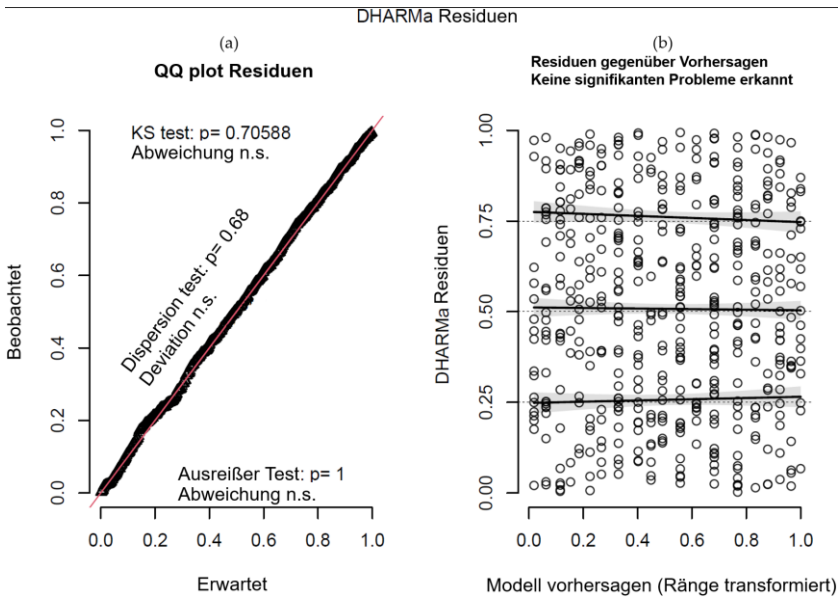


Abbildung 7.8: Modellanpassungsanalyse des Vergleichs zwischen beobachteten und vorhergesagten Daten durch das angepasste Modell 4: (a) zeigt das QQ-Diagramm der Residuen mit den Ergebnissen für den KS-Test auf Abweichung, den Dispersionstest und den Ausreißertest. Das Diagramm zeigt die beobachteten Quantile der Daten (dargestellt als Dreiecke) im Vergleich zu den Quantilen, die zu erwarten sind, wenn die Daten normal verteilt wären (rote Linie). (b) zeigt die Residuen gegenüber den vorhergesagten Werten, berechnet über eine Quantilregression, die die empirischen 0.25-, 0.5- und 0.75-Quantile in y-Richtung (durchgezogene Linien) mit den theoretischen 0.25-, 0.5- und 0.75-Quantilen (gestrichelte schwarze Linie) vergleicht. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Die gesamte Erklärungskraft von Modell 4 ist groß (R^2 (gesamt) = 0.74), und der Teil, der sich allein auf die fixen Effekte bezieht (R^2 (fixe Effekte)) beträgt 0.26. Der Intercept des Modells, der Sound = *Sound 1*, tatsächliche Distanz = 12 m und tatsächliche Geschwindigkeit = 50 km/h entspricht, liegt bei 0.19 (95 % CI [-0.72, 1.11], $p = 0.681$) mit einem Odds Ratio von 1.21 (Standardfehler = 0.46). Die Odds Ratio gibt das Verhältnis der Chancen (Odds) für das Eintreten des Ereignisses (Bewertung des Sicherheitsabstands als *zu gering*) unter Berücksichtigung der

unabhängigen Variablen an. In diesem Fall ist also die Chance 1 zu 1,21, dass bei *Sound 1* sowie einer dargestellten Distanz von 12 m und einer dargestellten Geschwindigkeit von 50 km/h der gezeigte Sicherheitsabstand als *zu gering* bewertet wird. Dies deckt sich mit der prozentualen Angabe in der deskriptiven Statistik. Innerhalb dieses Modells wurde Folgendes festgestellt:

Der Effekt von *Sound 2* ist statistisch nicht signifikant und positiv (Beta = 0,86, 95 % CI [-0,03, 1,74], $p = 0,058$), mit einem Odds Ratio von 2,35 (SE = 0,45);

Der Effekt von *Sound 3* ist statistisch signifikant und positiv (Beta = 0,98, 95 % CI [0,09, 1,87], $p = 0,030$), mit einem Odds Ratio von 2,66 (SE = 0,45);

Der Effekt von *Sound 4* ist statistisch signifikant und positiv (Beta = 1,06, 95 % CI [0,16, 1,97], $p = 0,021$), mit einem Odds Ratio von 2,90 (SE = 0,46);

Der Effekt von *Sound 5* ist statistisch nicht signifikant und positiv (Beta = 0,02, 95 % CI [-0,87, 0,91], $p = 0,968$), mit einem Odds Ratio von 1,02 (SE = 0,46).

Standardisierte Koeffizienten wurden erhalten, indem das Modell auf einer standardisierten Version des Datensatzes angepasst wurde. Unter Verwendung einer Wald-z-Verteilungsannäherung wurden die 95 % Konfidenzintervalle (CIs) und p-Werte berechnet. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Basierend auf den Odds Ratios des Modells 4 zur Vorhersage einer Änderung der abhängigen Variable (Bewertung des Sicherheitsabstands als *angemessen* oder *zu gering*) in Abhängigkeit der verschiedenen Sounds zeigt sich, dass nur *Sounds 3* und *4* eine signifikante Odds Ratio (2,66 und 2,90, $p < 0,05$) aufweisen. *Sound 5* hat eine nicht signifikante Odds Ratio von 1,02. Obwohl die Sounds bei den Teilnehmenden sehr ähnliche Emotionen hervorriefen, scheinen sie sich in ihrem Einfluss auf die Bewertung der Angemessenheit der in den Videos gezeigten Sicherheitsabstände zu unterscheiden. Dennoch zeigt sich, dass Sounds, die positive oder negative Emotionen hervorrufen oder mit solchen Emotionen assoziiert werden, einen Einfluss auf die Bewertung der Angemessenheit der dargestellten Sicherheitsabstände in Videos haben können. *Hypothese 1.3* besagt, dass Sounds, die negative/positive Emotionen hervorrufen oder damit assoziiert werden, zu einer erhöhten Chance führen, dass ein dargestellter Sicherheitsabstand als *zu gering/angemessen* bewertet wird. Basierend auf den Ergebnissen kann die Nullhypothese (negative/positive Emotionen haben *keinen* Einfluss darauf, dass ein dargestellter Sicherheitsabstand als *zu klein/angemessen* bewertet wird) nicht vollständig abgelehnt werden. Obwohl die Chancen 2.66- oder 2.9-mal höher waren, dass der dargestellte Sicherheitsabstand unter *Sounds 3* und *4* im Vergleich zu *Sound 1* als *zu klein* bewertet wurde, war die Wahrscheinlichkeit im Wesentlichen

1:1, wenn die Videos mit *Sound 5* kombiniert wurden. Trotzdem ist anzumerken, dass sich die Prozentzahlen der Aussagen *angemessen/zu gering* bzgl. der dargestellten Sicherheitsabstände (Abbildung 7.6) für *Sound 5* (60 % gaben an, dass er *zu gering* ist) von den Antworten für *Sound 1* (52 % gaben an, dass er *zu gering* ist) unterschieden. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

7.3 Diskussion

In dieser Studie wurde einerseits untersucht, ob die mit dem im Rahmen der Forschungstätigkeit entwickelten Soundgenerator erzeugten Sounds ähnliche Emotionen hervorrufen können wie die Sounds, die für die vorherige Studie (Kapitel 5 bzw. Petersen, Zaimovic und Albers (2023)) erstellt wurden, und ob die optimierten Sounds die Effektivität der Sounds hinsichtlich der Hervorrufung von Emotionen steigern. Weiterhin wurde untersucht, ob Sounds, die positive oder negative Emotionen hervorrufen oder mit solchen Emotionen assoziiert werden, einen Einfluss auf die Schätzung des Sicherheitsabstands, die gewünschte Erhöhung des Sicherheitsabstands oder die Bewertung der Angemessenheit der dargestellten Sicherheitsabstände in Videos haben. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Bezüglich der Effektivität der im Soundgenerator erstellten Sounds (*Sounds 1, 4* und *5*) im Vergleich zu den Sounds aus der vorherigen Studie (*Sounds 2* und *3*) lässt sich sagen, dass für die auf die Emotionen Angst/Bedrohung abzielenden Sounds sehr ähnliche Ergebnisse für den neu erzeugten Sound *4* im Vergleich zum replizierten ursprünglichen Sound *3* erzielt wurden. Für den auf Basis der vorherigen Studie gefundenen Korrelationen zwischen psychoakustischen Eigenschaften und Emotionen optimierten *Sound 5* konnte die Hervorrufung des Gefühls der Bedrohung tatsächlich erhöht werden. Für den optimierten *Sound 1*, der auf positive angenehme Emotionen abzielt, konnte die Hervorrufung positiver Gefühle (unbeschwert/beruhigt) im Vergleich zum positivsten Sound der vorherigen Studie (*Sound 2*) deutlich erhöht werden. Die neu erstellten Sounds wurden neben den gefundenen Korrelationen auch unter Verwendung der Erkenntnisse über die Beziehungen zwischen emotionalisierenden positiven/negativen Effekten und harmonischen Strukturen (Costa et al., 2000) sowie zugrunde liegenden Akkorden (Pallesen et al., 2005) erstellt. Des Weiteren wurden Erkenntnisse über die emotionalisierende Wirkung von Schärfe, Rauheit und Schwankungsstärke oder Impulshaltigkeit (Alt & Jochum; Koelsch et al., 2013) für die Erstellung und Optimierung verwendet. Da die erstellten und optimierten Sounds die entsprechenden Emotionen effektiv hervorriefen, konnten die Erkenntnisse dieser Studien weiter verifiziert werden. Für *Sound 2* aus der vorherigen Studie ist

anzumerken, dass in der vorliegenden Studie sehr unterschiedliche Emotionen (Bedrohung/Angst und Unbeschwertheit/Beruhigung) zu gleichen Teilen in den Teilnehmenden hervorgerufen wurden (jeweils 30 % der Teilnehmende gaben an, positive oder negative Emotionen zu empfinden). Im Vergleich dazu rief derselbe Sound in der vorherigen Studie in 64 % der Teilnehmenden positive Emotionen hervor und nur in 21 % der Teilnehmenden negative Emotionen. Dies ist ein starkes Indiz dafür, wie unterschiedlich die Wirkung einzelner Sounds vom Kontext der zu bewertenden Soundauswahl abhängt. Die vorherige Studie zielte primär darauf ab, effektive bedrohliche Sounds zu identifizieren und hatte dadurch deutlich mehr negative als positive Sounds in der zu bewertenden Soundauswahl. Die könnte zu einer Verschiebung von *Sound 2* in Richtung positiverer Emotionen geführt haben. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Die Untersuchung des Effekts der verschiedenen emotionalisierenden Sounds auf die wahrgenommenen Sicherheitsabstände in den Videos ergab gemischte Ergebnisse. *Hypothese 1.1*, die besagt, dass Sounds einen Effekt auf die Schätzung der dargestellten Sicherheitsabstände haben, wurde basierend auf den statistischen Ergebnissen akzeptiert. Es gab einen signifikanten Unterschied in den geschätzten Sicherheitsabständen zwischen dem positiven Sound (höhere Schätzungen) und den negativen Sounds (niedrigere Schätzungen). (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Hypothese 1.2, die besagt, dass emotionalisierende Sounds die gewünschte Erhöhung des dargestellten Sicherheitsabstands beeinflussen, wurde teilweise abgelehnt. Es gab einen signifikanten Unterschied in der gewünschten Änderung des Sicherheitsabstands zwischen dem positiven *Sound 1* und zwei der negativen Sounds (*Sounds 3* und *4*), jedoch nicht für den negativen *Sound 5*. Betrachtet man den generellen Unterschied der Mittelwerte der gewünschten Änderung für den positiven Sound und allen negativen Sounds, war die gewünschte Änderung (in Metern) unter Einfluss der negativen Sounds höher im Vergleich zum positiven Sound, was auf einen potenziellen stärkeren Änderungswunsch bei bedrohlichen Sounds hinweist. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Hypothese 1.3, die besagt, dass die Sounds einen Effekt auf die Bewertung der Angemessenheit des dargestellten Sicherheitsabstands (*zu gering/angemessen*) haben, wurde teilweise abgelehnt. Im Fall von zwei der negativen Sounds (*Sounds 3* und *4*) gab es im Vergleich zum positiven *Sound 1* signifikant höhere Chancen (zwei bis drei Mal so hoch) den Sicherheitsabstand als *zu gering* zu betrachten. *Sound 5* hingegen zeigte eine nicht signifikante Chance von nahe 1, was auf keinen Einfluss auf die Bewertung hinweist. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Obwohl *Sound 5* hinsichtlich der Emotionen sehr ähnlich zu *Sound 3* und *4* bewertet wurde, hatte er einen viel geringeren Einfluss auf die gewünschte Änderung und die Bewertung der Angemessenheit der dargestellten Sicherheitsabstände. Eine Erklärung könnte sein, dass dies am hohen Niveau an Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke des Sounds bei etwa 2 Hz liegt. Hierdurch hat der Sound potenziell ähnliche Klangcharakteristiken wie etwa aggressivere Techno- oder vergleichbare elektronische Musik, wodurch ein gegenläufiger Effekt – ähnlich des gefundenen Einflusses der Musiktempi auf das Fahrverhalten im Simulator von Brodsky – aufgetreten sein könnte (Brodsky, 2001): Ein höheres Tempo in der Musik führte zu gesteigerten Geschwindigkeiten und einer Erhöhung der Häufigkeit von Verkehrsverstößen. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

Einschränkungen

Im Allgemeinen haben Individuen sehr unterschiedliche Vorstellungen davon, wie groß ein Sicherheitsabstand sein muss, um als angemessen bewertet zu werden. Zusätzlich unterscheidet sich die Wahrnehmung von Sicherheitsabständen in Videos im Gegensatz zum realen Fahren drastisch, was eine je nach Individuum unterschiedliche Befähigung zur (Ein-) Schätzung von Sicherheitsabständen weiter erschwert. Letzterem sollte jedoch durch die relative Analyse der Ergebnisse innerhalb von Probanden weniger Einfluss haben. Idealerweise wären die dargestellten Sicherheitsabstände nahe dem jeweiligen individuellen Kippunkt bzgl. einer Angemessenheit für jeden einzelnen Teilnehmenden, um eine emotionsbasierte Verschiebung in der Bewertung, ob ein Sicherheitsabstand angemessen ist oder nicht, zu ermöglichen. Dies würde allerdings einen enormen Aufwand hinsichtlich des experimentellen Setups implizieren, der im Rahmen dieser Arbeit nicht tragbar gewesen wäre. (Petersen, Yüksel & Albers, 2024)

7.4 Folgerungen und Beantwortung der Forschungsfrage

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem entwickelten Soundgenerator auditive Stimuli erzeugt werden können, die gezielte Emotionen wie Bedrohungsgefühle oder Unbeschwertheit hervorrufen. Sie zeigen ferner, dass die Richtung der Effekte der verschiedenen emotionalisierenden Sounds auf die Aussagen der Teilnehmenden bezüglich ihrer Wahrnehmung der Sicherheitsabstände mit der Stimulus-Richtung übereinstimmt. Dies ist insofern bemerkenswert, dass keine reale Gefahr für die Teilnehmende bestand und sie die Videos nur auf einem kleinen Bildschirm sahen. Bei der Schätzung des Sicherheitsabstands waren die Effekte zwischen den positiven und den bedrohlichen Sounds statistisch signifikant. Hinsichtlich des Effekts der Sounds auf die Bewertung des Sicherheitsabstands sowie die

gewünschte Änderung des Sicherheitsabstands waren die Effekte in zwei von drei Paaren zwischen den positiven und den bedrohlichen Sounds statistisch signifikant.

Unterfrage 1.2 lautete: „*Wie wirken sich beruhigende positive Sounds und bedrohliche negative Sounds auf die Wahrnehmung von Sicherheitsabständen aus?*“ Auch wenn nicht alle Vergleiche zwischen positivem/negativem Sound bzgl. der Wahrnehmung signifikant waren, so indizieren die Ergebnisse dennoch, dass beruhigende Geräusche scheinbar einen Einfluss auf die Wahrnehmung des Sicherheitsabstands haben und diesen potenziell größer und angemessener erscheinen lassen, was zu einem geringeren Änderungswunsch führt. Für bedrohliche Sounds zeigte sich ein umgekehrter Effekt.

Mit diesen Erkenntnissen und den technischen Mitteln, die verwendeten Sounds in Echtzeit basierend auf einer Vielzahl von Fahrzeugparametern erzeugen zu können (Soundgenerator), wird im nächsten Schritt eine Fahrimulator-Studie durchgeführt. Diese bietet die Möglichkeit, die Effekte der emotionalisierenden Sounds auf das Fahrverhalten in realistischen Fahrscenarien unter weitaus immersiveren und realistischeren Bedingungen zu untersuchen.

8 **Auswirkung eines emotionalisierenden Sound Designs auf die Wahl des Sicherheitsabstandes**

Das vorhergehende Kapitel beschäftigte sich mit der Studie, in der Teilnehmende Videoszenarien von Auffahrsituationen ausgesetzt waren, die jeweils zufällig mit fünf unterschiedlichen Sounds kombiniert wurden, die entweder positive Emotionen wie Unbeschwertheit oder negative Emotionen wie ein Bedrohungsgefühl hervorrufen sollten. Die Ergebnisse zeigten einen signifikanten Anstieg der geschätzten Sicherheitsabstände in Videos, die mit positiven Emotionen hervorrufenden Sounds kombiniert wurden im Vergleich zu Sounds, die negative Emotionen hervorrufen. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass zwei der drei negativen Sounds die Wahrscheinlichkeit, dass die Teilnehmende die Sicherheitsabstände als zu gering bewerteten, im Vergleich zum positivsten Sound um das Zwei- bis Dreifache erhöhten. Darüber hinaus erhöhten zwei von drei der bedrohlichen Sounds die Wahrscheinlichkeit, dass Versuchspersonen den Sicherheitsabstands in den präsentierten Szenarien vergrößern wollten (Petersen, Yüksel & Albers, 2024). Diese Ergebnisse unterstreichen den Einfluss eines ESDs auf die Bewertung der Sicherheitsabstände durch Fahrende und heben damit ihre potenzielle Rolle in der Verkehrssicherheit sowie die Bedeutung der Berücksichtigung eines ESDs im Automobilkontext hervor.

Im nächsten Schritt soll nun der Effekt der emotionalisierenden Sounds in einem Fahrsimulator untersucht werden, um den Einfluss solcher Sounds auf das tatsächliche Fahrverhalten in Bezug auf den Sicherheitsabstand zu untersuchen. Hiermit soll Unterfrage 1.3 beantwortet werden:

Unterfrage 1.3: Wirkt sich ein sich mit dem Zeitabstand (THW) dynamisch änderndes emotionalisierendes Sound Design bestehend aus beruhigendem positivem Basis-Sound und bedrohlichem negativem Sound positiv auf den gewählten Sicherheitsabstand während des Fahrens aus?

Für die Beantwortung der Frage wird ein dynamisches ESD auf Basis der effektiven positiven und negativen Sounds der vorherigen videobasierten Studie (Kapitel 7) verwendet. Der bereits in Kapitel 2.2 beschriebene Zeitabstand (THW) ist geeignet, da er bereits eine Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit mit sich bringt. Um einen Effekt auf die Verbesserung der Verkehrssicherheit zu erzielen, sollte das

ESD bei niedrigeren THW-Bereichen einen Einfluss haben, um den Sicherheitsabstand in sicherheitsrelevanten Bereichen zu verbessern. Um den Effekt auf den THW zu quantifizieren, wird die Dauer des Fahrens in unterschiedlichen THW-Bereichen sowie der gefahrenen mittlere THW in unterschiedlichen THW-Bereichen betrachtet. Basierend auf den empfohlenen sicheren THW-Werten des deutschen Kraftfahrt-Bundesamtes (Kraftfahrt-Bundesamt, 2023) und deren Relevanz für eine in Deutschland durchgeführte Fahrstudie, wurden die folgenden Hypothesen formuliert:

Hypothese 2.1: Die Aufenthaltsdauer in THW-Bereichen $< 1,8$ s während des Fahrens wird verringert, wenn die Fahrenden einem negativen emotionalisierenden akustischen Stimulus ausgesetzt ist, der durch den THW gesteuert wird, im Vergleich zum Fahren ohne diesen Stimulus.

Hypothese 2.2: Der gefahrene durchschnittliche THW wird in THW-Bereichen $< 1,8$ s erhöht, wenn die Fahrenden einem negativen emotionalisierenden akustischen Stimulus ausgesetzt ist, der durch den THW gesteuert wird, im Vergleich zum Fahren ohne diesen negativen Stimulus.

Für die Überprüfung dieser Hypothesen wird eine Fahrstudie durchgeführt, in der die Versuchspersonen zwei realitätsnahe Fahrten in einem Autobahnsetting absolvieren. Dabei erfolgen die Fahrten in randomisierter Reihenfolge einmal mit und einmal ohne Stimulus. Fahren ohne Stimulus bedeutet hier, dass nur mit dem angenehmen beruhigenden aktiven Sound Design gefahren wird, ohne dass dieses sich auf Basis des Sicherheitsabstands ändert. Das Fahren mit Stimulus ist demgegenüber die Fahrt mit dem dynamischen ESD, dass sich auf Basis des aktuellen THW in ein bedrohliches Sound Design ändert. Dieser Versuchsaufbau ermöglicht einerseits eine Prüfung der Hypothesen in einem Kontrollgruppensetup, indem nur die erste von zwei Fahrten der Teilnehmenden betrachtet wird, bei der die Teilnehmende zufällig mit oder ohne den emotionalisierenden Stimulus fahren. In einer zweiten Analyse werden andererseits beide Fahrten jeder Versuchsperson verglichen, um Unterschiede im Fahrverhalten innerhalb der Teilnehmenden beim Fahren mit und ohne Stimulus zu untersuchen.

Die in diesem Kapitel vorgestellte Studie wurde bereits in einer wissenschaftlichen Publikation beschrieben: Petersen, M.; Deml, B.; Albers, A. The Effect of an Emotionalizing Sound Design on the Driver's Choice of Headway in a Driving Simulator. *Acoustics* **2024**, 6, 541–567, doi:10.3390/acoustics6020029. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Die technische Lösung für die Kommunikation zwischen Fahrsimulator und Soundgenerator wurde unter anderem innerhalb einer internen, durch den Autor co-betreuten Master-Arbeit implementiert. Abschlussarbeit:

Gudisi Ramesh, K. Integration of a Soundgenerator into a Driving Simulator and Setup of a Validation Environment for Suggestive Sound Designs. Unveröffentlichte Masterarbeit; Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2023. (Gudisi Ramesh, 2023)

und dediziert Veröffentlicht in

Petersen, M., Düser, T. & Albers, A. (2023). Implementation of a Validation Environment for an Emotionalizing Sound Design in a Driving Simulator. *Symposium Driving Simulation*, 9. <https://doi.org/10.5445/IR/1000170068> (Petersen, Düser & Albers, 2023)

8.1 Materialien und Methoden

8.1.1 Fahrsimulator

Die Versuchsumgebung für die Fahrversuche ist ein statischer Fahrsimulator, der vom Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (ifab) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelt wurde. Dieser Simulator verwendet die proprietäre SILAB-Simulationssoftware des WIVW - Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften (2024) und ist einem Fahrzeug der Kompaktklasse mit Automatikgetriebe nachempfunden. Der Simulator verfügt über ein Tachometerdisplay, ein zentrales Konsolendisplay und simulierte Spiegel mit digitalen Anzeigen. Das primäre visuelle Setup besteht aus einem monokularen gekrümmten Bildschirm und drei Projektoren, die ein 180-Grad-Sichtfeld bieten. Die Simulationsszenarien werden mit der SILAB 7.0®-Software erstellt, die die Steuerung und Simulation der Fahrzeugdynamik, computerkontrollierter Verkehrs-Teilnehmender, Interaktionen mit anderen Verkehrs-Teilnehmenden und Umweltfaktoren ermöglicht und fahrzeugbezogene Sounds realistisch und flexibel ausgeben kann. Darüber hinaus ermöglicht die Software eine umfassende Überwachung verschiedener Parameter während der Simulationsfahrten, einschließlich der Aufzeichnung von Fahrzeug- und Verkehrsdaten. Zudem unterstützt die Software die Integration externer Hardware- oder Softwarekomponenten, wie dem in dieser Studie verwendeten Soundgenerator, durch dedizierte Software-Schnittstellen. Eine Abbildung des Fahrsimulators ist in Abbildung 8.1 zu sehen. (Petersen, Deml & Albers, 2024)



Abbildung 8.1: Fahrsimulator-Setup am Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (ifab) am KIT (Petersen, Deml & Albers, 2024)

8.1.2 Integration des Soundgenerators in den Fahrsimulator

Der erste Schritt der Implementierung der Validierungsumgebung besteht darin, eine Schnittstelle zwischen dem Soundgenerator und dem Fahrsimulator herzustellen, die die notwendigen Echtzeitdaten vom Fahrzeug und der virtuellen Umgebung an den Soundgenerator übertragen kann. Die technische Umsetzung dieser Schnittstelle wurde im Rahmen einer Abschlussarbeit implementiert (Gudisi Ramesh, 2023). Für die Erstellung des allgemeinen Sound Designs sind hauptsächlich zwei Parameter erforderlich: die Motordrehzahl und das Motordrehmoment. Die Drehzahl wird verwendet, um die Frequenzhöhe des Sound Designs entsprechend der aktuellen Drehzahl zu ändern. Das Drehmoment wird genutzt, um ein besseres Feedback für das aktuelle Leistungsniveau des Fahrzeugs zu geben. Das im Fahrsimulator verfügbare Fahrzeugmodell ähnelt einem sechsgängigen Automatikfahrzeug mit Verbrennungsmotor. Das Schalten der Gänge führt dazu, dass die Drehzahl nicht stetig mit steigender Geschwindigkeit wie bei Elektrofahrzeugen üblich ansteigt, sondern nur bis zum Schaltvorgang in einen neuen Gang. Dieses untypische Schalten könnte im Zusammenhang mit den künstlichen Fahrzeugsounds zu einer Abschwächung der Immersion und damit der externen Validität innerhalb der Versuchsumgebung führen. Um dieses Problem zu umgehen, wurde die Geschwindigkeit des Fahrzeugs als Grundlage für die Tonhöhe ausgewählt, um eine approximierte kontinuierliche Drehzahl eines Elektrofahrzeugs zu berechnen, die für das Sound Design verwendet werden kann. Ein weiteres Problem ist, dass der Simulator das Motordrehmoment nicht als zugänglichen und

verarbeitbaren Parameter zur Verfügung stellt. Um dennoch ein Feedback über das aktuelle Leistungsniveau zu bieten, wird der Wert für die aktuelle Längsbeschleunigung des Fahrzeugs als Ersatz für das Drehmoment verwendet. Obwohl die Beschleunigung nicht vollständig das Motordrehmoment repräsentiert, da sie der simulierten Trägheitskraft des Fahrzeugs unterliegt, klang das Leistungsverhalten am Ende für die bewertenden Expert*innen, die sich aus NVH- und Akustikexpert*innen der Mitarbeitenden des Instituts zusammensetzen, überzeugend und ausreichend realistisch. Für die Steuerung des emotionalisierenden Stimulus in Abhängigkeit des Sicherheitsabstands musste der Längsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug auf derselben Fahrspur übertragen werden. Darüber hinaus sollte der Stimulus ausgeblendet werden, wenn das vorausfahrende Fahrzeug auf eine andere Fahrspur wechselt. Die Simulationsumgebung lieferte nicht den aktuellen seitlichen Abstand des vorausfahrenden Fahrzeugs zur Fahrbahnmitte, um einen direkten Parameter zur Reduzierung des Stimulus in diesem Fall zur Verfügung zu stellen. Um eine Lösung zu schaffen und keinen emotionalisierenden Sound zu haben, wenn das vorausfahrende Fahrzeug bereits auf der anderen Spur ist, mussten der seitliche Abstand des Ego-Fahrzeugs zur Fahrbahnmitte sowie der seitliche Abstand zwischen dem vorausfahrenden Fahrzeug und dem Ego-Fahrzeug verwendet werden. Diese beiden Werte werden summiert, um den fehlenden Wert abzuleiten. Der Soundgenerator blendet dann den Stimulus aus, basierend darauf, wie weit das Fahrzeug bereits auf der anderen Spur ist. Im Umkehrschluss funktioniert dieser Wert auch, um den emotionalisierenden Stimulus auszublenden, wenn das Ego-Fahrzeug selbst die Spur wechselt. Die endgültige Liste der Parameterdaten aus dem Simulator für den Soundgenerator und deren jeweilige Verwendung ist in Tabelle 8.1 dargestellt. (Gudisi Ramesh, 2023; Petersen, Düser & Albers, 2023)

Tabelle 8.1: Ausgangssignale des Fahrsimulators und ihre jeweilige Verwendung für das Sound Design (Petersen, Düser & Albers, 2023)

Parameter	Verwendung
Geschwindigkeit in km/h	Approximation einer Drehzahl → Änderung der Tonhöhe
Longitudinale Beschleunigung	Approximation des Motordrehmoments → Rückmeldung über das Leistungsniveau
Longitudinaler Sicherheitsabstand	Steuerung des emotionalisierenden Stimulus
Lateraler Abstand des Ego-Fahrzeug von der Mitte der aktuellen Fahrspur + Lateraler Abstand des vorausfahrenden Fahrzeugs zum Ego-Fahrzeug	Steuerung des emotionalisierenden Stimulus beim Spurwechsel durch das Ego-Fahrzeug oder das vorausfahrende Fahrzeug.

Nachdem die notwendigen Parameter definiert wurden, erfolgt im nächsten Schritt, die Übertragung dieser Daten an den Soundgenerator. Da der Soundgenerator viel Rechenressourcen erfordert, wurde entschieden, dass er nicht intern auf den Simulator-Recheneinheiten laufen sollte, um ein fehlerhaftes Fahrerlebnis zu vermeiden. Für die Kommunikation mit dem Soundgenerator wird das Open Sound Control-Kommunikationsprotokoll (OSC) genutzt, das wiederum die UDP-Netzwerkschnittstelle (User Datagram Protocol) nutzt. Somit kann eine Hardwareverbindung zwischen der Simulator-Infrastruktur und dem Soundgenerator-Computer über eine Ethernet-Kabelverbindung zwischen den beiden Systemen realisiert werden. Die Fahrsimulator-Software ist nicht nativ in der Lage, die für die Kommunikation mit dem Soundgenerator erforderlichen OSC-Nachrichten zu erstellen. Sie bietet jedoch die Integration und Interpretation interner DPU oder externer Softwaremodule (bspw. PPU). Für die Übersetzung der Echtzeit-Fahrzeug- und Umweltdaten wurde in der Programmiersprache Python eine Software-Schnittstelle realisiert (Petersen, Düser & Albers, 2023). Python wurde aus zwei Gründen gewählt: Es ist ausreichend schnell, um die Daten mit 60 Hz zu verarbeiten und an den Soundgenerator zu übertragen. Darüber hinaus sind für die Interaktion zwischen externen Steuersignalen und Soundgeneratoren und Instrumenten bereits Bibliotheken oder Repositories für die Erstellung und den

Versand von OSC-Nachrichten über UDP auf Plattformen wie GitHub verfügbar. Für die Validierungsumgebung wurde python-osc Version 1.8.3 (PyPI, 2024) verwendet. Im letzten Schritt wird das python-osc-Programm um die Initialisierung der SILAB-Python-Schnittstellen für den Simulator-internen SILAB-Python-Interpreter, die Zuweisung der eingehenden Fahrzeugvariablen sowie die Benennung und Spezifikation der zu sendenden OSC-Nachrichten pro Fahrzeug-Variable erweitert.

Nach der Einbindung des vollständigen Sound Designs in die Simulationsumgebung wurden erste Testfahrten des Konsortium aus den fünf wissenschaftlichen Mitarbeitenden der Abteilung Fahrzeugakustik des Instituts im Simulator durchgeführt. Zu Beginn herrschte Konsens darüber, dass selbst mit dem originalen Simulator-internen Sound für das Verbrennungsmotor-basierte Fahrzeugmodell die Wahrnehmung der Geschwindigkeit im Simulator nicht sehr gut mit einem realen Fahren übereinstimmte. In Übereinstimmung mit Denjean et al. (2021) wurde der Tonhöhenänderungsfaktor für den aktiven Sound optimiert, um dieses Gefühl zu verbessern. Nach einem iterativen Prozess wurde das am besten passende Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit in km/h und der Tonhöhenänderung gefunden. Das Verhältnis basiert auf einer dynamischen Änderung eines abstrakten Übersetzungsverhältnisses, das einem stufenlosen Getriebe (CVT) ähnelt, was zu einer Verdoppelung der Frequenz der Tonhöhe (Anstieg um eine Oktave) des aktiven Sound Designs bei jeder Geschwindigkeitssteigerung um 55 km/h entspricht. Gemäß der Einschätzung der hinzugezogenen NVH- und Akustikexpert*innen optimierte diese Änderung die Wahrnehmung der Geschwindigkeitsänderung im Simulator in einem akzeptablen Maße. Um die Wahrnehmung weiter zu verbessern, wären grundlegende Änderungen am gesamten Fahrmodell des Simulators erforderlich gewesen. Der Aufwand, dies weiter zu optimieren, stand in keinem Verhältnis zu den Vorteilen, da es bereits als ausreichend wahrgenommen wurde, um ähnlich intuitiv fahren zu können wie in einem realen Fahrzeug. (Petersen, Düser & Albers, 2023)

8.1.3 Fahrszenarien

Die Fahraufgaben, welche alle Versuchspersonen durchführten, bestanden aus zwei Einführungsfahrten und zwei Fahraufgaben zur Bewertung der Wirksamkeit des ESDs auf den gewählten Sicherheitsabstand. Die erste Einführungsaufgabe dauerte etwa 6 Minuten und bestand aus Beschleunigungs- und Brems-Sub-Szenarien, um sich an die Längsdynamik und das Verhalten des Fahrzeugmodells und des Fahrmodells zu gewöhnen. Sie enthielt zudem Slalom-Sub-Szenarien, um sich an die Querdynamik zu gewöhnen. Die zweite Einführungsfahrt bestand darin, eine Straße durch ein ländliches Gebiet für etwa 8 Minuten zu folgen. Sie enthielt engere und weitere Kurven, die eine Anpassung der aktuellen

Geschwindigkeit erforderlich machten. Die zweite Einführungsfahrt wurde genutzt, um das Fahrgefühl im Fahrsimulator zu verbessern und ein Niveau zu erreichen, bei dem die Teilnehmenden angaben, so fahren zu können, wie sie es im realen Leben tun würden. Darüber hinaus waren diese Einführungsaufgaben notwendig, um die Versuchspersonen an das anfangs oft ungewohnte Gefühl des Fahrens in einem statischen Full-Screen-Fahrsimulator zu gewöhnen und die Teilnehmenden zu identifizieren, die durch Simulatorkrankheit, vergleichbar mit Reisekrankheit, leiden.

Die Fahrscenarien zur Untersuchung der Wirksamkeit des ESDs auf den gewählten Abstand bestehen aus einer realistisch aussehenden Autobahnfahrt mit zwei Fahrspuren. Für die Erstellung wurde ein Demoszenario des SILAB-Fahrsimulators als Grundlage verwendet, das mit verschiedenen Sub-Szenarien bestehend aus unterschiedlichen Verkehrssituationen angereichert wurde. Das Fahrscenario war etwa 11 km lang. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den zwei Fahrversuchen zu gewährleisten – einer mit und einer ohne den emotionalisierenden Stimulus – und gleichzeitig das Risiko einer sofortigen Wiedererkennung des Fahrscenarios zu reduzieren, wurden subtile Änderungen am ansonsten identischen Layout zwischen den zwei Szenarien vorgenommen: Die erste Kurve nach dem Start an einer Autobahnparkbucht wurde entweder in eine Links- oder Rechtskurve geändert. Zusätzlich wurden die parkenden Fahrzeuge in der Parkbucht variiert. Die Fahrzeugszenarien sind keine virtuellen Nachbildungen bestehender Straßeninfrastrukturen in Deutschland, sondern eher inspiriert vom allgemeinen Aussehen deutscher Autobahnen. Die Szenarien wurden so gestaltet, dass die Teilnehmenden beim Fahren mit einer angemessenen Geschwindigkeit mit vorausfahrenden Fahrzeugen innerhalb eines individuell gewählten Sicherheitsabstands interagieren mussten, da ein freies Überholen innerhalb der Verkehrs-Sub-Szenarien (siehe Abbildung 8.2) nicht möglich war. Fahrzeuge, die die Verkehrs-Sub-Szenarien initiierten, wurden außer Sichtweite der Fahrenden erstellt, aber konsistent positioniert, um einheitliche Fahrerlebnisse auch bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu gewährleisten. Die Sub-Szenarien können in vier verschiedene Gruppen kategorisiert werden: Überholen einer Kolonne während dem Folgen eines vorausfahrenden Fahrzeugs, ein Fahrzeug-Folge-Szenario durch eine Baustelle, Auffahren auf ein Fahrzeug, das auf die linke Fahrspur ausschert und ein Folge-Szenario durch einen kurzzeitig entstehenden und sich schnell auflösenden Stau. Eine Übersicht der Fahraufgaben sowie der Sub-Szenarien sind in Abbildung 8.2 zu sehen. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

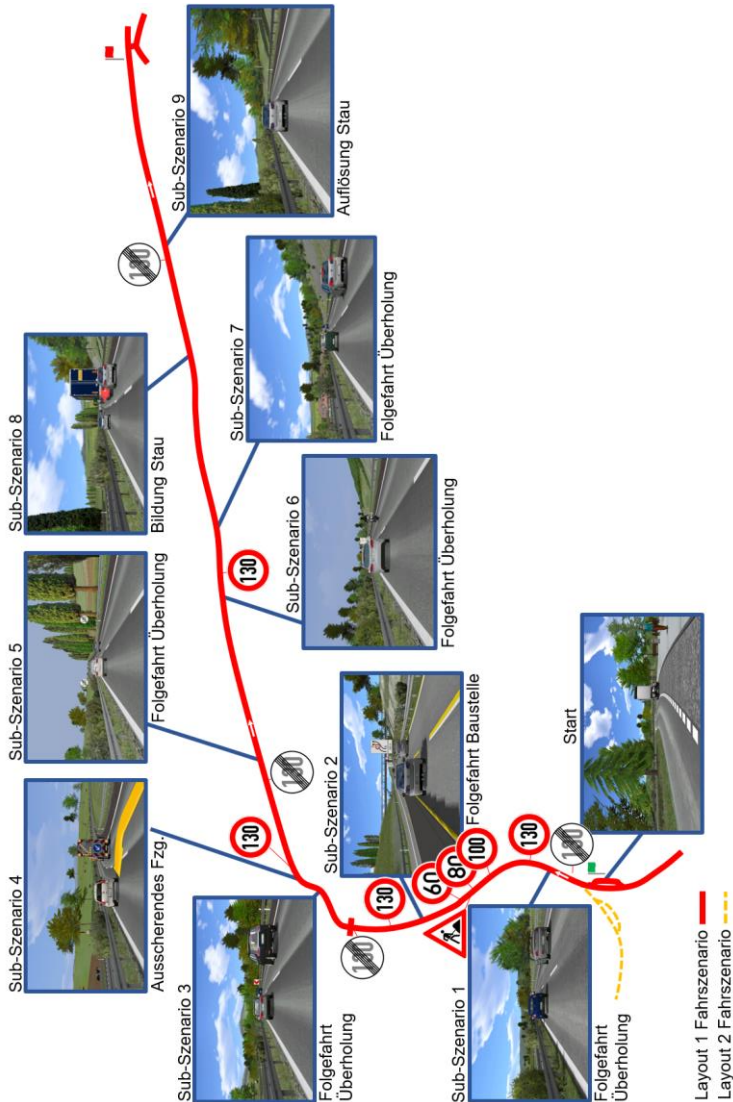


Abbildung 8.2: Layouts 1 und 2 der beiden Fahrscenarien für die Fahraufgaben mit den Verkehrs-Sub-Szenarien und den jeweiligen Geschwindigkeitsbegrenzungen (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Die Überholmanöver in den Fahrzeug-Folge-Szenarien (*Sub-Szenarien 1, 3, 5, 6 und 7*) bestehen aus einem Fahrzeug auf der linken Spur und zwei oder drei Fahrzeugen auf der rechten Spur, die von dem Fahrzeug auf der linken Spur überholt werden. Das Fahrzeug auf der linken Spur fährt 129 km/h in Bereichen mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 130 km/h und 140 km/h in unbegrenzten Bereichen. Das überholende Fahrzeug auf der linken Spur ist etwa 20 % schneller als die Fahrzeuge auf der rechten Spur. Das Folge-Szenario in der Baustelle (*Sub-Szenario 2*) besteht darin, einem Fahrzeug auf der linken Spur für etwa 400 m zu folgen, das 59 km/h fuhr (die Begrenzung war 60 km/h). Das Fahrzeug verzögert gemäßigt von 100 km/h auf die Zielgeschwindigkeit 59 km/h vor der Baustelle und beschleunigt nach der Baustelle auf 100 km/h, bevor es die linke Spur freimacht. Im *Sub-Szenario 4*, in dem ein Fahrzeug ausschert, fährt ein Fahrzeug auf der rechten Spur in einer Kolonne von Fahrzeugen, die sich langsamen Baufahrzeugen (50 km/h) nähern. Das Fahrzeug beschleunigt währenddessen gemäßigt auf 140 km/h. Die Teilnehmenden nähern sich diesem Szenario auf der linken Spur mit etwa 90–100 km/h. Wenn die Teilnehmenden 100 m vom ausschwenkenden Fahrzeug entfernt sind, wechselt das Fahrzeug in etwa 3 Sekunden unter Verwendung des Blinkers von der rechten auf die linke Spur. Die Teilnehmenden müssen bremsen und dem nur langsam beschleunigenden Fahrzeug für 500 m folgen. Die letzten *Sub-Szenarien 8 und 9* beziehen sich auf einen Stau, der nach einer langen Linkskurve auftritt. Wenn die Teilnehmenden sich nähern, verzögern die Fahrzeuge gemäßigt von 54 km/h auf 18 km/h, halten diese Geschwindigkeit für 30 m und beschleunigen dann wieder auf 150 km/h (unbegrenzter Bereich). Die Teilnehmenden müssen wegen der verzögernden Fahrzeuge bremsen und ihnen dann folgen, bis die Fahrzeuge auf der linken Spur nach der Beschleunigung auf 150 km/h auf die rechte Spur wechseln. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

8.1.4 Auditorischer Stimulus

Für das Sound Design wurde erneut der am Institut entwickelte Soundgenerator, erstellt in Native Instruments Reaktor 6 (Reaktor 6, Version 6.5.0, Native Instruments GmbH, Berlin, Deutschland), verwendet (Kapitel 6). Die akustischen Stimuli bestehen aus zwei verschiedenen Sound Designs. Für die Fahraufgaben ohne den emotionalisierenden Stimulus wird nur ein positiv klingendes aktives Sound Design verwendet, dass sich bei einem Unterschreiten eines bestimmten THW nicht ändert. Der hierfür verwendete positive Sound, ist der positive *Sound 1* aus der vorherigen Studie (Petersen, Yüksel & Albers, 2024), der auf einem Dur-Akkord basierte und nur aus Sinustönen bestand. Der Sound verändert sich in der Tonhöhe analog zur Motordrehzahl. Basierend auf dem aktuellen Motordrehmoment nimmt der Sound an Lautstärke zu und gewinnt aufgrund einer leichten Verzerrung (Kapitel 2.6.3) an Obertönen. Zusätzlich wird der Sound auf

Basis des Motormoments mit einer minimalen, Rauigkeit verursachenden Amplitudenmodulation angereichert. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Das aktive Sound Design für die Fahraufgabe mit emotionalisierendem Stimulus besteht aus dem zuvor beschriebenen positiven aktiven Sound, der sich zusätzlich kontinuierlich basierend auf dem aktuellen THW verändert. Der Sound bleibt positiv, bis der aktuell gefahrene THW kleiner als 1,8 Sekunden ist. Das Sound Design beginnt dann, sich mit einer sukzessiven Verkleinerung des THW kontinuierlich zu einem negativeren und bedrohlicheren Sound zu ändern. Für die emotionalisierenden bedrohlichen Stimuli werden ebenfalls die Sounds der vorherigen Studie verwendet, die gezeigt haben, dass sie eine emotionalisierende Wirkung haben und bereits mit dem Echtzeit-Soundgenerator erstellt wurden. Die Sounds werden für die kontinuierliche Veränderung des Sound Designs dabei nicht ineinander gemischt oder überblendet, sondern es ändern sich tatsächlich alle Soundparameter (gemäß Kapitel 6) kontinuierlich um die jeweiligen Sounds der vorherigen Studie zu durchlaufen. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

In Abbildung 8.3 ist die kontinuierliche Änderung des Sound Design bei konstanter Motordrehzahl und konstantem Motormoment vom harmonischen Sound links zum vollständig ausgeprägten emotionalisierenden Stimulus rechts dargestellt.

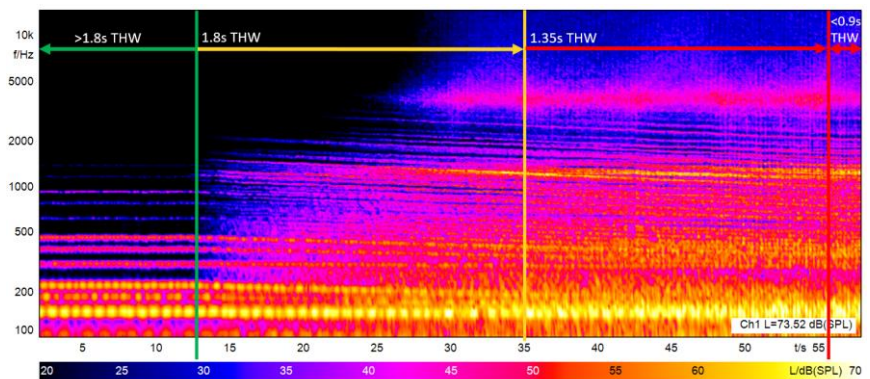


Abbildung 8.3: Spektrogramm des emotionalisierenden Sound Designs. Dargestellt ist der kontinuierliche Übergang vom normalen positiven Sound Design bei THW > 1,8 s zum bedrohlichen Sound Design bei THW < 0,9 s über 60 s. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Von 1,8 s THW bis 1,35 s THW ändert sich das aktive Sound Design kontinuierlich zum ersten neu erstellten Sound (*Sound 4*) der vorherigen Studie. Dieser basierte auf einem verminderten Akkord und enthielt zusätzliche Obertöne aufgrund der

gestapelten Shepard-Partiellen höherfrequenter Komponenten zu jedem Akkordton. Außerdem enthält er ein metallisches Zischen, das durch ein weißes Rauschen erzeugt wird. Dieses Rauschen wird mit einem sehr kurzen Feedback-Zeit-Delay-Effekt (10,2 ms) verarbeitet, dessen Lautstärke mit abnehmendem THW zunimmt (ab ungefähr 1,45 s THW). Für die Änderung von einem Dur- zu einem verminderten Akkord wird nicht der Grundton geändert, sondern nur die große Terz um einen Halbton zu einer kleinen Terz und die Quinte um einen Halbton zu einer Quarte. Dies ist ersichtlich an den Abfallenden horizontalen „Linien“ oberhalb von 150 Hz im Spektrogramm, während der Grundton bei 150 Hz konstant bleibt. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Von 1,35 s THW bis 0,9 s THW ändert sich das aktive Sound Design weiter kontinuierlich zu *Sound 5* der vorherigen Studie. Es ist grundsätzlich derselbe Sound wie der bei 1,35 s, aber der Akkord wird weiter verändert, indem die kleine Terz zu einer kleinen Sekunde (Ganztonschritt) und die Quarte zu einer kleinen Terz (Ganztonschritt) geändert werden, was zu einem sehr disharmonischen Sound führt. Außerdem nehmen die psychoakustische Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke durch eine zunehmende Amplitudenmodulation mit einer Modulationsfrequenz von etwa 2 Hz kontinuierlich zu. Die Hüllkurve der Amplitudenmodulation verändert sich mit der Verringerung des THW kontinuierlich von einer Sinuswellenform zu einer Rechteckwellenform. Die Akkordtöne sowie die Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke werden allmählich bis zur maximalen Einstellung bei 0,9 s THW oder niedriger erhöht. Dies führt bei Erreichen von 0,9 s THW zu einem hämmernden Ton. *Sound 5* wurde verwendet, obwohl er in der vorherigen Studie kaum eine Wirkung auf den Änderungswunsch bzgl. des Sicherheitsabstands oder die Bewertung des Sicherheitsabstands erzielte. Die Gründe hierfür sind, dass er in der vorherigen Studie eine sehr bedrohliche Wirkung zeigte und auf Basis der Erkenntnisse aus Studie 1 eine konsequente Optimierung des *Sounds 3* darstellte. Zusätzlich sollte geprüft werden, ob der Sound möglicherweise nur innerhalb des Versuchssetups von Studie 2 mit potenziell wenig gefährlich wirkenden Videos keine Wirkung erzielte. In Abbildung 8.4 ist zur Visualisierung der kontinuierlichen Änderung der Klangcharakteristik der Kurvenverlauf der psychoakustischen Lautstärke, Schärfe, Schwankungsstärke und Impulshaltigkeit (Hörmodell) für die kontinuierliche Veränderung zwischen 1,8 s THW und 0,9 s THW für beide Stereo-Kanäle dargestellt. Der Fokus lag auf diesen vier psychoakustischen Metriken, da sie die grundlegenden Änderungen in den Klangcharakteristiken darstellen, die auf den Sound angewendet werden. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

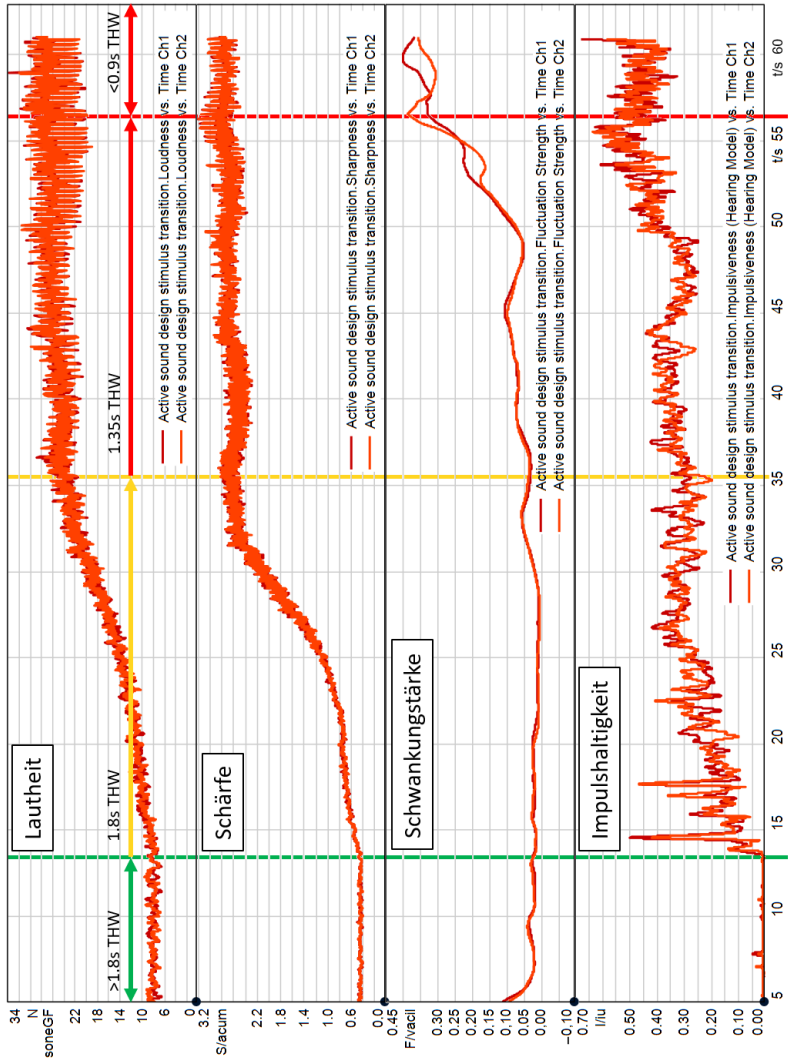


Abbildung 8.4: Stereo Kurvenverlauf der psychoakustischen Lautstärke, Schärfe, Schwankungsstärke und Impulshaltigkeit (Hörmodell) des Sound Design, das sich kontinuierlich vom normalen positiven Sound Design bei THW > 1,8 s zum bedrohlichen Sound Design bei THW < 0,9 s über 60 s verschiebt. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Es ist ersichtlich, dass die Lautstärke des Sounds mit abnehmendem THW ansteigt. Dies resultiert hauptsächlich aus dem zusätzlichen Frequenzinhalt der hinzugefügten Shepard-Partiellen sowie dem zusätzlichen metallischen Zischgeräusch, was auch im Schärfe-Diagramm zu erkennen ist. Außerdem ist im Bereich nach 1,35 s THW eine Zunahme der Schwankung der Lautstärke aufgrund der Zunahme der Amplitudenmodulation zu beobachten. Die Zunahme der Schwankungsstärke sowie der Impulshaltigkeit im Sound ist ebenfalls in den entsprechenden Diagrammen zu sehen. Interessanterweise scheint die eher sinuswellenbasierte Amplitudenmodulation bei etwa 1,2 s THW die Schwankungsstärke im Vergleich zur Pulswellen-Amplitudenmodulation bei 0,9 s THW nicht signifikant zu erhöhen. Auch das Einblenden der zusätzlichen Shepard-Teiltöne verursacht sehr hohe Werte der Impulshaltigkeit, obwohl der Pegel mit abnehmendem THW eher langsam zunimmt. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

8.1.5 Integration des emotionalisierenden Sound Design in die Fahrzeugkabine des Fahrsimulators

Für die Integration des Sound Designs in die Umgebung des Simulators ist es essentiell, dass das Sound Design deutlich hörbar ist und nahtlos in die Geräuschkulisse innerhalb der Fahrzeugkabine integriert wird. Standardmäßig nutzt der SILAB-Simulator die originalen Hi-Fi-Systemlautsprecher des ursprünglichen Fahrzeugs, aus dem die Simulatorkabine besteht, um die vom Simulator generierten Sounds wiederzugeben. Diese beinhalten die interne Synthese eines Verbrennungsmotors (ICE), bestehend aus ICE-Motorgeräuschen sowie der Reproduktion von Roll- und Windgeräuschen, die mit zunehmender Geschwindigkeit lauter werden. Zudem werden Geräusche aus der Umgebung, wie vorbeifahrende PKW und Lastwagen, ebenfalls über diese Lautsprecher wiedergegeben. (Petersen, Düser & Albers, 2023)

Erste Hörproben zeigten, dass der interne Sound des Fahrzeugs im Simulator, wenn er über das Hi-Fi-System zusammen mit anderen Geräuschen abgespielt wurde, nicht den Eindruck vermittelte, tatsächlich aus dem technischen System Fahrzeug zu kommen, sondern eher den Eindruck vermittelte, nur über Lautsprecher in der Nähe des Kopfes des Fahrers abgespielt zu werden. Diese Wahrnehmung verstärkt sich, wenn der interne Verbrennungsmotor-Sound durch das abstraktere und futuristisch klingende aktive ESD ersetzt wird. Um diesem Eindruck entgegen zu wirken, wurde im Rahmen des Aufbaus der Versuchsumgebung ein zusätzlicher Lautsprecher in der Fahrzeugkabine installiert, um die Glaubwürdigkeit des Sound Designs als Teil des Fahrzeugs zu erhöhen. Das Setup besteht aus einem Laptop, der den Soundgenerator ausführt und den Sound über eine USB-Soundkarte (Fireface UC, RME, Haimhausen, Deutschland) an einen kleineren Lautsprecher

(Helsinki, VIFA, Heldensborg, Dänemark) übertrug. Der Lautsprecher hat einen eher neutralen und gleichmäßigen Klang über den gesamten Frequenzbereich und ist besonders detailliert im mittleren Frequenzbereich, der für das Sound Design entscheidend ist. Er liefert auch eine starke Leistung bei sehr niedrigen Frequenzen (um 58 Hz), die im Fahrersitz des Simulators als leichte Vibrationen wahrgenommen wurden und den realistischeren Eindruck weiter verstärken könnten. (Petersen, Düser & Albers, 2023)

Verschiedene Positionen wurden untersucht und subjektiv hinsichtlich ihrer Effektivität zur Steigerung der Immersion bewertet. Die unterschiedlichen Positionen wurden von einem Konsortium aus fünf wissenschaftlichen Mitarbeitenden der Abteilung Fahrzeugakustik des Instituts sowie zwei externen Akustikingenieuren bewertet. Die überzeugendste Position wurde unter dem Fahrersitz identifiziert, wobei der Lautsprecher 7 cm unter dem Sitz nach vorne herausragt, sodass der direkte Transferpfad der Schallwellen zum Ohr des Fahrenden durch den Sitz blockiert ist und stattdessen auf indirekten Wegen durch Reflexionen von der Fahrzeuginnenausstattung auf den Fahrenden trifft. Diese Konfiguration erschwert es im Gegensatz zu den direkten Transferpfaden von den Hi-Fi-Lautsprechern, die Schallquelle zu lokalisieren. Damit wird die Illusion einer multidirektionalen Geräuschquelle im vorderen Bereich des Fahrzeugs erzeugt, welche das akustische Erlebnis in einem realen Fahrzeug nachahmt. Das Setup und Beispiele dieser Schallwege sind in Abbildung 8.5 dargestellt. (Petersen, Düser & Albers, 2023)

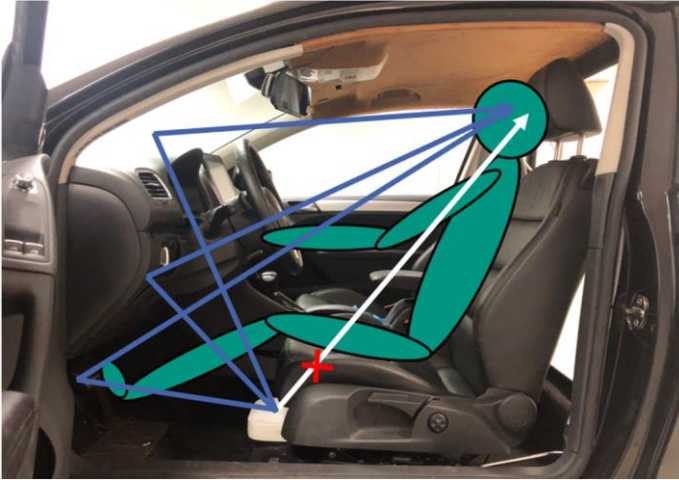


Abbildung 8.5: Dominante Transferpfade des Sound Designs vom Lautsprecher zum Ohr des Fahrers. Der durchgestrichene weiße Pfeil stellt den gedämpften direkten Transferpfad dar. Die blauen Pfeile repräsentieren beispielhafte Übertragungswege für die reflektierten Schallwellen. (Petersen, Düser & Albers, 2023)

Nachdem eine immersive, subjektiv optimierte Position für den Lautsprecher gefunden wurde, besteht der letzte Schritt darin, ein geeignetes Lautstärkeniveau für die Soundwiedergabe festzulegen. Das notwendige Niveau wird durch zwei Hauptfaktoren bestimmt. Der erste ist ein realistisches Wiedergabeniveau im Vergleich zu den Schallpegeln in einem echten Elektro-Fahrzeug von ungefähr 60 dB, wie in Swart, Bekker und Bienert (2016) beschrieben. Außerdem sollte der abgespielte Sound nicht durch andere Geräusche im Fahrsimulator, wie das bereits erwähnte Windgeräusch oder externe Geräusche wie die Simulatorhardware, überdeckt werden. Letzteres könnte besonders problematisch sein, da der Fahrsimulator außer der Windschutzscheibe keine Fenster und keine Schallisolierung im hinteren Teil der Fahrzeugkabine hat, wie in Abbildung 8.6 zu sehen ist. (Petersen, Düser & Albers, 2023)



Abbildung 8.6: Offene Rückseite der Fahrzeugkabine im Fahrsimulator (Petersen, Düser & Albers, 2023)

Um die geeigneten Einstellungen für die Soundwiedergabe zu bestimmen, wurden binaurale Messungen mit einem Kunstkopf (Manakin Mk1 Cortex, dBonic, Eseneler, Istanbul, Türkei) durchgeführt, der die Gegebenheiten einer im Simulator sitzenden Person simuliert. Abbildung 8.7 und Abbildung 8.8 zeigen die Schalldruckpegel in dB aus den Messungen über die finalen Sound-Einstellungen, einmal als Pegel über Zeit und einmal als gemittelttes Spektrum über die Frequenz. Die Messungen des Geräuschpegels mit der laufenden Simulator-Hardware wurden mit deaktiviertem Sound Design durchgeführt. Zusätzlich wurden die endgültigen Lautstärkepegel für das aktivierte Sound Design gemessen, während das Fahrzeug im Leerlauf war, einschließlich des standardmäßig positiven Sounds sowie der bedrohlicheren Versionen mit 25 % (1,58 s THW) und 50 % (1,35 s THW) bedrohlichem Stimulus. Höhere Intensitätsstufen werden nicht dargestellt, da sie nur in der Lautstärke weiter ansteigen. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

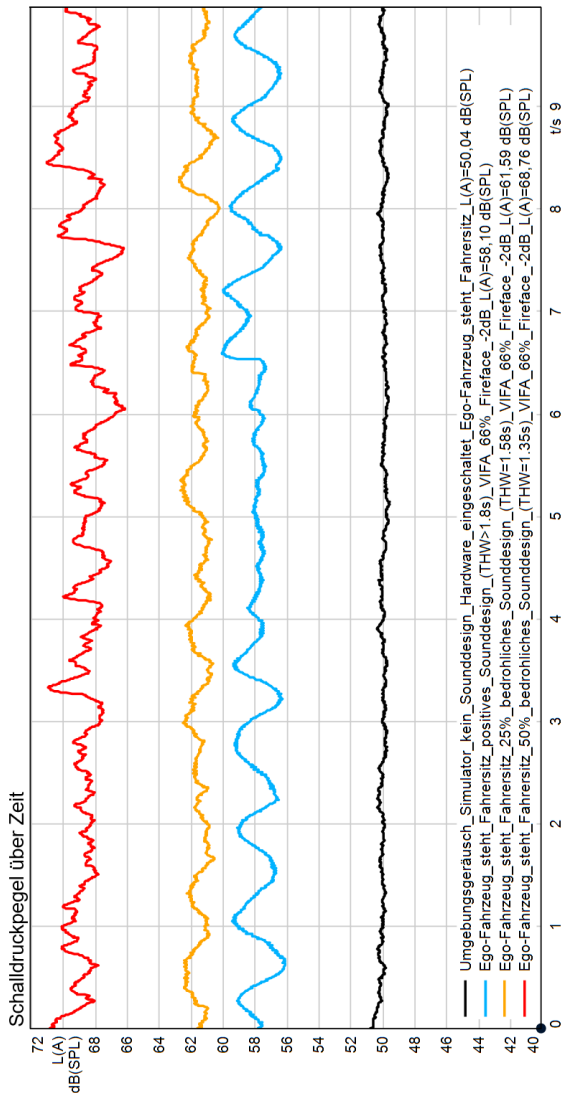


Abbildung 8.7: Schalldruckpegel über Zeit für die Kunstkopfmessung in der Fahrzeugkabine für den Geräuschpegel nur mit laufender Simulator Hardware und mit drei verschiedenen Einstellungen für das aktivierte Sound Design (Petersen, Deml & Albers, 2024)

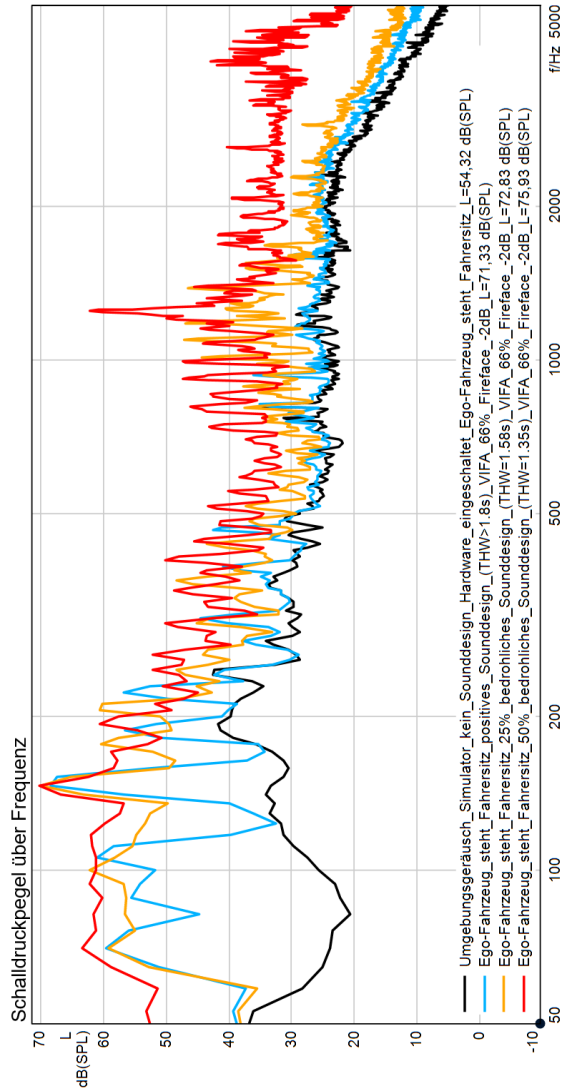


Abbildung 8.8: Schalldruckpegel über Frequenz für die Kunstkopfmessung in der Fahrzeugkabine für den Geräuschpegel nur mit laufender Simulator Hardware und mit drei verschiedenen Einstellungen für das aktivierte Sound Design (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Entsprechend des Ziels liegt Schalldruckpegel innerhalb der Fahrzeugkabine des Simulators bei etwa 58 dB(A), was dem üblichen Pegel des Geräuschpegels in Elektrofahrzeugen entspricht (Swart et al., 2016). Der Geräuschpegel im angeschalteten Simulator liegt etwa 8 dB niedriger, ungefähr bei 50 dB(A), was genügend Spielraum bietet, damit das Sound Design bei etwa 58 dB(A) deutlich hörbar ist. Abbildung 8.8 zeigt, dass die deutlichen Frequenzspitzen des positiven Sound Designs bei 160 Hz, 190 Hz, 215 Hz, 320 Hz, 380 Hz und 415 Hz den Geräuschpegel des Simulators um mindestens 10 dB(A) übersteigen. Die endgültigen Soundeinstellungen am Fireface UC lagen bei -2 dB Verstärkung und 66% Lautstärke am Helsinki-Lautsprecher. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Um zu beurteilen, wie effektiv sich das Sound Design von den simulierten Wind-, Roll- und Verkehrsgeräuschen im Fahrsimulator abhebt, wurde eine zusätzliche Messung durchgeführt. Dies beinhaltete eine Fahrt mit 140 km/h durch einen Szenarien-Abschnitt mit hohem Verkehrsaufkommen. Die Schalldruckpegel über die Zeit für diese Fahrt, ohne Sound Design, mit dem positiven Sound und mit einem 25 % (1,58 s THW) bedrohlichen Stimulus, sind in Abbildung 8.9 dargestellt. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Jenseits der Spitzenwerte erhöhter Pegel beim Überholen anderer Fahrzeuge bleiben die Pegelkurven, wenn das Sound Design aktiv ist, konsistent deutlich über den kombinierten Wind- und Verkehrsgeräuschen aus den Messungen ohne Sound Design. Subjektiv wurde die Mischung aus Windgeräuschen, Verkehrslärm und aktivem Sound Design vom Konsortium als ausreichend realistisch und immersiv wahrgenommen. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

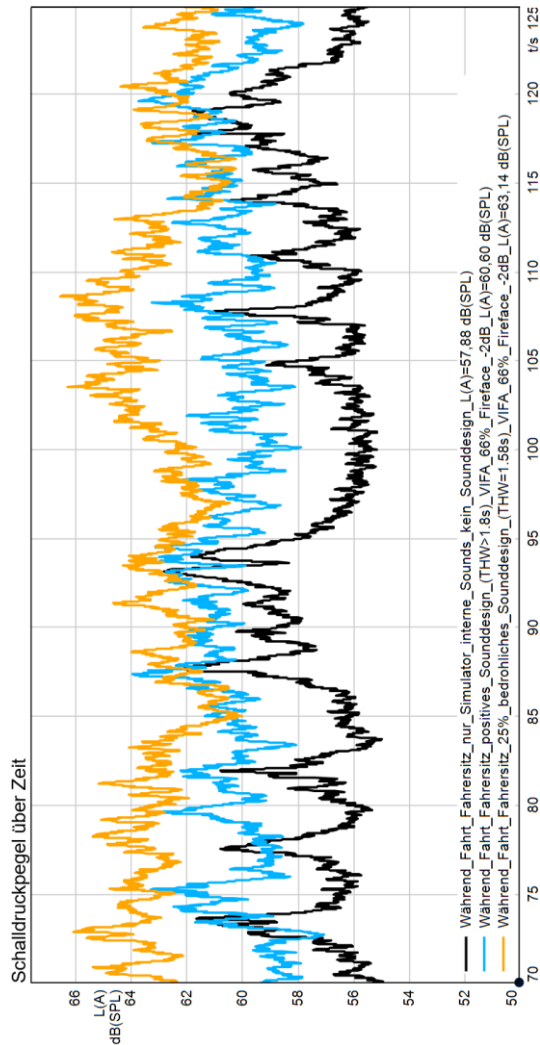


Abbildung 8.9: Schalldruckpegel vs. Zeit für Kunstkopf-Messung innerhalb der Fahrzeugkabine, Fahrt mit 140 km/h durch einen dicht besiedelten Szenarien Abschnitt. Drei verschiedene Einstellungen: kein aktiver Sound, positives und 25 % bedrohliches Sound Design (1.58s THW). (Petersen, Deml & Albers, 2024)

8.1.6 Teilnehmende

Insgesamt nahmen 54 Personen ohne Vorwissen oder besondere Kenntnisse an der Studie teil. Hiervon mussten fünf Personen aufgrund von Simulatorkrankheit ihre Teilnahme abbrechen, was in einem üblichen Rahmen von 10 % für solche Versuche liegt. Weiterhin wurden sechs Personen aus folgenden Gründen aus der Analyse ausgeschlossen: Drei Teilnehmende gaben an, nicht so gefahren zu sein, wie sie es im realen Leben tun würden. Zwei Teilnehmende missverstanden die Anweisungen und verhielten sich aufgrund daraus resultierender Annahmen in einer der Fahrten drastisch anders. Eine Teilnehmende fuhr bei keiner der beiden Fahrten unterhalb eines Sicherheitsabstandes, der den Stimulus aktiviert hätte, was zu keinen verwertbaren Daten führte. Damit verbleiben 43 relevante Teilnehmende für die Auswertung. Die Versuchspersonen waren eher jünger. Insgesamt sind 9 Teilnehmende zwischen 18 und 25 Jahre alt, 15 Personen zwischen 26 und 35, 14 zwischen 36 und 45, eine Person zwischen 46 und 55, 3 Teilnehmende zwischen 56 und 65 und eine Person ist 66 oder älter. Die Stichprobe war überwiegend männlich (weiblich: 11, männlich: 31, divers: 1). Alle Teilnehmenden besaßen seit durchschnittlich 16 Jahren einen Führerschein (Mittelwert = 16,6; Median = 15, Range: (1, 55)). Nur 5 Teilnehmende gaben an, in den letzten 2 Jahren einen Unfall gehabt zu haben. Die meisten Teilnehmenden gaben an, bis zu 6000 km pro Jahr zu fahren (bis zu 6000 km: 19 Teilnehmende; 6001 km–9000 km: 11 Teilnehmende; 9001 km–12.000 km: 5 Teilnehmende; 12.001 km–15.000 km: 5 Teilnehmende; mehr als 15.000 km: 3 Teilnehmende). Die üblichen Fahrumgebungen wurden wie folgt berichtet: in der Stadt (30 Teilnehmende), in ländlichen Gebieten (18 Teilnehmende) und auf der Autobahn (25 Teilnehmende). Mehrfachnennungen waren hier möglich. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

8.1.7 Methoden

Das Experiment bestand aus zwei verschiedenen Aufgabenbereichen: dem Ausfüllen von Fragebögen und dem Durchführen von Fahraufgaben in einem Fahr Simulator (Kapitel 2.7.2). Die Fragebögen wurden einerseits verwendet, um Daten über soziodemografische Merkmale, Fahrerfahrung und Fahrgewohnheiten zu sammeln. Wenn Befragte angaben, eine Veränderung des Fahrzeugsounds bemerkt zu haben, wurden ihnen außerdem offen formulierte Fragen vorgelegt:

- In welcher Situation haben Sie diese Geräuschänderung bemerkt?
- Wie haben Sie sich gefühlt, als sich der Sound änderte?

Der in der Studie verwendete Fragebogen kann in Anhang C eingesehen werden.

Die Fahraufgaben im Fahrsimulator wurden durchgeführt, um die Wirksamkeit des Soundstimulus auf den gewählten Sicherheitsabstand zu bewerten. Ein Fahrsimulator wurde verwendet, da er je nach Aufbau des Fahrsimulators und der untersuchten Effekte oder Verhaltensweisen eine gute relative und teilweise sogar absolute Validität der Ergebnisse bietet (Kaptein, Theeuwes & van der Horst, 1996; Underwood, Crundall & Chapman, 2011; Zhang, Guo & Sun, 2020). Außerdem bieten Fahrsimulatoren eine Wiederholbarkeit und Sicherheit innerhalb potenziell riskanter Fahraufgaben, die in realen Fahrszenarien nicht erreichbar wären. In diesem Experiment war der relevante Faktor, der untersucht werden sollte, der von den Teilnehmenden während der Fahraufgabe gewählte Sicherheitsabstand. Baumberger et al. fanden heraus, dass es eine Abweichung in der Fähigkeit zur Bewertung des Abstands zu anderen Verkehrsteilnehmenden zwischen dem realen Fahren und dem Fahren in ihrem Fahrsimulator gibt (Baumberger, Flückiger, Paquette, Bergeron & Delorme, 2005). Es muss also davon ausgegangen werden, dass die gewählte Simulatorumgebung, die grundlegend einen ähnlichen Aufbau wie in den Studien von Baumberger aufweist, keine absolute externe Validität der Ergebnisse ermöglicht. Für die Untersuchung des Effekts eines ESDs auf den gewählten Sicherheitsabstand ist eine hohe interne Validität allerdings ausreichend, da das Ziel nicht darin besteht, den Effekt eines solchen Sound Designs zu quantifizieren, sondern vielmehr zunächst zu überprüfen, ob es einen signifikanten Unterschied zwischen und innerhalb der Teilnehmenden gibt, die mit und ohne dem emotionalisierenden Stimulus fahren. Das experimentelle Setup wurde so gewählt, dass sowohl ein Kontrollgruppeneffekt experimentell nachgewiesen werden kann, indem nur die erste Fahrt der Teilnehmenden in der Analyse berücksichtigt wird, als auch ein Within-Design-Experiment, wenn beide Fahrten der Teilnehmenden in der Analyse verglichen werden. Die Zuordnung des Szenarios für die Fahraufgabe sowie die Reihenfolge, zuerst mit oder ohne emotionalisierenden Stimulus zu fahren, wurde für alle Teilnehmenden randomisiert. Jedoch fuhren alle Teilnehmenden beide Szenarien sowohl mit als auch ohne den emotionalisierenden Stimulus. In der anfänglichen Einweisung wurde den Teilnehmenden nur mitgeteilt, dass das Experiment das Fahren mit einem Elektrofahrzeug in einer realistischen Fahrsimulatorsituation umfasst. Über das eigentliche Interesse der Studie wurden die Versuchspersonen zunächst nicht aufgeklärt. Sie gaben ihre schriftliche Einwilligung, dass die erhobenen Daten anonym in weiteren Forschungen und Veröffentlichungen verwendet werden. Sie wurden weiter darüber informiert, dass sie das Experiment jederzeit beenden können und wurden über die Möglichkeit der Simulatorkrankheit und deren Symptome aufgeklärt. Danach wurden die instruktiven Fahraufgaben zur Gewöhnung an den Fahrsimulator durchgeführt. Im nächsten Schritt wurden die eigentlichen Fahraufgaben zur Bewertung der Wirksamkeit des ESDs durchgeführt. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Vor jeder Fahraufgabe erhielten die Teilnehmenden die folgende schriftliche Anweisung auf Deutsch:

- Szenario 1/2:
- Aufgabe:
 - Sie sind auf dem Weg nach Knoblach. Sie haben dort einen wichtigen Termin. Sie sind bereits etwas spät dran, können es aber noch rechtzeitig schaffen.
 - Fahren Sie, wie Sie es im realen Leben tun würden.
- Information:
 - Szenario: Autobahnabschnitt 1/2
 - Fahrzeug: Elektrofahrzeug mit Automatikgetriebe und künstlich erzeugtem Fahrzeuginnengeräusch (Active Sound Design)
 - Es können keine plötzlichen Schäden oder technischen Probleme am Fahrzeug während der Fahrt auftreten.

(Petersen, Deml & Albers, 2024)

Der Hinweis auf das „etwas zu spät sein“ wurde gegeben, um eine extrinsische Motivation zu schaffen, nicht sehr langsam zu fahren, sondern die Chancen zu erhöhen, dass die Leute auf der linken Spur bleiben und mit den vorausfahrenden Fahrzeugen interagieren. Knoblach ist ein fiktiver Ort, der in der für die Fahraufgaben verwendeten modifizierten Demo vorhanden war. Er fungierte als Ziel für die 11 km lange Fahraufgabe. Die Information, dass keine plötzlichen Schäden am Fahrzeug auftreten können, wurde hinzugefügt, damit die Versuchspersonen nicht zu der falschen Schlussfolgerung kommen, dass die Geräuschänderungen auf plötzliche Schäden am Fahrzeug zurückzuführen sind.

Nach der ersten Fahrt füllten die Teilnehmenden den Fragebogen zu soziodemografischen Aspekten sowie Fahrerfahrung und Fahrgewohnheiten (wie viele km pro Jahr und wo sie hauptsächlich fahren) aus. Während der Fahraufgaben wurden folgende Parameter mit einer Abtastfrequenz von 133 Hz aufgezeichnet: Geschwindigkeit [km/h], Messzeitpunkt [m:s], Längs-Sicherheitsabstand (Headway) [m], aktuelles Streckensegment, gefahrene Strecke auf dem aktuellen Streckensegment [m] und die aktuelle Fahrspur. Die Simulation misst den Abstand zum nächsten Fahrzeug auf derselben Spur vor dem gefahrenen Fahrzeug, solange es näher als 500 m ist. Es ist daher nicht sinnvoll, die gesamte Fahrt für die Auswertung zu berücksichtigen, da der arithmetische Mittelwert der THW durch die sehr großen Abstände in den Segmenten verzerrt würde, in denen keine Interaktion

mit einem vorausfahrenden Fahrzeug stattfindet. Um den Effekt des ESDs auf die Verkehrssicherheit über die genannten Hypothesen hinaus zu bewerten, wurden die aufgezeichneten Fahrtdaten nach vier verschiedenen THW-Bereichen gefiltert:

- **THW < 4 s:** Dieser Abstandsbereich wird als eher weiter Bereich gewählt. Er ist nah genug, dass das vorausfahrende Fahrzeug deutlich sichtbar ist und Überlegungen zum angestrebten Sicherheitsabstand bei den Teilnehmenden beginnen sollten. Dieser Bereich könnte auch Schlussfolgerungen ermöglichen, ob der emotionalisierende Stimulus eine Art dauerhafte Wirkung über den direkten Effekt während eines aktiven Stimulus (THW < 1,8 s) hinaus hat.
- **THW < 1,8 s:** Bei einem Unterschreiten von 1,8 s beginnt sich das normale positive aktive Sound Design in ein negativ ESD zu verändern. Dieser Wert wurde gewählt, weil 1,8 s THW in Deutschland als sicherer THW empfohlen wird. Dieser THW-Bereich unterscheidet in diesem Experiment grundsätzlich die Fahrten mit und ohne dem emotionalisierenden Stimulus.
- **THW < 1,35 s:** Bei 1,35 s wechselt das ESD zum verminderten Akkord und das metallische Zischen ist auf maximalem Niveau, aber die Amplitudenmodulation, die die Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke verursacht, ist noch nicht vorhanden. Dies ist der Bereich, in dem die Klangänderungen sehr deutlich hörbar sind und eine Wirkung des Sound Designs zeigen sollten, sofern es eine gibt.
- **THW < 0,9 s:** In diesem THW-Bereich ist das ESD auf seinem maximalen Niveau in Bezug auf Disharmonie, Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke. Außerdem wird das Fahren in diesem THW-Bereich in Deutschland als unsicher angesehen und sanktioniert.

(Petersen, Deml & Albers, 2024)

Für die Analyse der Wirksamkeit des ESDs werden die Dauer, die die Teilnehmenden in bestimmten THW-Bereichen fahren, sowie der durchschnittliche THW in zwei Analyseansätzen verglichen. Der erste Ansatz basiert auf dem Kontrollgruppensetup, bei der für die statistische Auswertung nur die erste der insgesamt zwei Fahrten aller Teilnehmenden berücksichtigt wird. In diesem Ansatz werden die Teilnehmenden gruppiert, je nachdem, ob ihre erste Fahrt durch die randomisierte Zuweisung mit oder ohne emotionalisierendem Stimulus durchgeführt wurde. Die Gruppe, die ohne den emotionalisierenden Stimulus fährt, ist die Kontrollgruppe. Die Gruppe, die mit emotionalisierendem Stimulus fährt, ist die Experimentalgruppe. Für die Analyse werden die Fahrdauer in bestimmten THW-Bereichen und der durchschnittliche THW während der Fahrt in den THW-Bereichen zwischen der Kontrollgruppe und der Experimentalgruppe verglichen. Die Dauer gibt Aufschluss darüber, ob das ESD zu einer Verringerung des Sicherheitsabstands zu vorausfahrenden Fahrzeugen führt. Der durchschnittliche THW gibt einen Hinweis

darauf, ob es einen Unterschied im gewählten THW innerhalb der verschiedenen THW-Bereiche gab. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Der zweite Analyseansatz ist ein Vergleich innerhalb der Teilnehmenden, bei dem beide Fahrten (mit und ohne den emotionalisierenden Stimulus) der Teilnehmenden berücksichtigt werden. Ob die zweite Fahrt mit oder ohne den Stimulus durchgeführt wurde, hing, wie oben beschrieben, von der randomisierten Zuweisung in der ersten Fahrt ab. Für diesen Analyseansatz werden ebenfalls die Aufenthaltsdauer in einem THW-Bereich und der durchschnittliche THW in den verschiedenen THW-Bereichen verglichen. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Für die Analyse der Unterschiede im durchschnittlichen THW innerhalb der Teilnehmenden im Within-Design (zweiter Analyseansatz) werden die Daten zusätzlich weiterverarbeitet. Die aufgezeichneten Fahrten werden anhand der in Abbildung 8.2 dargestellten Subszenarien und deren Streckenabschnitte geschnitten und diese Abschnitte wiederum über die beiden Fahrten miteinander verglichen. Dies reduziert das Problem einer möglichen Abweichung der beiden Fahrten innerhalb einer Person aufgrund unterschiedlicher Geschwindigkeiten oder Fahrweisen. Um die Vergleichbarkeit zwischen den beiden Fahrten weiter zu erhöhen, wurden nur die Teile jeder Fahrt verwendet, bei denen die Teilnehmenden in beiden Fahrten auf derselben Fahrspur fuhren. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Die statistische Analyse wurde in R durchgeführt. Verwendet wurden der Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Messungen und der paarweise Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test (Kapitel 2.7.3.3). Auf die Verwendung des Student's *t*-Test wurde verzichtet, da die THW-Daten nicht normalverteilt sind, wie durch den Shapiro-Wilk-Test ($p < 0,05$) gezeigt, und zusätzlich die Stichprobengröße nur geringfügig größer als 30 ist. Daher sollte der *t*-Test nicht verwendet werden (Mishra, Singh, Pandey, Mishra & Pandey, 2019). Für die Analyse des Kontrollgruppensetups wurde der einseitige Wilcoxon-Rangsummentest verwendet, um signifikante gerichtete Unterschiede in den Fahrdauern der Teilnehmenden in den verschiedenen THW-Bereichen ($THW < 4$ s, $THW < 1,8$ s, $THW < 1,35$ s und $THW < 0,9$ s) sowie im durchschnittlichen THW mit und ohne den emotionalisierenden Stimulus in der ersten Fahraufgabe zu finden. Für die statistische Analyse des Within-Participant-Design-Setups wurde der einseitige paarweise Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test (Kapitel 2.7.3.4) für wiederholte Messungen verwendet, um signifikante gerichtete Unterschiede in der Dauer innerhalb der Teilnehmenden, die in den verschiedenen THW-Bereichen fahren ($THW < 4$ s, $THW < 1,8$ s, $THW < 1,35$ s und $THW < 0,9$ s), sowie im durchschnittlichen THW mit und ohne den emotionalisierenden Stimulus über die beiden Fahraufgaben hinweg zu finden. Cohen's vorgeschlagene *r*-Werte von 0,1,

0,3 und 0,5, die kleine, durchschnittliche und große Effektstärken darstellen, wurden verwendet, um die berechnete statistische Effektstärke des Unterschieds in der Fahrdauer in den THW-Bereichen sowie im durchschnittlichen THW zu interpretieren (Fritz, Morris & Richler, 2012). (Petersen, Deml & Albers, 2024)

8.2 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der deskriptiven Statistik und der statistischen Analyse der Auswirkungen des emotionalisierenden Sound Designs auf das Fahrverhalten sowie die Wahrnehmung und emotionale Wirkung des Sound Designs beschrieben. Zuerst werden die Ergebnisse für das Kontrollgruppen-Setup dargestellt und danach die Ergebnisse des Vergleichs innerhalb der Teilnehmenden.

8.2.1 Deskriptive Statistik basierend auf dem Time Headway im Kontrollgruppen-Setup

Für die deskriptive Statistik des Kontrollgruppeneffekts werden zunächst die Dauer in Sekunden verglichen, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen THW-Bereichen ($\text{THW} < 4 \text{ s}$, $\text{THW} < 1,8 \text{ s}$, $\text{THW} < 1,35 \text{ s}$ und $\text{THW} < 0,9 \text{ s}$) mit bzw. ohne Stimulus verbracht haben. Sollte der Stimulus einen Effekt auf die Aufenthaltsdauer in niedrigen THW Bereichen haben, so sollte die Aufenthaltsdauer der Fahrenden mit Stimulus niedriger sein im Vergleich zu den Fahrenden ohne Stimulus. Abbildung 8.10 zeigt die Boxplots für die Fahrdauer im THW über die gesamte erste Fahrt der Teilnehmenden. Die dicke Linie repräsentiert den Median, die gepunktete Linie ist der Mittelwert.

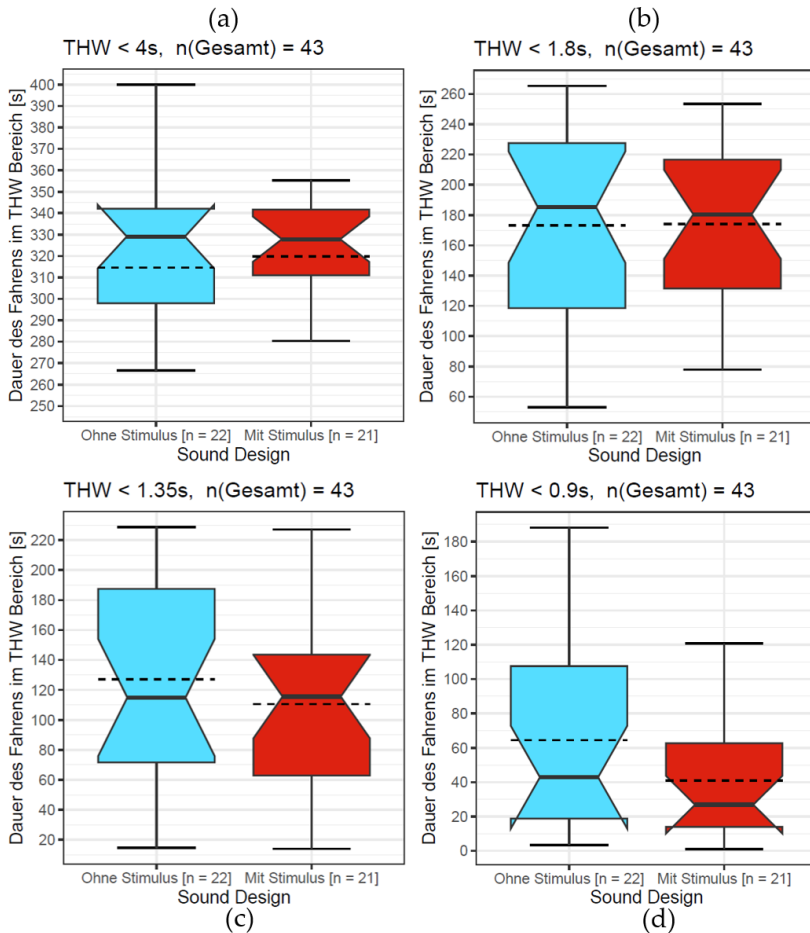


Abbildung 8.10: Boxplots für die Dauer in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen THW-Bereichen (THW < 4 s (a), THW < 1,8 s (b), THW < 1,35 s (c) und THW < 0,9 s (d)) während der ersten Fahrt mit oder ohne Stimulus verbracht haben. Die Boxen repräsentieren das erste (Q1) und dritte Quartil (Q3). Die Whiskers repräsentieren $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ bis $Q3 + 1,5 \cdot IQR$ (Interquartilsabstand). Ausreißer sind separat dargestellt. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Tabelle 8.2 zeigt die arithmetischen Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen für die Fahrdauer in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen THW-Bereichen während der ersten Fahrt mit oder ohne Stimulus verbracht haben.

Tabelle 8.2: Arithmetischer Mittelwert, Median und Standardabweichung der Fahrdauern in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen THW-Bereichen (THW < 4 s, THW < 1,8 s, THW < 1,35 s und THW < 0,9 s) während der ersten Fahrt mit oder ohne Stimulus verbracht haben. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Dauer des Fahrens im THW Bereich (s)		Arithm. Mittelwert	Median	Standard Abweichung	n
THW < 4 s	Ohne Stimulus	314,6	329,1	49,8	22
	Mit Stimulus	319,8	327,9	28,3	21
THW < 1,8 s	Ohne Stimulus	173,2	185,2	68,5	22
	Mit Stimulus	174,0	180,4	51,8	21
THW < 1,35 s	Ohne Stimulus	127,0	115,0	68,9	22
	Mit Stimulus	110,5	115,6	57,4	21
THW < 0,9 s	Ohne Stimulus	64,6	42,9	57,3	22
	Mit Stimulus	40,9	26,9	35,1	21

Für die THW < 4 s und THW < 1,8 s sind der Mittelwert und der Median zwischen den Fahrten mit und ohne Stimulus sehr ähnlich. Basierend auf dem Mittelwert scheint ein Unterschied in den Bereichen unterhalb von 1,35 s THW aufzutreten. Dies ist der Punkt, an dem die Veränderung im Sound und somit der Stimulus deutlich hörbar wird.

Für den zweiten Vergleich zwischen den Teilnehmenden, die bei der ersten Fahrt mit oder ohne Stimulus gefahren sind, wird der durchschnittliche gefahrene THW in den THW-Bereichen (THW < 4 s, THW < 1,8 s, THW < 1,35 s und THW < 0,9 s) verglichen. Sollte der Stimulus einen Effekt auf den durchschnittlich gefahrenen THW in niedrigen THW Bereichen haben, so sollte der mittlere THW der Fahrenden mit Stimulus höher sein im Vergleich zu den Fahrenden ohne Stimulus. Abbildung 8.11 zeigt die Boxplots für die durchschnittlichen THWs über die gesamte erste Fahrt der Teilnehmenden. Die Anzahl der Stichproben für die THW-Bereiche < 1,35 s und < 0,9 s ist reduziert, da einige Teilnehmende diese THW-Werte während der Fahrt nicht unterschritten haben. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

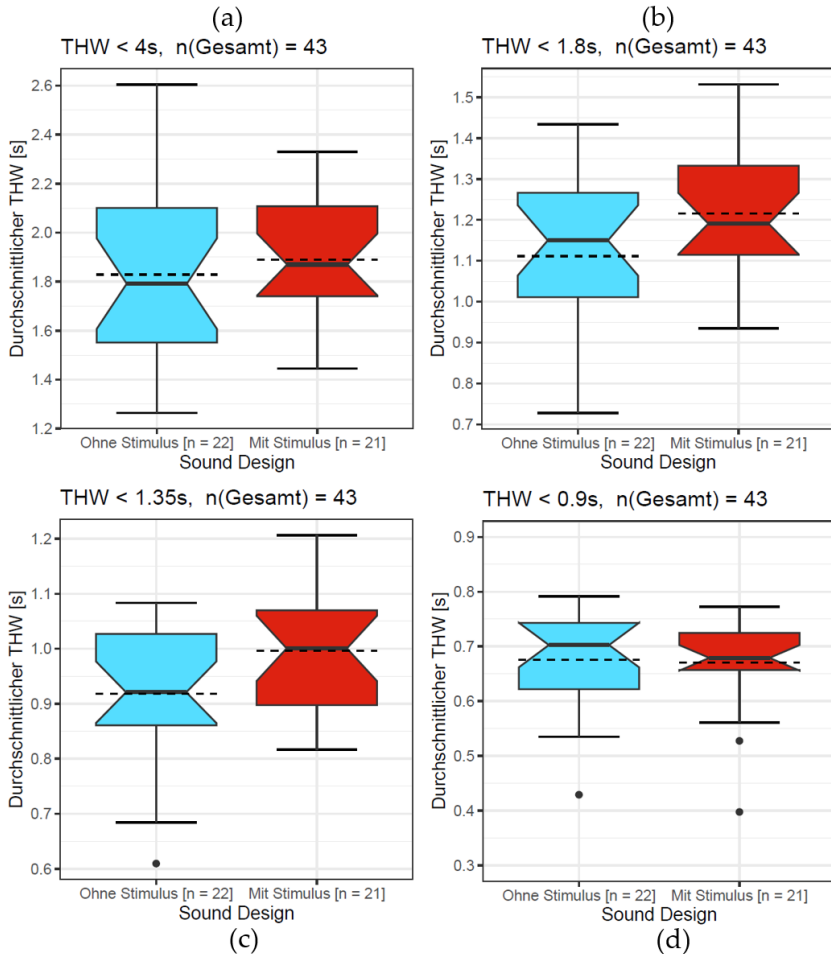


Abbildung 8.11: Boxplots für die durchschnittlichen THW, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen THW-Bereichen (THW < 4 s (a), THW < 1,8 s (b), THW < 1,35 s (c) und THW < 0,9 s (d)) während der ersten Fahrt mit oder ohne Stimulus gefahren sind. Die Boxen repräsentieren das erste (Q1) und dritte Quartil (Q3). Die Whiskers repräsentieren $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ bis $Q3 + 1,5 \cdot IQR$ (Interquartilsabstand). Ausreißer sind separat dargestellt. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Tabelle 8.3 zeigt die arithmetischen Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen über alle mittleren THWs in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen THW-Bereichen während der ersten Fahrt mit oder ohne Stimulus gefahren sind.

Tabelle 8.3: Arithmetischer Mittelwert, Median und Standardabweichung des THW in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen THW-Bereichen (THW < 4 s, THW < 1,8 s, THW < 1,35 s und THW < 0,9 s) während der ersten Fahrt mit oder ohne Stimulus gefahren sind. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Durchschnittlicher THW in THW Bereich (s)		Arithm. Mittelwert	Median	Standard Abweichung	n
THW < 4 s	Ohne Stimulus	1,83	1,79	0,37	22
	Mit Stimulus	1,89	1,87	0,25	21
THW < 1,8 s	Ohne Stimulus	1,11	1,15	0,19	22
	Mit Stimulus	1,22	1,19	0,15	21
THW < 1,35 s	Ohne Stimulus	0,92	0,92	0,13	22
	Mit Stimulus	1,00	1,00	0,11	21
THW < 0,9 s	Ohne Stimulus	0,093	0,74	0,43	22
	Mit Stimulus	0,087	0,72	0,40	21

Für die Bereiche THW < 4 s, THW < 1,8 s und THW < 1,35 s zeigen der Mittelwert und der Median eine Zunahme bei den Fahrten mit Stimulus im Vergleich zu Fahrten ohne Stimulus. Für die THW < 0,9 s sind der Mittelwert und der Median sehr nahe beieinander, was darauf hindeutet, dass entweder der vollständig ausgeprägte Stimulus weniger effektiv war oder dass Personen, die so nah fahren, nicht vom negativen Soundstimulus beeinflusst wurden. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

8.2.2 Statistische Analyse des Effekts des emotionalen Stimulus auf den Time Headway im Kontrollgruppen-Setup

Um zu testen, ob das emotionalisierende Sound Design (Stimulus) einen Effekt auf die Teilnehmenden hatte, die mit dem Stimulus fahren, im Gegensatz zur Kontrollgruppe ohne Stimulus, wurde eine statistische Analyse durchgeführt. Die gewählte Methode ist der einseitige Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Messungen. Für die erste *Hypothese 2.1* wird getestet, ob eine Verringerung der Fahrtdauer in den betrachteten THW-Bereichen erzielt wird, wenn der emotionalisierende Stimulus aktiv ist. Für die zweite *Hypothese 2.2* wird getestet, ob eine Erhöhung des durchschnittlichen THW mit einem aktivierten

emotionalisierenden Stimulus einhergeht. Der einseitige Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Messungen wurde in R (Version 4.3.1) unter Verwendung der R-Funktion *wilcox.test* aus dem nativen Statistikpaket von R durchgeführt. Die Methode wurde gewählt, weil sie einen gruppenweisen Vergleich der Unterschiede von mindestens ordinalen abhängigen Variablen (Fahrtdauer in THW-Bereichen (s) oder mittlere THWs (s)) auf der Grundlage einer binären unabhängigen Variable (mit vs. ohne Stimulus) ermöglicht. Die Effektstärke wurde aus dem Z-Wert berechnet, der mittels der *wilcox.test*-Funktion unter Verwendung der Stichprobengröße berechnet wurde. Die Ergebnisse des einseitigen Mann-Whitney-U-Tests für eine Verringerung der Fahrtdauer in den THW-Bereichen (THW < 4 s, THW < 1,8 s, THW < 1,35 s und THW < 0,9 s) mit Stimulus sind in Tabelle 8.4 dargestellt.

Tabelle 8.4: Ergebnisse des einseitigen unabhängigen Mann-Whitney-U-Tests für unabhängige Messungen, die eine Verringerung der Fahrtdauer in niedrigeren THW-Bereichen beim Fahren mit Stimulus im Vergleich zu einer Kontrollgruppe ohne Stimulus zeigen: Differenz der Mittelwerte, Effektstärke, Z-Werte, exakte Signifikanzen, Stichprobengröße mit/ohne Stimulus, Standardabweichung, Standardfehler und das obere Konfidenzintervall. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

THW Bereich	Differenz Mittelwert	Effekt Stärke	Z-Wert	p	n pro Gruppe	SD	S.E.	Oberes Konf. Intervall (95%)
THW < 4 s	5,20	0,10	-0,68	0,50	22/21	40,77	12,44	-0,38
THW < 1,8 s	0,82	0,13	-0,86	0,39	22/21	60,92	18,59	-0,49
THW < 1,35 s	-16,46	0,21	-1,35	0,18	22/21	63,55	19,39	-0,76
THW < 0,9 s	-23,68	0,25	-1,66	0,10	22/21	47,82	14,59	-1,00

Für die THW-Bereiche THW < 1,35 s und THW < 0,9 s liegt eine negative Differenz der Mittelwerte mit kleinen Effektstärken ($\geq 0,1$, $< 0,3$) vor, was impliziert, dass die Aufenthaltsdauer in diesen THW-Bereichen für Teilnehmende mit aktiviertem Stimulus geringer war. Die Mittelwertdifferenz der Aufenthaltsdauer der Teilnehmenden sind jedoch in keinem der THW-Bereiche signifikant. Dies deutet daraufhin, dass der negative Soundstimulus innerhalb des Kontrollgruppen-Setups in allen THW-Bereichen keinen Effekt auf die Aufenthaltsdauer hatte. *Hypothese 2.1* besagt, dass die Fahrtdauer in THW-Bereichen <1,8 s beim Fahren mit einem negativen akustischen Stimulus, der durch den THW gesteuert wird, im Vergleich zum Fahren ohne Stimulus verringert wird. Basierend auf den Ergebnissen kann die Nullhypothese (Fahren mit Stimulus führt zu keiner Verringerung der Dauer)

basierend auf dem Kontrollgruppen-Setup nicht abgelehnt und somit die angegebene Alternativhypothese ($H_{2.1}$) nicht akzeptiert werden. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Die Ergebnisse des einseitigen unabhängigen Mann-Whitney-U-Tests für die Erhöhung des mittleren THW in den THW-Bereichen ($\text{THW} < 4 \text{ s}$, $\text{THW} < 1,8 \text{ s}$, $\text{THW} < 1,35 \text{ s}$ und $\text{THW} < 0,9 \text{ s}$) mit Stimulus sind in Tabelle 8.5 dargestellt.

Tabelle 8.5: Ergebnisse des einseitigen unabhängigen Mann-Whitney-U-Tests für die Erhöhung des mittleren THW in den THW-Bereichen beim Fahren mit Stimulus im Vergleich zu ohne Stimulus: Differenz der Mittelwerte, Effektstärke, Z-Werte, genaue Signifikanzen, Stichprobengröße mit/ohne Stimulus, Standardabweichung, Standardfehler und das untere Konfidenzintervall. Signifikanzniveaus: * = $p \leq 0,05$, ** = $p \leq 0,01$, *** = $p \leq 0,001$. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

THW Bereich	Differenz Mittelwert	Effekt Stärke	Z-Wert	p	n pro Gruppe	SD	S.E.	Unteres Konf. Intervall (95%)
THW < 4 s	0,06	0,19	-1,22	0,22	22/21	0,32	0,10	0,69
THW < 1,8 s	0,10	0,30	-1,95	0,05*	22/21	0,17	0,05	1,11
THW < 1,35 s	0,08	0,29	-1,91	0,06	22/21	0,12	0,04	1,15
THW < 0,9 s	-0,01	0,05	-0,36	0,72	22/21	0,09	0,03	0,45

Aus Tabelle 8.5 ergibt sich, dass es nur eine signifikante ($p < 0,05$) positive Differenz in den Mittelwerten mit mittlerer Effektstärke ($\geq 0,3$, $< 0,5$) für den durchschnittlichen THW im THW-Bereich $< 1,8 \text{ s}$ zwischen den Teilnehmenden, die mit Stimulus fahren, und denen, die ohne Stimulus gibt. Die Signifikanz der Differenz in den Mittelwerten im THW-Bereich $< 1,35 \text{ s}$ mit einer fast mittleren Effektstärke liegt knapp über der Schwelle der Signifikanz, was darauf hindeutet, dass es mit einer größeren Stichprobengröße einen signifikanten Effekt geben könnte. Für den THW-Bereich $< 0,9 \text{ s}$ liegt die Effektstärke unterhalb der Schwelle für eine relevante Effektstärke. *Hypothese 2.2* besagt, dass der durchschnittliche THW beim Fahren in THW-Bereichen $< 1,8 \text{ s}$ erhöht ist, wenn ein negativer akustischer Stimulus, der durch den THW gesteuert wird, aktiv ist. Basierend auf den Ergebnissen kann die Nullhypothese (Fahren mit Stimulus führt zu einem Anstieg des durchschnittlichen

THW) basierend auf dem Kontrollgruppen-Setup abgelehnt und somit die angegebene Alternativhypothese ($H2.2$) angenommen werden. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

8.2.3 Deskriptive Statistik basierend auf dem THW im Within-Participants-Setup

Für die deskriptive Statistik des Vergleichs innerhalb der Teilnehmenden werden zunächst die Aufenthaltsdauern (in Sekunden) verglichen, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen THW-Bereichen ($THW < 4$ s, $THW < 1,8$ s, $THW < 1,35$ s und $THW < 0,9$ s) mit bzw. ohne Stimulus verbracht haben. Sollte das Fahren mit Stimulus einen Effekt auf die Aufenthaltsdauer in niedrigen THW Bereichen haben, so sollte die Aufenthaltsdauer in den Fahrten mit Stimulus niedriger sein im Vergleich zu den Fahrten ohne Stimulus. Abbildung 8.12 zeigt die Boxplots für die Fahrtdauer im THW über beide Fahrten mit und ohne Stimulus der Teilnehmenden.

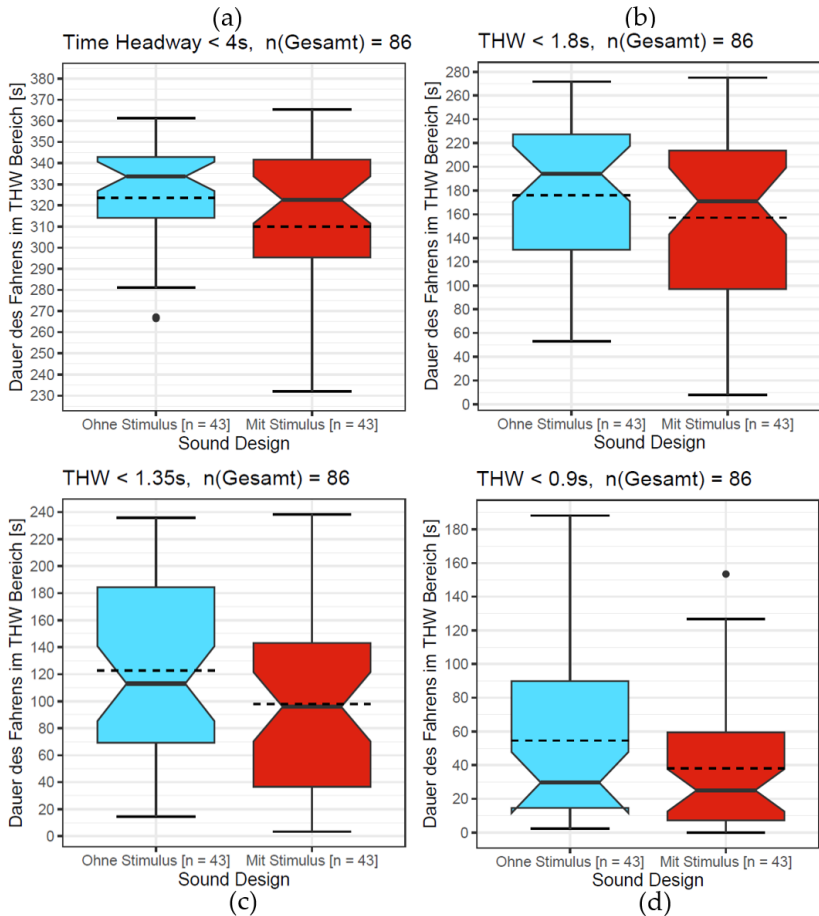


Abbildung 8.12: Boxplots für die Aufenthaltsdauern in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen Time Headway-Bereichen ($THW < 4$ s (a), $THW < 1,8$ s (b), $THW < 1,35$ s (c) und $THW < 0,9$ s (d)) für beide Fahrten jeder Teilnehmenden mit und ohne den Stimulus. Die Boxen repräsentieren das erste (Q1) und dritte Quartil (Q3). Die Whiskers repräsentieren $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ bis $Q3 + 1,5 \cdot IQR$ (Interquartilsabstand). Ausreißer sind separat dargestellt. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Tabelle 8.6 zeigt die arithmetischen Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen für die Aufenthaltsdauer in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen THW-Bereichen für beide Fahrten mit und ohne den Stimulus verbracht haben.

Tabelle 8.6: Arithmetischer Mittelwert, Median und Standardabweichung der Aufenthaltsdauer in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen Time Headway-Bereichen (THW < 4 s, THW < 1,8 s, THW < 1,35 s und THW < 0,9 s) mit und ohne Stimulus verbracht haben. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Dauer des Fahrens im THW Bereich (s)		Arithm. Mittelwert	Median	Standard Abweichung	n
THW < 4 s	Ohne Stimulus	323,6	333,7	38,6	43
	Mit Stimulus	309,9	322,6	42,6	43
THW < 1,8 s	Ohne Stimulus	175,9	194,1	64,0	43
	Mit Stimulus	157,1	171,1	65,5	43
THW < 1,35 s	Ohne Stimulus	122,7	113,0	64,0	43
	Mit Stimulus	97,8	95,9	65,2	43
THW < 0,9 s	Ohne Stimulus	64,6	42,9	57,3	43
	Mit Stimulus	40,9	26,9	35,1	43

Für alle THW-Bereiche zeigen der arithmetische Mittelwert und der Median eine Abnahme für die Fahrten mit Stimulus. Dies weist auf einen Effekt des Stimulus auf die Aufenthaltsdauer hin, die die Teilnehmenden in den jeweiligen THW-Bereich in Sichtweite eines Fahrzeugs vor ihnen verbrachten.

Für den zweiten Vergleich wird der durchschnittliche THW in den THW-Bereichen (THW < 4 s, THW < 1,8 s, THW < 1,35 s und THW < 0,9 s) zwischen den beiden Fahrten aller Teilnehmenden mit und ohne Stimulus verglichen. Für jeden Teilnehmenden werden nur Daten von Fahrten auf derselben Spur in beiden Fahrten berücksichtigt. Sollte das Fahren mit Stimulus einen Effekt auf mittleren gefahrenen THW in niedrigen THW Bereichen haben, so sollte der mittlere THW in den Fahrten mit Stimulus höher sein im Vergleich zu den Fahrten ohne Stimulus. Abbildung 8.13 zeigt die Boxplots für die mittleren THWs über beide Fahrten der Teilnehmenden. Die Anzahl der Datenpunkte für die THW-Bereiche < 1,35 s und < 0,9 s ist aufgrund von Teilnehmenden, die nicht unter 0,9 s THW gefallen sind, reduziert. Für den Within-Participant-Vergleich betrifft dies beide Fahrten aufgrund des Filterprozesses durch die gefahrene Spur in beiden Fahrten. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

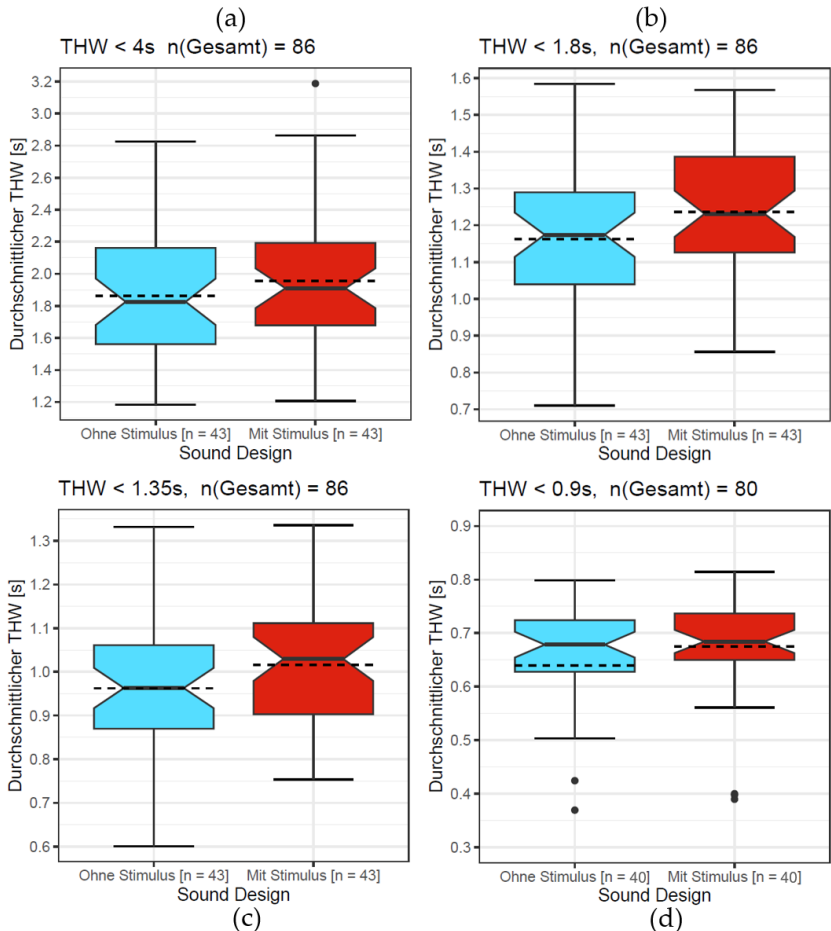


Abbildung 8.13: Boxplots für die Dauer in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen Time Headway-Bereichen (THW < 4 s (a), THW < 1,8 s (b), THW < 1,35 s (c) und THW < 0,9 s (d)) für beide Fahrten mit und ohne den Stimulus verbracht haben, während sie auf derselben Spur gefahren sind. Die Boxen repräsentieren das erste (Q1) und dritte Quartil (Q3). Die Whiskers repräsentieren $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ bis $Q3 + 1,5 \cdot IQR$ (Interquartilsabstand). Ausreißer sind separat dargestellt. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Tabelle 8.7 zeigt die arithmetischen Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen über alle durchschnittlichen THWs in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen THW-Bereichen für beide Fahrten mit und ohne den Stimulus gefahren sind.

Tabelle 8.7: Arithmetischer Mittelwert, Median und Standardabweichung des THW in Sekunden, die die Teilnehmenden in den vier verschiedenen Time Headway-Bereichen (THW < 4 s, THW < 1,8 s, THW < 1,35 s und THW < 0,9 s) für beide Fahrten mit und ohne den Stimulus verbracht haben. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Durchschnittlicher THW in THW Bereich (s)		Arithm. Mittelwert	Median	Standard Abweichung	n
THW < 4 s	Ohne Stimulus	1,86	1,83	0,39	43
	Mit Stimulus	1,95	1,91	0,41	43
THW < 1,8 s	Ohne Stimulus	1,16	1,17	0,19	43
	Mit Stimulus	1,24	1,23	0,19	43
THW < 1,35 s	Ohne Stimulus	0,96	0,96	0,14	43
	Mit Stimulus	1,02	1,03	0,13	43
THW < 0,9 s	Ohne Stimulus	0,63	0,68	0,14	40
	Mit Stimulus	0,66	0,67	0,10	40

Für alle THW-Bereiche zeigen der Mittelwert und der Median einen Anstieg für die mittleren THWs bei den Fahrten mit dem Stimulus. Dies weist auf einen Effekt des Stimulus auf den gewählten THW beim Folgen eines Fahrzeugs vor ihnen hin.

8.2.4 Statistische Analyse des Effekts des Stimulus auf den THW im Within-Participant-Setup

Um zu testen, ob das ESD (Stimulus) einen Effekt auf die Teilnehmenden hatte, wurde eine zweite statistische Analyse durchgeführt. Die gewählte Methode ist der einseitige Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für wiederholte Messungen zum paarweisen Vergleich der Fahrten eines Teilnehmenden mit und ohne Stimulus. Für die erste *Hypothese 2.1* wurde auf eine Verringerung der Aufenthaltsdauer in den THW-Bereichen, wenn der emotionalisierende Stimulus aktiv ist, getestet. Für die zweite *Hypothese 2.2* wurde auf eine Erhöhung des durchschnittlichen THW bei aktivem emotionalisierendem Stimulus getestet. Der einseitige Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test für wiederholte Messungen wurde in R (Version 4.3.1) unter Verwendung der R-Funktion *wilcox.test* aus dem nativen Statistikpaket von R durchgeführt. Die Methode wurde gewählt, weil sie einen paarweisen Vergleich der Zunahme oder Abnahme von Unterschieden von mindestens ordinalen abhängigen Variablen (Aufenthaltsdauer im THW-Bereich (s) oder mittlere THW (s)) auf der

Grundlage einer binären unabhängigen Variable (mit vs. ohne Stimulus) ermöglicht. Die Effektstärke wurde aus dem Z-Wert berechnet, der mittels der wilcox.test-Funktion und der Stichprobengröße berechnet wurde. (Petersen, Deml & Albers, 2024) Die Ergebnisse des einseitigen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für wiederholte Messungen, die eine Verringerung der Fahrdauer in den THW-Bereichen ($\text{THW} < 4 \text{ s}$, $\text{THW} < 1,8 \text{ s}$, $\text{THW} < 1,35 \text{ s}$ und $\text{THW} < 0,9 \text{ s}$) mit Stimulus testen, sind in Tabelle 8.8 dargestellt.

Tabelle 8.8: Ergebnisse des einseitigen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für wiederholte Messungen zur Prüfung der Verringerung der Fahrdauer im niedrigeren Time Headway-Bereich beim Fahren mit Stimulus im Vergleich zum Fahren ohne Stimulus: Differenz der Mittelwerte, Effektstärke, Z-Werte, genaue Signifikanzen, Stichprobengröße mit/ohne Stimulus, Standardabweichung, Standardfehler und das obere Konfidenzintervall. Signifikanzniveaus: $*$ = $p \leq 0,05$, $**$ = $p \leq 0,01$, $***$ = $p \leq 0,001$. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

THW Bereich	Differenz Mittelwert	Effekt Stärke	Z-Wert	p	n pro Gruppe	SD	S.E.	Oberes Konf. Intervall (95%)
THW < 4 s	-13,70	0,25	-2,32	0,02*	43/43	40,63	8,76	-0,69
THW < 1,8 s	-18,77	0,26	-2,42	0,02*	43/43	64,76	13,97	-0,65
THW < 1,35 s	-24,90	0,34	-3,19	0,001**	43/43	64,59	13,93	-0,74
THW < 0,9 s	-16,52	0,45	-4,17	0,0001***	43/43	47,05	10,15	-0,71

Aus Tabelle 8.8 geht hervor, dass die Differenzen der durchschnittlichen Aufenthaltsdauer innerhalb der Teilnehmenden in allen THW-Bereichen signifikant ($p < 0,05$) sind, mit mindestens einer kleinen Effektstärke innerhalb von Teilnehmenden, wenn sie mit Stimulus im Vergleich zu ohne Stimulus fahren. Die mittlere Aufenthaltsdauer in diesen THW-Bereichen war für alle THW-Bereiche geringer, wenn der Stimulus aktiviert war, was auf einen reduzierenden Effekt des negativen Soundstimulus auf die Aufenthaltsdauer in den niedrigeren THW-Bereichen hinweist. Für die THW-Bereiche $\text{THW} < 1,35 \text{ s}$ und $\text{THW} < 0,9 \text{ s}$ sind außerdem hochsignifikante negative Unterschiede der Mittelwerte mit mittleren Effektstärken ersichtlich, was auf einen noch stärkeren Effekt hinweist, wenn der Soundstimulus noch bedrohlicher klingt. *Hypothese 2.1* besagt, dass die Fahrdauer in THW-Bereichen $< 1,8 \text{ s}$ beim Fahren mit einem negativen akustischen Stimulus, der durch den THW gesteuert wird, im Vergleich zum Fahren ohne den Stimulus

verringert wird. Basierend auf den Ergebnissen kann die Nullhypothese (Fahren mit Stimulus führt zu keiner Verringerung der Fahrdauer) abgelehnt und somit die angegebene Alternativhypothese (*H2.1*) im Within-Participants-Vergleichssetup angenommen werden. Die Ergebnisse des einseitigen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für wiederholte Messungen zur Prüfung der Erhöhung des mittleren THW in den THW-Bereichen (THW < 4 s, THW < 1,8 s, THW < 1,35 s und THW < 0,9 s) mit Stimulus sind in Tabelle 8.9 dargestellt. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Tabelle 8.9: Ergebnisse des einseitigen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für wiederholte Messungen zur Prüfung der Erhöhung des durchschnittlichen THW in den THW-Bereichen beim Fahren mit Stimulus im Vergleich zum Fahren ohne den Stimulus: mittlere Unterschiede, Effektstärke, Z-Werte, genaue Signifikanzen, Stichprobengröße mit/ohne Stimulus, Standardabweichung, Standardfehler und das untere Konfidenzintervall. Signifikanzniveaus: * = $p \leq 0,05$, ** = $p \leq 0,01$, *** = $p \leq 0,001$. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

THW Bereich	Differenz Mittelwert	Effekt Stärke	Z-Wert	p	n pro Gruppe	SD	S.E.	Unteres Konf. Intervall (95%)
THW < 4 s	0,09	0,26	-2,41	0,02*	43/43	0,40	0,09	0,58
THW < 1,8 s	0,07	0,35	-3,24	0,001**	43/43	0,19	0,04	0,75
THW < 1,35 s	0,05	0,35	-3,22	0,001**	43/43	0,14	0,03	0,74
THW < 0,9 s	0,04	0,19	-1,70	0,09	40/40	0,12	0,03	0,67

Aus Tabelle 8.9 ergibt sich, dass es signifikante und positive Unterschiede in den arithmetischen Mittelwerten mit mindestens einer kleinen Effektstärke für den durchschnittlichen THW in den THW-Bereichen THW < 4 s, < 1,8 s und < 1,35 s zwischen Teilnehmenden, die mit Stimulus fahren, im Vergleich zu ohne Stimulus gibt. Die durchschnittlichen Unterschiede im THW-Bereich < 1,8 s und < 1,35 s haben außerdem eine mittlere Effektstärke und sind hochsignifikant. Die Unterschiede der Mittelwerte in allen THW-Bereichen sind positiv, was auf einen höheren mittleren THW beim Fahren mit dem negativen Soundstimulus im Vergleich zum Fahren ohne hinweist. Der Unterschied der durchschnittlichen THW im THW-Bereich < 0,9 s war jedoch nicht signifikant, obwohl die Differenz für die

Aufenthaltsdauer in diesem THW-Bereich für Fahrten mit und ohne Stimulus hochsignifikant ist. *Hypothese 2.2* besagt, dass der durchschnittliche THW beim Fahren in THW-Bereichen $< 1,8$ s für Fahrende, die einem negativen akustischen Stimulus ausgesetzt sind, der durch den THW gesteuert wird, im Vergleich zu Fahrenden ohne Stimulus erhöht ist. Basierend auf den Ergebnissen kann die Nullhypothese (Fahren mit Stimulus führt zu keiner Erhöhung der Dauer) abgelehnt werden. Entsprechend wird die angegebene Alternativhypothese (*H2.2*) im Within-Participants-Vergleichssetup akzeptiert. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

8.2.5 Affektive Bewertung des Stimulus und Wahrnehmung der Situation

Um die emotionale Wirkung des Stimulus zu untersuchen, wurden die 43 Teilnehmenden in einer offenen Frage nach ihren Gefühlen bei der Exposition gegenüber dem Stimulus befragt. Abbildung 8.14 zeigt die Häufigkeit der verwendeten emotionalen Beschreibungen, die die Teilnehmenden bei der Beantwortung der Frage „Wie haben Sie sich gefühlt, als sich der Sound geändert hat?“ angegeben haben.

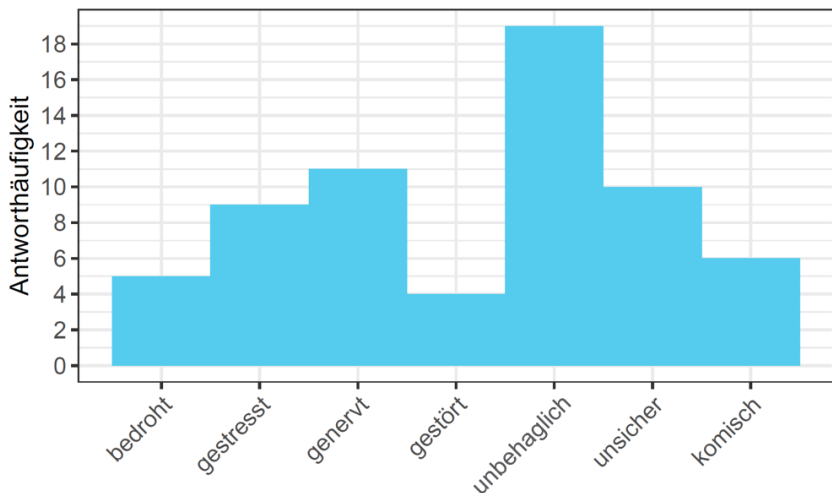


Abbildung 8.14: Häufigkeit der in den Antworten verwendeten emotionalen Beschreibungen durch die Teilnehmenden bei der Beantwortung der Frage „Wie haben Sie sich gefühlt, als sich der Sound geändert hat?“ (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Das Gefühl der *Unsicherheit* oder *Bedrohung* (die angestrebten Emotionen) wurde 15 Mal von 12 Teilnehmenden in den Antworten genannt. Das Gefühl *genervt* oder *gestört* wurde 15 Mal von 14 Teilnehmenden berichtet. Der am häufigsten gewählte Beschreibungsbegriff war *Unbehagen* mit 19 Nennungen. *Gestresst* wurde neunmal genannt. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Um zu quantifizieren, wie viele der Teilnehmenden die Änderung des Sounds mit dem THW in Verbindung brachten, wurde eine zusätzliche Frage gestellt. Insgesamt 19 der 43 Teilnehmenden berichteten in ihren Antworten, die Änderung des Sounds explizit mit dem THW oder mit dem Annähern an das vorausfahrende Fahrzeug zu verbinden, als sie gefragt wurden: „In welcher Situation haben Sie diese Geräuschänderung bemerkt?“. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

8.3 Diskussion

In diesem Kapitel wurde untersucht, ob das entwickelte ESD einen Einfluss auf die Aufenthaltsdauer in niedrigeren THW-Bereichen sowie den durchschnittlich gefahrenen THW in diesen THW-Bereichen hat. Es wurden potenzielle Effekte in vier verschiedenen THW-Bereichen ($\text{THW} < 4 \text{ s}$, $\text{THW} < 1,8 \text{ s}$, $\text{THW} < 1,35 \text{ s}$ und $\text{THW} < 0,9 \text{ s}$) untersucht. Zusätzlich wurden zwei Hypothesen aufgestellt, um zu testen, ob das ESD einen positiven Einfluss auf die Verkehrssicherheit in Bezug auf den vom deutschen Kraftfahrt-Bundesamt empfohlenen Sicherheitsabstand haben könnte:

Hypothese 2.1: Die Aufenthaltsdauer in THW-Bereichen $< 1,8 \text{ s}$ während des Fahrens wird verringert, wenn die Fahrenden einem negativen emotionalisierenden akustischen Stimulus ausgesetzt ist, der durch den THW gesteuert wird, im Vergleich zum Fahren ohne den Stimulus.

Hypothese 2.2: Der gefahrene durchschnittliche THW wird in THW-Bereichen $< 1,8 \text{ s}$ erhöht, wenn die Fahrenden einem negativen emotionalisierenden akustischen Stimulus ausgesetzt ist, der durch den THW gesteuert wird, im Vergleich zum Fahren ohne den negativen Stimulus.

Um den Effekt des emotionalisierenden Sound Designs und die Hypothesen zu testen, wurde das Fahren mit einem emotionalisierenden Sound Design, das sich basierend auf dem aktuellen Sicherheitsabstand von einem positiven Sound zu einem negativen, bedrohlichen Sound (Stimulus) ändert, mit dem Fahren nur mit dem positiven Sound (ohne Stimulus) verglichen. Die Teilnehmenden führten insgesamt zwei Fahrten durch. Ob sie zuerst mit dem emotionalisierenden Sound

Design oder nur dem positiven Sound Design fuhren, wurde randomisiert. Ein Vergleich wurde zunächst in einem Kontrollgruppensetup durchgeführt, bei dem nur die erste Fahrt der Teilnehmenden im Simulator, zufällig mit oder ohne emotionalisierenden Sound, berücksichtigt wurde. Im zweiten Analysesetup wurde beide Fahrten mit und ohne Stimulus innerhalb der Teilnehmenden verglichen. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Für das Kontrollgruppensetup ergaben sich bei der Prüfung auf die Verringerung der Aufenthaltsdauer in niedrigeren THW-Bereichen mit dem Stimulus deutliche geringere Aufenthaltsdauern in den niedrigeren THW-Bereichen ($\text{THW} < 1,35 \text{ s}$ und $\text{THW} < 0,9 \text{ s}$). Diese Unterschiede waren jedoch statistisch nicht signifikant. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde die erste *Hypothese 2.1* für das Kontrollgruppensetup abgelehnt. Für eine Erhöhung des gefahrenen THW in niedrigen THW-Bereichen wurde nur ein grenzwertig signifikanter ($p < 0,05$) Effekt mit mittlerer Effektstärke beim Fahren im THW-Bereich $< 1,8 \text{ s}$ für die Teilnehmenden während des Fahrens mit dem emotionalisierenden Sound Design gefunden. Basierend auf diesem Ergebnis wurde die zweite *Hypothese 2.2* für das Kontrollgruppensetup angenommen. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die Ergebnisse für die anderen THW-Bereiche keine signifikante Erhöhung des mittleren THW beim Fahren mit dem emotionalisierenden Sound Design zeigten. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Eine Erklärung für das Nichterreichen der Signifikanz im Kontrollgruppensetup für die meisten der betrachteten THW-Bereiche könnte die Ineffektivität des Stimulus sein. Eine alternative Erklärung könnte die kleine Stichprobengröße im Kontrollgruppensetup sein, bestehend aus 21 Teilnehmenden, die mit Stimulus fuhren, und 20, die ohne fuhren. Diese Stichprobengröße könnte zu klein sein, um eine gleichmäßige Verteilung der individuellen Fahrstile und Risikotoleranz zwischen den Gruppen trotz der zufälligen Zusammensetzung sicherzustellen, was zu einer Maskierung des Effekts des emotionalisierenden Stimulus führen könnte. Für diese Begründung sprechen die Ergebnisse für die Vergleiche innerhalb der Versuchspersonen. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Im Within-Participant-Vergleich (Vergleich innerhalb der Probanden) wurden signifikante Verringerungen der Aufenthaltsdauer in allen THW-Bereichen beobachtet, wenn der Stimulus aktiv war. Diese deutliche Veränderung bedingt die Annahme der ersten *Hypothese 2.1* im Within-Participant-Vergleich für den durchschnittlichen THW. Dieser zeigte eine signifikante Erhöhung in allen außer dem kleinsten THW-Bereich ($\text{THW} < 0,9 \text{ s}$). Die Ergebnisse zeigen, dass das Fahrverhalten der Teilnehmenden beeinflusst und systematisch verändert wurde, außer für den durchschnittlichen THW im möglicherweise unsicheren und in

Deutschland unzulässigen THW-Bereich $< 0,9$ s. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde die zweite *Hypothese 2.2* im Within-Participant-Design angenommen. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Mögliche Gründe für das Fehlen signifikanter Unterschiede im THW-Bereich $< 0,9$ s werden im Folgenden diskutiert. Der erste Grund könnte sein, dass im THW-Bereich $< 0,9$ s das emotionalisierende Sound Design auf der maximal negativen Einstellung ist. In dieser Einstellung ist der Sound identisch wie der neu entwickelte, optimierte bedrohliche Sound, der in der vorherigen Studie zur Wahrnehmung von Sicherheitsabständen (Kapitel 7) getestet wurde. In der letzten Studie zeigte dieser Sound (*Sound 5*) signifikante Effekte auf die Einschätzung eines dargestellten Sicherheitsabstands. Es gab jedoch keine signifikanten Effekte auf die Bewertung des dargestellten Sicherheitsabstands als angemessen/unangemessen oder das gewünschte Vergrößern des dargestellten Sicherheitsabstands. Trotz der vorherigen Ergebnisse wurde dieser Sound für die Studie aus zwei Hauptgründen ausgewählt: Erstens stellte er eine logische Weiterentwicklung der Bemühungen dar, die bedrohliche Wirkung des Sounds zu verstärken, basierend auf zuvor identifizierten Korrelationen zwischen psychoakustischen Parametern und der Wahrnehmung von Sounds als bedrohlich. Zweitens war es das Ziel zu untersuchen, ob ein videobasiertes experimentelles Setup nicht nah genug an der Realität ist, um den Sound als effektiven Stimulus zu bewerten. In der in diesem Kapitel vorgestellten Simulatorstudie war die Fahrdauer im $< 0,9$ s THW-Bereich drastisch niedriger (58 %) und der Unterschied war signifikant, wenn mit diesem Sound stimuliert wurde. Demgegenüber war der mittlere THW in diesem THW-Bereich um 5 % erhöht, wenn auch nicht signifikant. Dies spiegelt möglicherweise die Ergebnisse der vorherigen Studie wider, dass der Sound als bedrohlich und unangenehm bewertet wurde und die Teilnehmenden zwar weniger Zeit in THW-Bereichen mit diesem Sound verbrachten, aber nicht motiviert waren, den THW bei bereits nahem Auffahren auch zu erhöhen, wenn sie durch den Sound stimuliert wurden. Die Erklärung könnte erneut sein, dass aufgrund seines hohen Niveaus an Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke bei etwa 2 Hz (was möglicherweise ähnlich wie aggressive Techno- oder vergleichbare elektronische Musik klingt) ein Effekt ähnlich dem Einfluss des Musiktempos auf das Fahren in einer Simulation aufgetreten sein könnte: Ein höheres Tempo in der Musik resultierte in höheren Geschwindigkeiten und einer höheren Häufigkeit von Verkehrsverstößen (Brodsky, 2001). Darüber hinaus könnte die beobachtete größere Effektstärke und die erhöhte statistische Signifikanz in der Fahrdauer mit einem THW $< 0,9$ s, mit impulshaltigem Stimulus, darauf zurückzuführen sein, dass die Teilnehmenden nicht bereit waren, in einer störenden oder unangenehmen Geräuschkulisse zu fahren. Dies würde bedeuten, dass die Verringerung der Fahrdauer nicht unbedingt einen aktiven Versuch widerspiegelt, den THW zu erhöhen und die wahrgenommene Bedrohung

zu verringern, sondern eher den Wunsch, die unangenehme Geräuschkulisse zu vermeiden. Vergleichende Daten aus der vorherigen videobasierten Studie mit den gleichen Sounds wie in dieser Simulatorstudie zeigten, dass 62 % der Teilnehmenden sich bedroht oder ängstlich fühlten, während sie den bei 1,35 s THW hörbaren Sound hörten, und 68 %, als sie den bei 0,9 s THW hörbaren Sound hörten. Dies passt gut zu den Aussagen bzgl. der offene Frage in der Fahrsimulatorstudie, in der 12 der 43 Teilnehmenden (28 %) „bedroht“ oder „unsicher“ als Beschreibungen ihrer Gefühle bzgl. des Soundänderung angaben, und 19 (44%) „unbehagen“, was als eine schwächere Form von bedroht oder unsicher interpretiert werden kann. 14 Teilnehmende (33 %) berichteten hingegen sich genervt oder gestört zu fühlen. Dies könnte auch darauf hinweisen, dass Probanden die Sounds anders bewerten, wenn sie in einem tatsächlichen Auto sitzen und fahren, als wenn sie sich lediglich vorstellen, im Auto zu sitzen, während sie Soundstimuli hören. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

8.4 Folgerungen und Beantwortung der Forschungsfrage

Die vorliegenden Ergebnisse stützen die starke Indikation der vorherigen Studie, dass ein angsteinflößendes oder bedrohliches ESD die Wahl des THW in Folgefahrten effektiv beeinflussen könnte. Dies spricht zusätzlich auch für eine bereits bestehende externe Validität der Versuchsumgebung bzgl. der vorherigen Studie zur Wahrnehmung – zumindest in Bezug auf Studien innerhalb eines Fahrsimulators. Basierend auf den Ergebnissen aus der zweiten Studie (Kapitel 7) sollten die affektiven Sounds durch Erhöhung des Maßes an Dissonanz der Sounds und modulierten metallischen Zischgeräuschen erreicht werden. Ein hohes Niveau an Impulshaltigkeit, das Ähnlichkeiten zu erregender Musik mit einem höheren Tempo aufweist, sollte jedoch vermieden werden.

Abschließend sollen mit den Erkenntnissen aus der durchgeführten Simulatorstudie die übergreifende Forschungsfrage für dieses Kapitel beantwortet werden, diese lautet:

Unterfrage 1.3: Wirkt sich ein, sich mit dem Zeitabstand (THW) dynamisch änderndes ESD, bestehend aus beruhigendem positivem Basis-Sound und bedrohlichem negativem Sound positiv auf den gewählten Sicherheitsabstand während des Fahrens aus?

Im Kontrollgruppensetup zeigten sich in den niedrigen THW-Bereichen ($< 1,35$ s und $< 0,9$ s) im Mittel eine Reduktion der Aufenthaltsdauer und in den ersten drei THW-Bereichen ($< 4,0$ s - $< 1,35$ s) im Mittel eine Erhöhung des THW. Es zeigte

sich also durchaus hier schon ein Effekt auf die Probanden, auch wenn der Effekt nur für den mittleren THW bei $< 1,8$ s signifikant war.

Im Within-Setting zeigte sich hingegen für die Aufenthaltsdauer in allen THW-Bereichen eine signifikante Verringerung mit dem emotionalisierenden Sound Design, für den mittleren THW in allen Bereichen außer $\text{THW} < 0,9$ s eine signifikante Erhöhung. Bzgl. der Forschungsfrage kann also gefolgert werden, dass ein dynamisches, sich mit dem Zeitabstand änderndes emotionalisierendes Sound Design generell positiv auf den gewählten Sicherheitsabstand wirken könnte, jedoch potenziell beim Fahren in sehr niedrigen Sicherheitsabständen nur noch die Aufenthaltsdauer reduziert, jedoch nicht den in diesem Bereich durchschnittlichen gefahrenen Sicherheitsabstand erhöht. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Abschließend kann auf Basis dieser Erkenntnisse auch die erste *Hauptforschungsfrage* beantwortet werden:

„Kann eine dynamische Emotionalisierung mittels eines aktiven Sound Designs dazu genutzt werden, mittels einer Beeinflussung des Fahrverhaltens am Beispiel des Sicherheitsabstands die Verkehrssicherheit zu erhöhen?“

Es wurde gezeigt, dass entsprechend gestaltete emotionalisierende Sounds einen Einfluss auf die Wahrnehmung von Sicherheitsabständen sowie auf die Aufenthaltsdauer und den mittleren Sicherheitsabstand während des Fahrens haben können. Im Falle der Wahrnehmung kam es zu einer gesteigerten Risikowahrnehmung (Sicherheitsabstand zu gering) und einer niedrigeren Schätzung des dargestellten Sicherheitsabstands zwischen einigen der Sound-Paare positiv-bedrohlich. Beim Fahrverhalten kam es zu einer Reduktion der Aufenthaltsdauer und Erhöhung des gewählten Sicherheitsabstands, zumindest bei dem Vergleich innerhalb von Probanden. Diese Ergebnisse indizieren sehr stark, dass durch eine dynamische Emotionalisierung mittels eines aktiven Sound Designs die Verkehrssicherheit durch die Beeinflussung des Fahrverhaltens erhöht werden kann. Jedoch müsste in weiterführender Forschung noch einmal überprüft werden, ob auch im unsicheren Bereich $< 0,9$ s THW eine Erhöhung des Sicherheitsabstands zu erwirken wäre. Hierfür sollte geprüft werden, ob dies durch einen Sound möglich wäre, der bedrohlich ist, aber ein niedriges Niveau an Impulshaltigkeit und Schwankungsstärke bei etwa 2 Hz hat, also weniger aggressiver elektronische Musik ähnelt. (Petersen, Deml & Albers, 2024)

Mit dem Abschluss der Untersuchungen des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten ESD soll im nächsten Kapitel aus den durchgeführten Untersuchungen eine Validierungsmethodik abgeleitet werden. Zunächst werden hierfür die notwendigen Validierungsumgebungen aus den verwendeten Versuchsumgebungen abgeleitet.

9 Entwicklung einer Validierungsumgebung und Ableitung einer Validierungsmethodik

In den folgenden Kapiteln 9 und 10 soll basierend auf den zuvor beschriebenen Untersuchungen und den hierfür verwendeten Versuchsumgebungen ein XiL-Validierungsframework sowie eine Validierungsmethodik für ESD abgeleitet werden, um die *Hauptforschungsfrage 2* zu beantworten:

Hauptforschungsfrage 2: Welche Validierungsmethodik sowie ein hierfür notwendiges XiL-Validierungsframework für eine kontinuierliche Validierung emotionalisierender Sound Designs von initialen Einzelsounds bis zur prototypischen Umsetzung des Sound Designs kann aus den durchgeführten Untersuchungen abgeleitet werden?

Für die strukturierte Beantwortung dieser Forschungsfrage wurden 3 Unterfragen gebildet:

Unterfrage 2.1: Wie kann ein notwendiges XiL-Validierungsframework sowie dessen Validierungskonfigurationen für eine kontinuierliche Validierung von initialen Einzelsounds bis zur prototypischen Umsetzung des emotionalisierenden Sound Designs auf Basis des IPEK-XiL-Ansatzes gestaltet sein?

Unterfrage 2.2: Wie kann eine Validierungskonfiguration im Realfahrzeug technisch ermöglicht werden?

Unterfrage 2.3: Wie kann eine abgeleitete notwendige Validierungsmethodik bestehend aus Validierungstätigkeiten für eine kontinuierliche Validierung emotionalisierender Sound Designs von initialen Einzelsounds bis zur prototypischen Umsetzung des Sound Designs auf Basis der durchgeführten Untersuchungen sowie des entwickelten XiL-Validierungsframework gestaltet sein?

9.1 Beschreibung des XiL-Validierungsframeworks für die kontinuierliche Validierung

Zur Beantwortung von *Unterfrage 2.1* wird für die abgeleitete Methode zur kontinuierlichen Validierung eines ESD zunächst die ganzheitliche Validierungsumgebung als XiL-Validierungsframework für die Validierung gemäß

des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes dargestellt (Albers et al., 2010). Dieses fasst die einzelnen Validierungskonfigurationen für die Validierung des ESD als zu untersuchendes System („X“) sowie der sich daraus ergebenden Connected Systems in den unterschiedlichen Systemebenen in den jeweiligen unterschiedlichen Entwicklungsständen zusammen. Das Validierungsframework umfasst dabei die Validierungskonfigurationen für die Validierung einzelner initial entwickelter Sounds im Fahrzeugkontext bis hin zur Möglichkeit der Validierung des ESD in realen Fahrzeugen, Fahrscenarien und -situationen (Kapitel 2.1.3). Dargestellt ist das Framework in Abbildung 9.1.

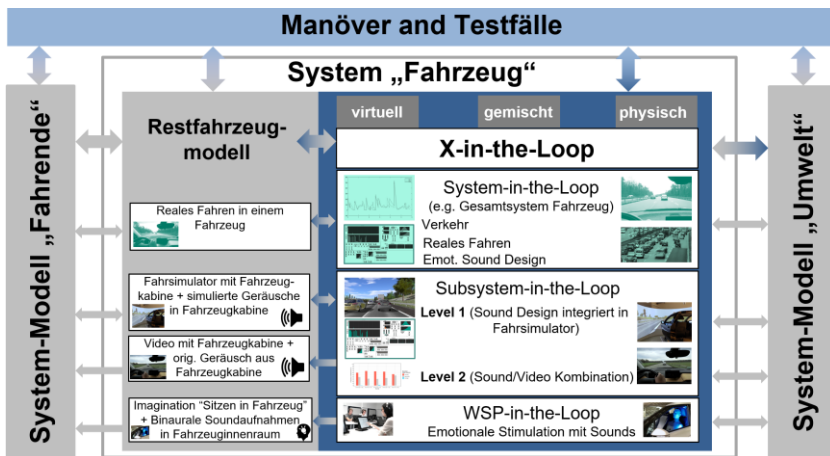


Abbildung 9.1: XiL-Validierungsframework für emotionalisierende Sound Designs auf Basis von Albers und Behrendt et al. (2016)

Die Validierungskonfiguration soll im Falle des ESD dazu dienen, einen aktuellen Entwicklungsstand des System-in-Development (SiD), das den jeweilig vorliegenden Lösungsraum des ESD innerhalb des Entwicklungsprozesses definiert, möglichst effizient und effektiv validieren zu können. Hierfür werden je nach Entwicklungsstand des ESD spezifische Validierungsaktivitäten und Validierungsebenen (Layer) sowie unterschiedliche Testfälle für die durchzuführende Validierung benötigt, die eine Validierung des SiD von WSP-Ebene (einzelne Sounds die Emotionen bedingen) bis zur Systemebene (prototypische Umsetzung des ESD in einem Fahrzeug) ermöglichen. Die zu validierende Systemebenen bedingt dabei die notwendigen Umfänge und Realitätsnähe zur Steigerung der externen Validität der gekoppelten Systeme

(Connected Models), die das Restsystem-Fahrzeug, System-Modell „Fahrende“ und System-Modell „Umwelt“ repräsentieren. Die Validierung des ESD erfolgt immer im Kontext realer Personen, die das System-under-Investigation (Sul) Fahrende repräsentieren, auf Basis dessen eine Validierung der (Teil-)Funktionserfüllung des ESD erfolgen kann. Je nach Entwicklungsstand oder Validierungsziel werden unterschiedliche Teil-Aspekte dieses Sul betrachtet. Das System „Fahrende“ besteht dabei je nach Validierungsebene im Kontext des ESD aus einem subjektiven akuten emotionalen Zustand, der mittels des ESD stimuliert werden soll, einer subjektiven Wahrnehmung gegenüber einer Fahr- oder Verkehrssituation, die mittels ESD verändert werden soll, oder einem individuellen Fahrverhalten, das mittels des ESD beeinflusst werden soll. Das Restfahrzeugmodell sowie das System-Modell „Umwelt“ werden in ihrer Repräsentanz und Realitätsnähe je nach Entwicklungsstand und Validierungsebene angepasst, um eine der aktuellen Ausprägungen des Modells „Fahrende“ zielführende Validierung zu ermöglichen. In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Validierungskonfigurationen des Validierungsframeworks von Element- bis Systemebene im Detail beschrieben.

9.1.1 Validierungskonfiguration auf WSP-in-the-Loop-Ebene

Der erste Schritt der Validierung auf WSP-Ebene betrachtet nur die emotionalisierende Wirkung von entwickelten Sounds als Grundlage für das zu entwickelnde Sound Design. Das Ziel ist hierbei die Eingrenzung effektiver auditiver Stimuli aus einem großen Sound-Lösungsraum als Grundlage für ein ESD. Zusätzlich sollen Klangeigenschaften, die zu einer Steigerung der angestrebten emotionalisierenden Wirkung der auditiven Stimuli innerhalb des Entwicklungsprozesses genutzt werden können, identifiziert werden. Die Validierungskonfiguration basiert auf der Versuchsumgebung, die in Kapitel 5 für die Untersuchung der emotionalen Wirkung von Sounds verwendet wurde. Eine Übersicht der Validierungskonfiguration bestehend aus dem System „Fahrzeug“, das aus dem SiD „Sounds“ sowie dem akustisch angenäherten und sich von Probanden vorgestellten Restfahrzeugmodells besteht, sowie dem Sul „Fahrende“ und dem System-Modell „Umwelt“ ist in Abbildung 9.2 dargestellt.

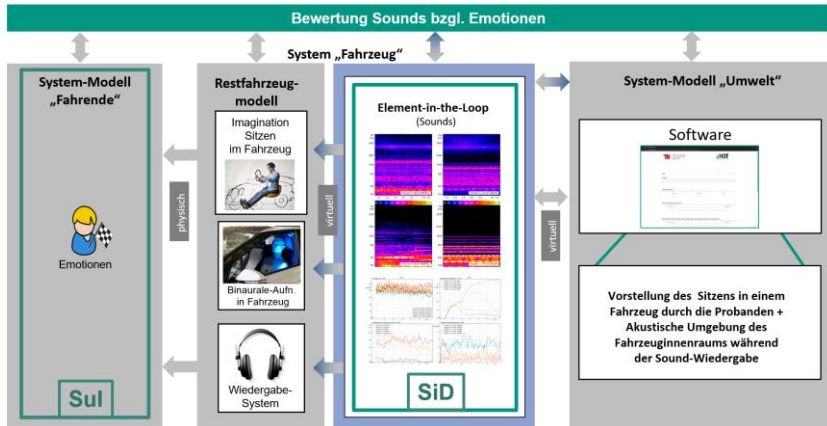


Abbildung 9.2: Validierungskonfiguration für die Validierung der emotionalisierenden Wirkung der entwickelten Sounds auf Element-Ebene in Anlehnung an Albers und Behrendt et al. (2016)

In dieser Validierungskonfiguration besteht das Rest-Modell „Fahrzeug“ aus zwei Teilen. Der erste ist das innerhalb der Validierungsaktivität geforderte „Vorstellen des Sitzens in einem Fahrzeug“ durch die Probanden. Der zweite Teil ist die akustische Umgebung eines Fahrzeugs. Diese ist in den binauralen Aufnahmen der Sounds enthalten, die für die Validierung verwendet werden. Diese aufgezeichneten Sounds werden dann während der Validierung über die Soundkarte auf Kopfhörern oder anderen hochwertigen Wiedergabesystemen – analog zu Kapitel 5.1.1 – dem Sul dargeboten. Eine Umgebung über das Fahrzeug hinaus gibt es in dieser Validierungskonfiguration noch nicht, da in diesem Schritt noch keine Verknüpfung mit Fahrverhaltens- oder Verkehrskontext des Zielsystems ESD notwendig ist und eine gezielte Datenerhebung bzgl. der reinen Wahrnehmung der Sounds sogar beeinträchtigen könnte. Die notwendigen Daten bzgl. des Sul „Fahrende“ wird über die Angaben der Befragten innerhalb eines Fragebogens unmittelbar nach der auditiven Stimulation durch die Sounds erfasst. Dies kann innerhalb einer Datenerfassungssoftware wie Unipark erfolgen. Die Validierungskonfiguration ist damit eine Open-Loop-Konfiguration, da das System-Modell „Fahrende“ keine Auswirkung auf das SiD Sounds haben kann. Die detaillierte Darstellung der Modellausprägungen innerhalb der Validierungskonfiguration inklusive der Koppelsysteme (KS) ist in Abbildung 9.3 dargestellt.

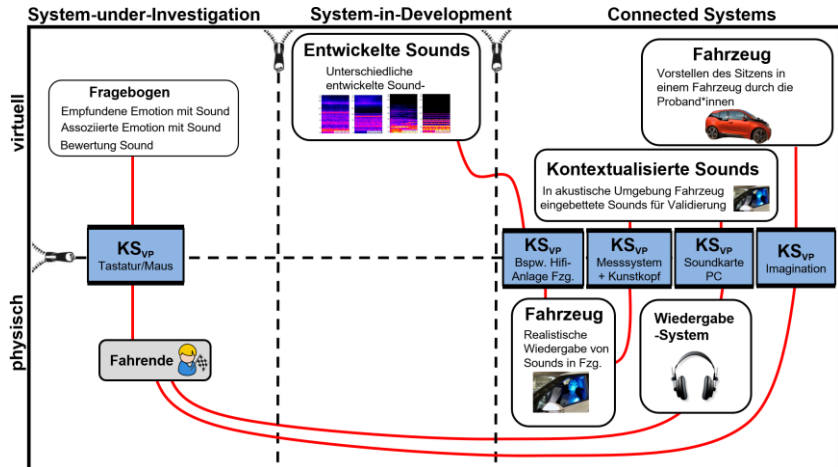


Abbildung 9.3: Beispielhafte Kombination von Modellausprägungen innerhalb der Validierungskonfiguration für die Validierung auf Element-in-the-Loop-Ebene eines emotionalisierenden Sound Designs nach Yan, Mandel, Behrendt und Albers (2019)

9.1.2 Validierungskonfiguration Subsystem-in-the-Loop-Ebene: Level 2

Die untere Stufe (Level 2) der Subsystem-in-the-Loop-Layer des Validierungsframeworks bettet erstmalig die zu validierenden Sounds (SiD) in den Kontext der zu beeinflussenden Wahrnehmung eines Fahrzeugzustands bzw. einer Verkehrssituation ein, die zu einer gezielten Beeinflussung der für das ESD gewählten Fahrverhaltensparameter führen sollen. Die Validierungskonfiguration basiert grundsätzlich auf der Versuchsumgebung in Kapitel 7.1. Eine Übersicht der Validierungskonfiguration bestehend aus System „Fahrzeug“ (SiD Sounds + virtuellem Restfahrzeugmodell), sowie dem Sul „Fahrende“ und dem System-Modell „Umwelt“ ist in Abbildung 9.4 zu sehen.

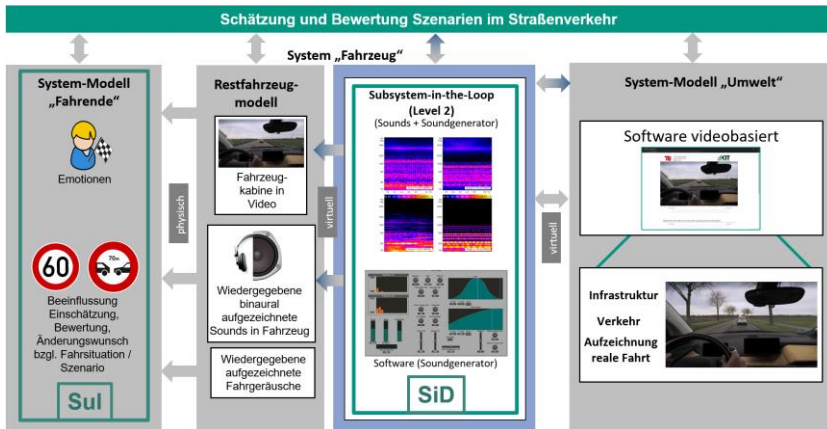


Abbildung 9.4: Validierungskonfiguration für die Validierung der Wirkung der entwickelten Sounds auf die Wahrnehmung von gezeigtem Fahrverhalten oder Verkehrsszenarien auf Subsystemebene in Anlehnung an Albers und Behrendt et al. (2016)

Die Hauptfunktion dieser Validierungskonfiguration ist eine Kopplung von Sounds mit visuellen Stimuli auf Basis derer die Validierungsaktivität durchgeführt werden kann. Die visuellen Stimuli sind dabei Videoaufzeichnungen von für die Validierung repräsentativen Verkehrssituationen und -szenarien aus der Sicht der Fahrenden-Perspektive. Diese werden auf dem Koppelsystem „Bildschirm“ wiedergegeben. Hierdurch wird eine technisch niederschwellige Validierung der Wirkung der unterschiedlichen Sounds auf die Wahrnehmung von Verkehrssituationen und -szenarien ermöglicht. Das Restsystem „Fahrzeug“ besteht in dieser Validierungskonfiguration auf visueller Ebene aus der in den Videos zu sehender Fahrzeugkabine aus einer gewohnten Fahrenden-Perspektive. Auf der auditiven Ebene besteht das Restsystem-Fahrzeug aus den erneut binaural aufgezeichneten entwickelten Sounds die für die Aufzeichnung im Fahrzeuginnenraum wiedergegeben werden, analog zur Validierungskonfiguration auf Element-Ebene (Kapitel 9.1.1). Zusätzlich werden die zu validierenden Sounds mit binauralen Aufzeichnungen der Fahrgeräusche, die während der Aufnahme der Videos aufgezeichnet wurden, überlagert (Kapitel 7.1.1). Diese Kombinationen werden dann über Kopfhörer wiedergegeben. Dies erhöht die Immersion auf auditiver Ebene und ermöglicht zusätzlich eine Validierung der Sounds näher am realen System „Fahrzeug“. Das System-Modell „Umwelt“ wird ebenfalls durch die Videos abgebildet. Es setzt sich aus den explizit dargestellten Verkehrssituationen und -szenarien (bspw. Auffahrverhalten, Geschwindigkeitsvorgaben/-verhalten,

Verkehrsschilder etc.) zusammen sowie der natürlichen Hintergründe (Stadt, Wald, ländliche Umgebung etc.). Die notwendigen Daten bzgl. des Sul „Fahrende“ wird über deren Angaben innerhalb eines Fragebogens unmittelbar nach der audio-visuellen Stimulation erfasst. Die Validierungskonfiguration ist ebenfalls eine Open-Loop-Konfiguration, da das System „Fahrende“ keine Auswirkungen auf das SiD „Sounds“ haben kann. Die detaillierte Darstellung der Modellausprägungen innerhalb der Validierungskonfiguration ist in Abbildung 9.5 dargestellt.

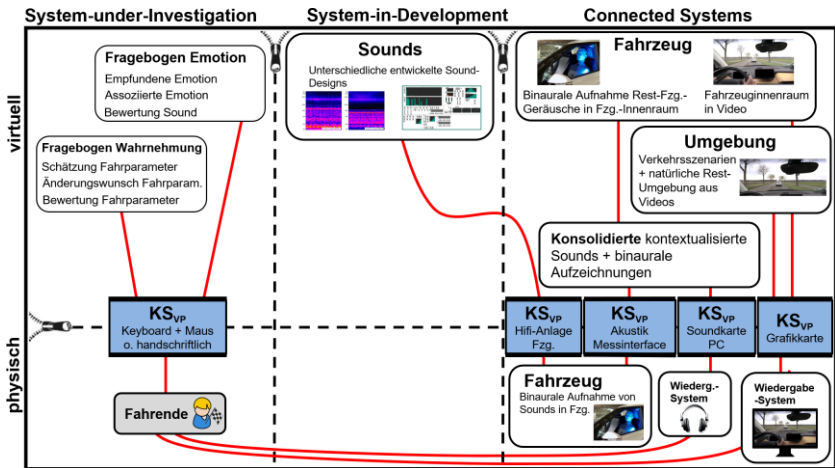


Abbildung 9.5: Beispielhafte Kombination von Modellausprägungen innerhalb der Validierungskonfiguration für die Validierung auf Subsystem-in-the-Loop-Ebene 2 nach Yan et al. (2019)

9.1.3 Validierungskonfiguration Subsystem-in-the-Loop-Ebene: Level 1

Die Stufe 1 (Level 1) der Subsystem-in-the-Loop Layer des Frameworks hat das Ziel, eine Validierung des prototypisch entwickelten ESD im Kontext des tatsächlichen Fahrverhalten zu ermöglichen und basiert auf der Versuchsumgebung in Kapitel 8.1. Der Fahrverhaltenskontext wird durch die Verwendung eines Fahr-simulators ermöglicht. Eine Übersicht der Validierungskonfiguration bestehend aus System „Fahrzeug“ (SiD „Sound Design“ + virtuellem Restfahrzeugmodell), sowie dem Sul „Fahrende“ und dem System-Modell „Umwelt“ ist in Abbildung 9.6 dargestellt.

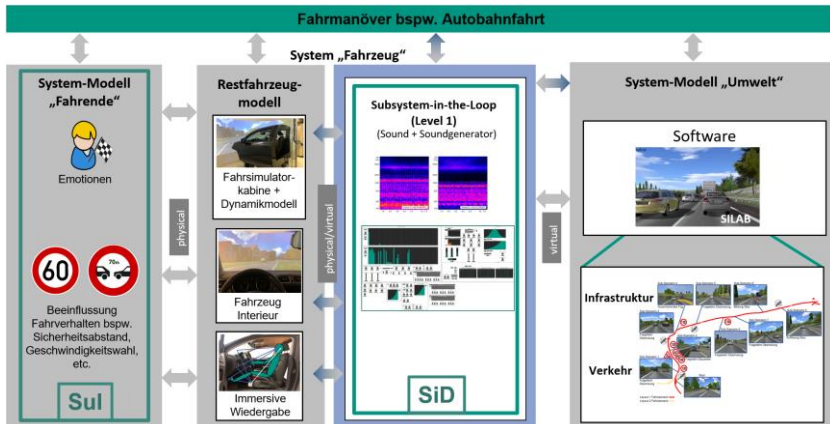


Abbildung 9.6: Validierungskonfiguration für die Validierung der Wirkung des entwickelten emotionalisierenden Sound Designs auf das Fahrverhalten in Anlehnung an Albers und Behrendt et al. (2016).

Für die Validierungskonfiguration muss das SiD „ESD“ als dynamisch reagierendes System in den Fahrsimulator integriert werden. Das Simulator-System muss hierfür entsprechende Koppelsysteme zur Verfügung stellen, die für die Generierung des dynamischen ESD notwendig sind. Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten beispielhaften Validierung war dieses Koppelsystem eine Python-Schnittstelle (Kapitel 8.1.2). Bei der Integration des ESD in das Simulator-System steht eine realitätsnahe Wiedergabe des Sound Designs im Vordergrund. Es soll möglichst als Teil des Fahrzeuggesamtsystems wahrgenommen werden, nicht als fahrzeugunabhängiger bzw. fremdartiger auditiver Stimulus. Deshalb sollte das Sound Design gemäß Kapitel 8.1.5 primär über indirekte Übertragungspfade zu den Fahrenden gelangen, um die Ortung zu erschweren und den Höreindruck eines über einen Lautsprecher abgespielten Sound Designs zu reduzieren. Das physikalische Restsystem-Fahrzeug besteht in dieser Validierungskonfiguration aus einem angenähert realistischen Fahrzeug, das einen möglichst realistischen Fahreindruck vermitteln kann. Dabei bestimmen die Validierungsziele und die angestrebte externe Validität der Validierungskonfiguration, welche Eigenschaften (bspw. Darstellung von Rückspiegeln, Simulation von Kräften etc.) im physikalischen Rest-Modell des Fahrzeugs abgebildet werden müssen. Das virtuelle Restsystem-Fahrzeug besteht aus einem realitätsnahen Fahrdynamik-Modell, welches das Verhalten des Fahrzeugs innerhalb der virtuellen Umgebung ausreichend realistisch abbildet. Auch hier definieren die Validierungsziele sowie die untersuchten Verkehrssituationen und -szenarien, welcher Grad an Realismus und welche

fahrdynamischen Eigenschaften abgebildet werden müssen. Darüber hinaus sollte der Fahrsimulator eine realitätsnahe Wiedergabe der Fahrzeug-Rest-Geräusche des gefahrenen Fahrzeugs (bspw. Wind- und Rollgeräusche) ermöglichen, um das ESD in einem möglichst realistischen auditiven Kontext validieren zu können, um damit die Validität zu steigern. Das System-Modell „Umwelt“ wird virtuell über verfügbare Displays des Fahrsimulators dargestellt. Es ergibt sich aus den für die Validierungsziele relevanten Fahrsituationen und -szenarien. Zusätzlich sollten diese Szenarien eine möglichst hohe visuelle Qualität aufweisen, um eine Steigerung der Immersion und daraus resultierend eine gesteigerte externe Validität der Validierung zu ermöglichen. Für die Datenerhebung bzgl. des Systems „Fahrende“ sollte das Simulator-System in der Lage sein, die für die Validierung relevanten Daten über das Gesamtfahrzeugsystem selbst (bspw. Geschwindigkeit) sowie des Gesamtfahrzeugsystems in Relation zu den Verkehrsszenarien (bspw. Sicherheitsabstand) aufzuzeichnen. Des Weiteren kann zusätzlich eine Befragung bzgl. der notwendigen zu erhebenden Daten zwischen oder nach den Fahrten durchgeführt werden. Die Validierungskonfiguration ist damit eine Closed-Loop-Konfiguration, da die Fahrenden durch ihr Verhalten eine Änderung des SiD „ESD“ vornehmen können. Die detaillierte Darstellung der Modellausprägungen innerhalb der Validierungskonfiguration ist in Abbildung 9.7 dargestellt.

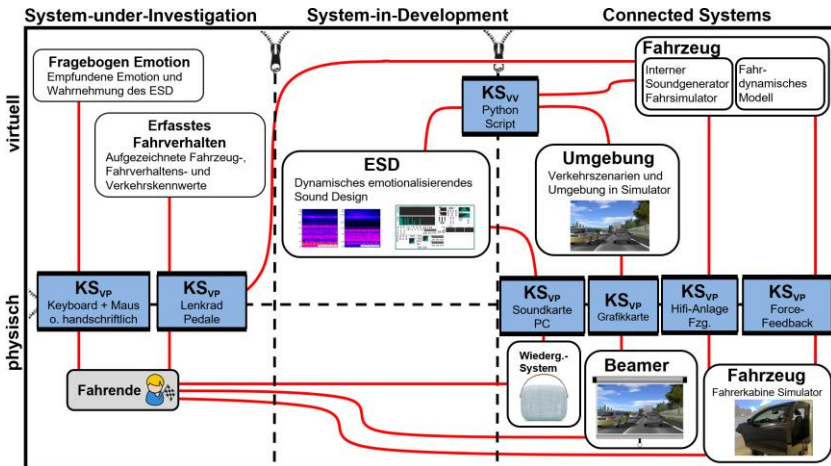


Abbildung 9.7: Beispielhafte Kombination von Modellausprägungen innerhalb der Validierungskonfiguration für die Validierung auf Subsystem-in-the-Loop-Ebene 1 nach Yan et al. (2019)

9.1.4 Validierungskonfiguration System-in-the-Loop-Layer

Die finale Validierungskonfiguration innerhalb des Validierungsframeworks besteht aus dem in ein reales Fahrzeug integrierten ESD. Diese Konfiguration ermöglicht eine Validierung mit einer sehr hohen externen Validität, da das System „Fahrzeug“ ganzheitlich vorliegt und die Wahrnehmung des Systems „Umwelt“ nicht mehr durch eine Wiedergabe über Bildschirme, Kopfhörer, Lautsprecher oder andere visuelle oder auditive Schnittstellen verzerrt wird. Das SiD „ESD“ ist hier ein Prototyp mit einem sehr hohen Reifegrad. Je nach Validierungsziel sollte das ESD gemäß den Anforderungen des Zielsystems des aktiven Sound Designs eingebaut sein oder aber in einem der final angestrebten Integration des ASD/ESD entsprechenden Weise, um einen realistischen Eindruck des finalen Systems zu vermitteln. Eine Übersicht der Validierungskonfiguration bestehend aus System „Fahrzeug“ (SiD „Sound Design“ + Restfahrzeugmodell „reales Fahrzeug“) sowie dem Sul „Fahrende“ und dem System-Modell „Umwelt“ ist in Abbildung 9.8 zu sehen.

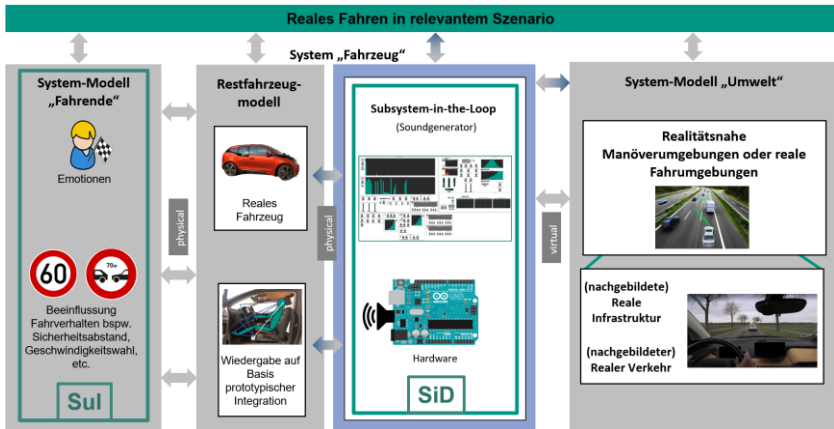


Abbildung 9.8: Validierungskonfiguration für die Validierung des entwickelten emotionalisierenden Sound Designs in realen Fahrten in Anlehnung an Albers und Behrendt et al. (2016)

Das System-Modell „Umwelt“ besteht in diesem Fall entweder aus spezifischen der Realität angenäherten Verkehrs-Subszenarien, die in hierfür konfigurierten Test- oder Versuchsstrecken umgesetzt wurden, oder aus realen Fahrten in für die Validierungsziele relevanten Verkehrs- und Straßenbereichen des realen Verkehrsnetzes. Die Validierungskonfiguration ist ebenfalls eine Closed-Loop-Konfiguration, da die Fahrenden durch ihr Verhalten eine Änderung des SiL „ESD“ vornehmen können. Die detaillierte Darstellung der Modellausprägungen innerhalb der Validierungskonfiguration ist in Abbildung 9.9 dargestellt.

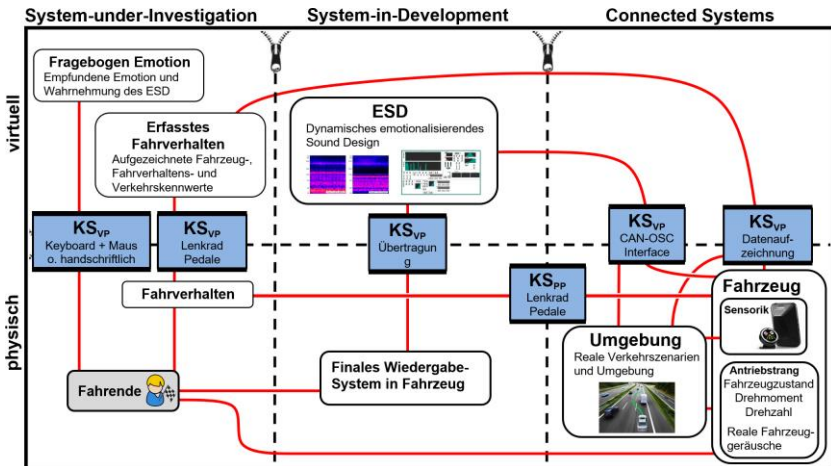


Abbildung 9.9: Beispielhafte Kombination von Modellausprägungen innerhalb der Validierungskonfiguration für die Validierung auf System-in-the-Loop-Ebene nach Yan et al. (2019)

Im Rahmen dieser Arbeit wurden keine Experimente mit Proband*innen innerhalb einer solchen Validierungskonfiguration durchgeführt. Es wurde jedoch im Rahmen der Entwicklung des gesamtheitlichen Validierungsframeworks ein technisches System geschaffen, das diese Validierungskonfiguration ermöglicht. Dieses wird im folgenden Kapitel beschrieben, um die *Unterfrage 2.2*: „Wie kann eine Validierungskonfiguration im Realfahrzeug technisch ermöglicht werden?“ zu beantworten.

9.2 CAN-OSC Interface als Koppelsystem zwischen emotionalisierendem Sound Design und Realfahrzeug

Um das ESD in einem realen Fahrzeug in der System-in-the-Loop-Ebene validieren zu können, muss dieses entsprechend des aktuellen Fahrzeugzustands sowie weiterer relevanter externer Parameter wie bspw. die Verkehrssituation in Echtzeit gesteuert werden können. Hierfür wurde ein Koppelsystem im Hardware/Software Co-Design entwickelt, das diese Echtzeit-Steuerung des Soundgenerators und damit des ESD ermöglicht und die Inkompatibilitäten zwischen dem SiD „ESD“ und dem System-Modell Fahrzeug bzw. externer Sensorik überwindet. Es besteht aus einem Teensy-Mikrocomputer und einem Matlab-Programm zur Konfiguration des Systems. Das System wurde mittels eines erweiterten Teensy-Mikrocontroller umgesetzt (Teensy® 4.0, 2024d). Ein Teensy-Mikrocontroller ist ein kompaktes Entwicklungsboard, das speziell für die Erstellung von Mikrocontroller-basierten Projekten konzipiert ist. Er verfügt über einen leistungsstarken Mikrocontroller und eine Vielzahl von analogen und digitalen Anschlüssen für verschiedene Eingabe- und Ausgabegeräte im Echtzeit-Betrieb. Das Board unterstützt verschiedene Programmiersprachen wie C und C++ und kann mit der Arduino-Software Entwicklungsumgebung programmiert werden. Das für die Implementierung der Schnittstelle verwendete Teensy-Hardwaresystem ist bereits vorkonfiguriert mit drei separaten Klemmen für eine CAN-Bus Verbindung sowie einem Ethernet-Lan-Modul für das Versenden und Empfangen von UDP oder TCP Nachrichten (SK Pang Electronics Ltd, 2024).

Die Eingangsgrößen für das Koppelsystem sind CAN-Bus-Daten (Nachrichten) des Fahrzeugs sowie möglicher notwendiger Zusatzsysteme wie externe Sensoren (Abstandskamera etc.). Die Ausgangsgrößen sind OSC-Signale (Kapitel 2.6.4.2), mit denen der Soundgenerator, und damit das ESD, gesteuert werden können.

Für die CAN Kommunikation mit dem Fahrzeug oder anderen externen Sensoren wird eine der Klemmen mit einem für CAN-Schnittstellen standardmäßigen D-Sub Stecker verbunden. Hierfür ist nur jeweils eine Verbindung zwischen den CAN Hi und CAN Lo Pins des D-Sub Steckers sowie der CAN-Bus Klemme erforderlich. Diese Verbindung sowie weitere, für eine initiale Konfiguration und Stromversorgung über USB sowie die Übertragung der OSC-Nachrichten an den Soundgenerator über Ethernet-Kabel, sind in Abbildung 9.10 dargestellt.

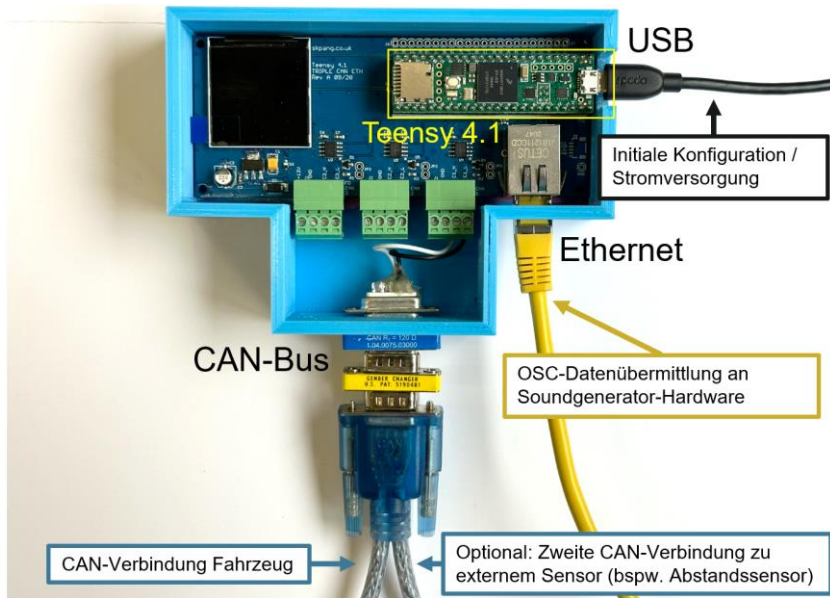


Abbildung 9.10: Draufsicht auf das verwendete Teensy-Board von SK Pang Electronics Ltd (2024) sowie die notwendigen Verbindungen.

Der Teensy-Mikrocontroller kann unter Verwendung des hierfür entwickelten Teensy-Packages (*Teensyduino: Software Setup for Teensy on Arduino IDE*, 2024e) in der Entwicklungsumgebung für das sehr verbreitete Arduino-Mikrocontroller-System (*Software | Arduino*, 2024c) programmiert werden. Für die Umsetzung dieser Fahrzeug-Sound Design-Schnittstelle wurde eine Kombination aus Arduino-Code, der als Grundprogramm auf dem Teensyboard läuft, und einem Matlab-Programm mit grafischer Oberfläche, das zur Konfiguration der dedizierten Arduino-Codes dient, unter anderem im Rahmen von durch den Autor dieser Arbeit co-betreuten Abschlussarbeiten entwickelt (Huang, 2022; Yao, 2018). Das Programm auf dem Teensy beinhaltet die generischen Algorithmen für das Empfangen von CAN-Bus Daten über die Hardwareschnittstelle, die Überführung von empfangenen CAN-Nachrichten in ein generisches Nachrichten-Array und der Umwandlung dieses Nachrichten-Arrays in dedizierte OSC-Nachrichten, die im Anschluss über ein UDP-Protokoll über den Ethernet-Port versendet werden.

können. Die Auswahl, welche CAN-Nachrichten des Fahrzeugs oder zusätzlicher Systeme bei dieser Übersetzung berücksichtigt werden sollen und in welchem Wertebereich diese als OSC-Nachrichten versendet werden, legt das zusätzliche Matlab-Programm innerhalb einer initialen Konfiguration fest. Die Konfiguration des Teensy wurde in ein Matlab-Programm ausgelagert, da eine Konfiguration des Teensy innerhalb der Arduino-Entwicklungsumgebung nur programmatisch vorgenommen werden könnte. Die Konfiguration wäre damit zeitaufwändig und würde ein tieferes Verständnis für CAN-Nachrichten und OSC-Nachrichten voraussetzen. Für die initiale Konfiguration des Teensy sowie der Versorgung des Teensy mit Strom während der Durchführung der Validierung wird der Teensy mittels eines Micro-USB-Kabels an den Laptop angeschlossen. Die grafische Benutzeroberfläche des Matlab-Programms zur Konfiguration ist in Abbildung 9.11 dargestellt.

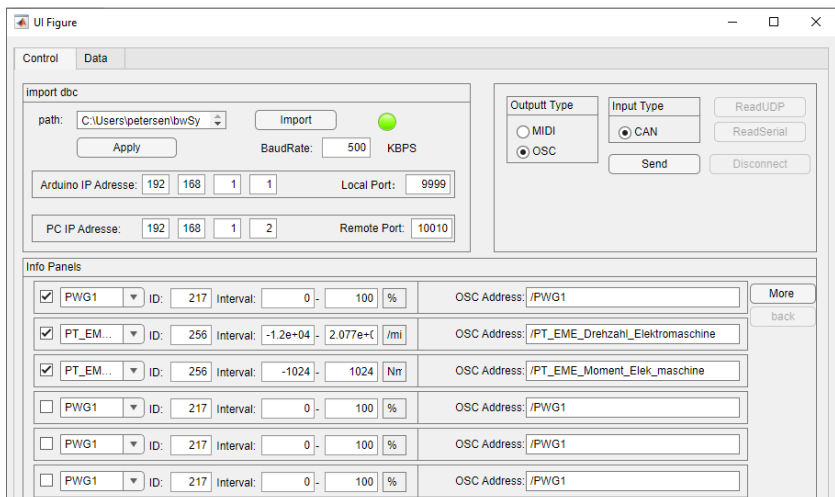


Abbildung 9.11: Grafische Benutzeroberfläche des Matlab-Programms zur Konfiguration des Teensy zur Übersetzung der CAN-Bus Nachrichten.

Über den Import-Knopf können eine oder sequenziell mehrere *.dbc-Files geladen werden. *.dbc-Files enthalten die notwendigen Informationen, um CAN-Nachrichten decodieren zu können. Sind die *.dbc-Files geladen, kann im Reiter „Data“ eine Übersicht der CAN-Nachrichten eingesehen werden. Diese können über einen Eintrag einer „1“ in der ersten Spalte für die Übersetzung in OSC-Nachrichten aktiviert werden. Beim Laden mehrerer *.dbc-Files werden die erstellten

Einzelstabellen als eine Gesamtstabelle aneinandergereiht. Ein Ausschnitt dieser Tabelle auf Basis der *.dbc-Dateien eines E-Fahrzeugs ist in Abbildung 9.12 zu sehen.

UI Figure

Control	Data								
Select	Name	ID	Units	Maximum	Minimum	StartBit	SignalSize	Factor	Offset
1	PT_EME_Drehzahl_Elektromaschine	256	/min	2.0768e+04	-12000	24	16	0.5000	-1
1	PT_EIME_Moment_Elek_maschine	256	Nm	1024	-1.0235e+03	12	12	0.5000	-1.0235
0	PT_EME_Wspannung_am_Ladeger...	264	V	255	0	0	8	1	
0	PT_SME_Ladezustand_HV_Batterie	274	%	100	0	32	10	0.1000	
0	PT_SME_Spannung_der_HV_Batte...	274	V	819	0	16	13	0.1000	
0	PT_SME_Strom_der_HV_Batterie	274	A	819.1000	-819.2000	0	14	0.1000	-819
0	PT_RIS	202		1	0	48	1	1	

Abbildung 9.12: Ausschnitt aus der Tabelle zur Auswahl und Prüfung der CAN-Nachrichten zu Übersetzung in OSC-Daten.

Nach der Aktivierung der gewünschten CAN-Nachrichten gelangt der Benutzer über den Reiter „Control“ auf die Hauptoberfläche zurück. Hier kann mit dem Button „Apply“ die Auswahl der gewünschten CAN-Nachrichten übernommen werden. Des Weiteren werden hierdurch die jeweiligen Reihen im tabellarischen „Info Panel“ mit den ausgewählten CAN-Nachrichten sowie den zugehörigen Eigenschaften im linken Bereich befüllt. Wenn notwendig, könnten in diesem Bereich Änderungen am Wertebereich der CAN-Nachrichten vorgenommen werden. Des Weiteren kann in der Eingabemaske oben die für die UDP-Kommunikation relevante IP-Adresse des verwendeten Ports des Teensy sowie des empfangenden Computers, auf dem der Soundgenerator läuft, eingestellt werden. In der rechten Spalte des „Info Panels“ kann der für den Empfang von OSC-Daten notwendige Header-Name der OSC-Nachricht für jede korrespondierende CAN-Nachricht eingegeben werden. Initial sind diese immer entsprechend der Namensgebung der CAN-Nachrichten im *.dbc-File benannt. Durch den „More“-Button rechts der OSC-Headernamen-Reihen gelangt man in die Einstellungen für gesendeten OSC-Nachrichten (Abbildung 9.13). Hier kann die Auflösung der übertragenen OSC-Nachrichten gewählt werden. Eine Auflösung von 14-Bit ist die empfohlene Standardeinstellung, eine Deaktivierung des Häkchens führt zu einer 7-Bit Auflösung. Des Weiteren kann hier der Wertebereich für die Übersetzung der CAN-Nachrichten in die OSC-Nachrichten festgelegt werden.

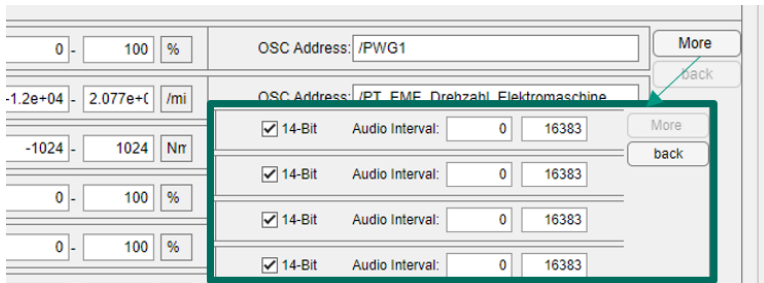


Abbildung 9.13: Einstellungsmöglichkeiten des Wertebereichs für die OSC-Ausgabedaten.

Sind alle Einstellungen vorgenommen, so können diese mittels des „Send“-Buttons oben rechts in der Oberfläche an das Teensy gesendet werden. Hierdurch wird zusätzlich der Datenempfang von den CAN-Bus Quellen und die Datensendung an den OSC-Nachrichten Empfänger (Laptop mit Soundgenerator) am Teensy aktiviert. Zur besseren Übersicht sind die Interaktionen der einzelnen Komponenten für einen beispielhaften Aufbau mit einem Fahrzeug und einer externen Kamera zur Messung des Sicherheitsabstands in Abbildung 9.14 schematisch dargestellt.

Mittels des entwickelten Koppelsystems kann der Soundgenerator eines ESD gesteuert werden, und dann mit dem Gewünschten Ausgabesystem für das ESD im Fahrzeug verbunden werden, und eine Validierung des ESD im Realfahrzeug entsprechend der Validierungsziele durchgeführt werden. Damit ist *Unterfrage 2.2* beantwortet:

Unterfrage 2.2: Wie kann eine Validierungskonfiguration im Realfahrzeug technisch ermöglicht werden?

Nach Vorstellung der technischen Lösung zur Validierung im Realfahrzeug sind damit alle 4 Ebenen eines möglichen Validierungsframeworks sowie dessen Validierungskonfigurationen für die Validierung eines ESD beschrieben, und damit *Unterfrage 2.1* beantwortet:

Unterfrage 2.1: Wie kann ein notwendiges XiL-Validierungsframework, sowie dessen Validierungskonfigurationen für eine kontinuierliche Validierung von initialen Einzelsounds bis zur prototypischen Umsetzung des emotionalisierenden Sound Designs auf Basis des IPEK-XiL-Ansatzes gestaltet sein?

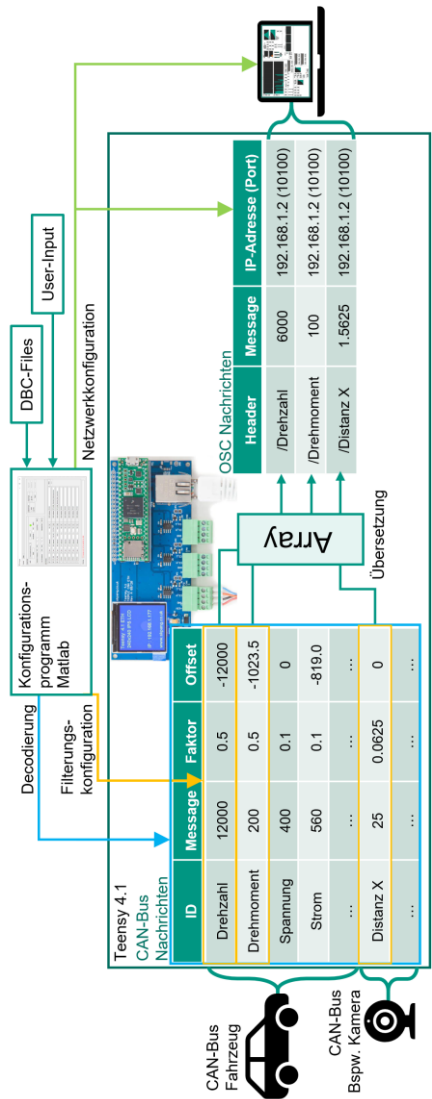


Abbildung 9.14: Schematische Übersicht der Ein- und Ausgangsdaten sowie der internen Datenverarbeitungsstruktur des Teensy-basierten Hardwaresystems

10 Ableitung einer Methodik zur kontinuierlichen Validierung eines emotionalisierenden Sound Designs

Mit dem entwickelten XiL-Validierungsframework sowie dessen Validierungskonfigurationen kann eine Validierung eines ESD durchgeführt werden. Um die Validierungstätigkeiten im Rahmen des Entwicklungsprozesses eines ESD weiter zu unterstützen, soll zusätzlich innerhalb dieses Kapitels eine Validierungsmethodik abgeleitet werden, mit der *Unterfrage 2.3* beantwortet werden kann. Diese lautet:

Unterfrage 2.3: Wie kann eine abgeleitete notwendige Validierungsmethodik bestehend aus Validierungstätigkeiten für eine kontinuierliche Validierung emotionalisierender Sound Designs von initialen Einzelsounds bis zur prototypischen Umsetzung des Sound Designs auf Basis der durchgeführten Untersuchungen sowie des entwickelten XiL-Validierungsframework gestaltet sein?

Die zur Beantwortung dieser Frage abzuleitenden Methodik für den kontinuierlichen Validierungsprozess des ESDs basiert auf dem kontinuierlichen Validierungsansatz und dem IPEK X-in-the-Loop-Ansatz, wie im Stand der Forschung in Kapitel 2.1.2 und 2.1.3 beschrieben (Albers et al., 2010; Albers, Behrendt et al., 2016). Die einzelnen Validierungsschritte der Methodik wurden aus den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen (Kapitel 5, 7, 8) abgeleitet. Des Weiteren basiert die Methodik auf dem in Kapitel 9.1 beschriebenen XiL-Framework sowie den Konfigurationen für die Validierung von ESDs. Da im Rahmen dieser Arbeit nur eine mögliche Form eines ESD entwickelt und validiert wurde, kann eine daraus abgeleitete Methodik den Anspruch an eine Allgemeingültigkeit nicht erfüllen. Dennoch sollte die abgeleitete Methodik für die Validierung einer Vielzahl von möglichen Manifestationen eines ESD anwenderbar sein oder einen unterstützenden Mehrwert bieten.

Gemäß dem ZHO-Modell (Kapitel 2.1.1) bedingen das aktuelle Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem innerhalb des aktuellen Fortschrittes des Entwicklungsprozesses eines ESD die Validierungsziele und dementsprechend die Validierungskonfigurationen und Validierungstätigkeiten (Albers, Behrendt et al., 2016). Um dem Anspruch der kontinuierlichen Validierung gerecht zu werden, muss die abgeleitete Validierungsmethodik die Validierung des ESD von der Element-

Ebene in einer frühen Phase des Entwicklungsprozesses (vages Zielsystem, großer, diffuser möglicher Lösungsraum) bis hin zur Validierung der prototypischen Umsetzung des ESD (finales Zielsystem, stark eingegrenzter Lösungsraum) auf Gesamtsystemebene gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes (Albers, Behrendt, Schroeter, Ott & Klingler, 2008) unterstützen. Der generelle Ansatz dieser kontinuierlichen Validierungsmethodik mit dem Ziel des Erkenntnisgewinns ist dabei, dass das Sul „Fahrende“ außerhalb des SiD „ESD“ liegt, gemäß Albers und Behrendt et al. (2016). Der Erkenntnisgewinn erfolgt dabei über die Erfassung der Wirkung des ESD auf das Sul „Fahrende“. Aus diesem Grund erfolgt die Validierung innerhalb der Methodik stets im Rahmen von Probandenversuchen mit Teilnehmenden – die übliche Fahrende repräsentieren – in unterschiedlichen Validierungskonfigurationen, die auf die verschiedenen Reifegrade des ESD abgestimmt sind (Kapitel 9.1). Im Zuge des Validierungsprozesses wird dabei kontinuierlich die Anwendungsnähe (z. B. Realitätsgrad oder Abbildungsgrad des Restfahrzeugmodells) erhöht und die Zusammensetzung der Validierungskonfiguration (virtuell, gemischt virtuell-physisch, physisch) angepasst, um die externe Validität der resultierenden Erkenntnisse bzgl. der Wirkung des SiD auf das Sul zu steigern. Eine Darstellung dieses allgemeinen Rahmens der Validierungsmethodik am Beispiel der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchung (mit Ausnahme der Validierung in realer Fahrt) mit fortschreitender Eingrenzung des Lösungsraums Sounds/Sound Design sowie der Steigerung der Realitätsnähe bzw. der externen Validität ist in Abbildung 10.1 dargestellt. Die tatsächliche Anzahl der Sounds und Sound Designs in den jeweiligen Validierungsschritten hängt vom Handlungssystem sowie dem möglichen oder geplanten Umfang der Validierung ab.

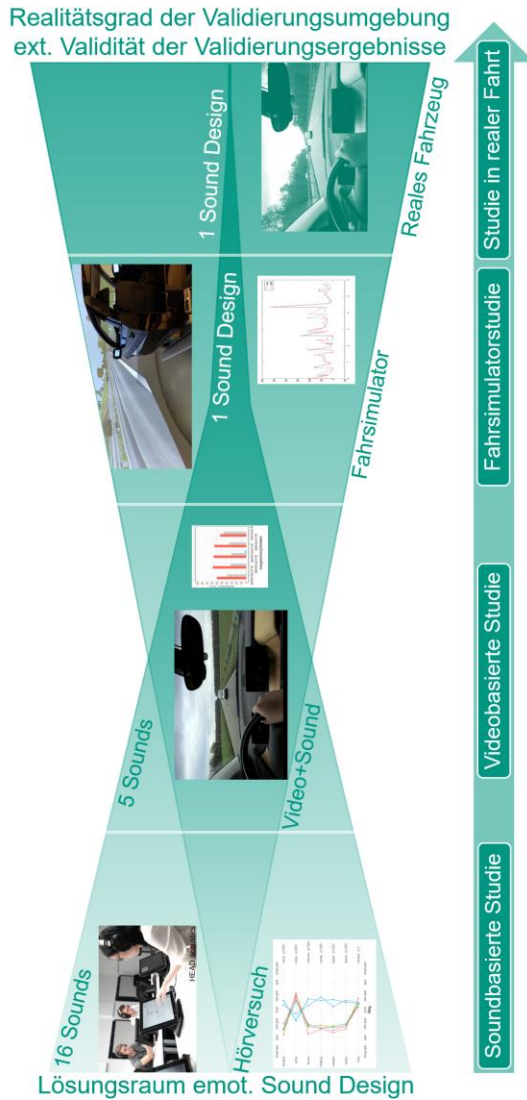


Abbildung 10.1: Abstrahierter methodischer Ansatz zur kontinuierlichen Validierung für emotionalisierende Sound Designs

Die folgenden 4 Validierungsschritte bilden dabei die primären Validierungstätigkeiten innerhalb der Methodik zur kontinuierlichen Validierung eines ESD. Jeder dieser Schritte umfasst die für die Validierung relevanten Teil-Aktivitäten *Bewertung*, *Objektivierung* und *Verifikation* (Albers, Behrendt et al., 2016). Im Rahmen des Entwicklungsprozesses werden die jeweiligen Validierungsschritte mehrfach durchlaufen, bis die Validierungsergebnisse zeigen, dass die entwickelten Sounds oder das Sound Design als Teil des Objektsystems das Zielsystem hinsichtlich der angestrebten emotionalen oder beeinflussenden Wirkung in Bezug auf Fahrende für den jeweiligen Entwicklungsschritt erfüllen.

- **Validierungsschritt 1:** Validierung der emotionalen Wirkung von entwickelten Sounds als Grundlage für das ESD
- **Validierungsschritt 2:** Validierung der Wirkung der entwickelten Sounds auf die Wahrnehmung von fahrverhaltensrelevanten Parametern
- **Validierungsschritt 3:** Validierung der Wirkung des ESD auf das Fahrverhalten in einem Fahrsimulator
- **Validierungsschritt 4:** Weiterführende Validierung des ESD während des realen Fahrens

Im Folgenden werden die Validierungsschritte innerhalb der Methodik näher erklärt.

10.1 Validierungsschritt 1: Validierung der emotionalen Wirkung von entwickelten Sounds

Dieser Schritt erfolgt in einem sehr frühen Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses des ESD und besteht grundsätzlich aus dem Vorgehen in Kapitel 5. Zu diesem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess wurde im Zielsystem mindestens festgelegt, welche Art von Emotionen zur Beeinflussung des Fahrverhaltens mit dem Sound Design genutzt werden sollen. Auf Basis des Ressourcensystems wurde dann bereits eine Menge unterschiedlicher Sounds entwickelt, die die entsprechenden Emotionen in mit diesen Sounds stimulierten Personen hervorrufen sollen. Die Überprüfung der Erfüllung des Zielsystems durch das Objektsystem im Rahmen der Validierung erfolgt dann auf Element-Ebene (nur Sounds) mittels des Sul „Fahrende“, repräsentiert durch Teilnehmende einer verdeckten Probandenstudie gemäß der in Kapitel 9.1.1 beschriebenen Element-in-the-Loop-Validierungskonfiguration. Für die Bewertung müssen in diesem Schritt die emotionalen Reaktionen der Teilnehmenden auf die Stimulation mit den Sounds erfasst werden. Dies kann wie

in Kapitel 5 beschrieben mittels existierender Skalen oder Item-Sammlungen zur Messung von Emotionen erfolgen, um daraus verwertbare und analysierbare Zahlenwerte zu generieren, die für den Objektivierungsschritt verwendet werden können. Für die Objektivierung werden weiterhin objektive Messgrößen in diesem Validierungsschritt erfasst. Im Kontext von Sounds eignen sich hierfür die Vielzahl von akustischen Analysegrößen wie bspw. Schalldruckpegelverläufe, Spektrogramme oder auch die in dieser Arbeit verwendeten psychoakustischen Größen, bspw. Schärfe, Rauigkeit oder Impulshaltigkeit, mit denen die Klangcharakteristiken der Sounds erfasst und quantifiziert werden können. Mit den Bewertungsgrößen sowie den objektiven Klangcharakteristik-Messgrößen kann im Anschluss der für die Objektivierung wichtige Schritt der Ermittlung von Zusammenhängen mittels passender statistischer Verfahren (Kapitel 2.7.3) erfolgen. In der vorliegenden Arbeit waren dies die Korrelationen zwischen den gefühlten und assoziierten Emotionen beim Hören der Sounds sowie den psychoakustischen Größen (Kapitel 2.5). Final kann anhand von angestrebten Grenzwerten (bspw. 80 % der Teilnehmenden müssen die angestrebten Emotionen empfinden) eine Verifikation der Erfüllung des Zielsystems durch die entwickelten Sounds erfolgen. Auf Basis der Ergebnisse der Validierung muss dann entweder eine Neuentwicklung der Sounds bei Nichterfüllung des Zielsystems oder die Auswahl und eine möglicherweise notwendige Optimierung der effektivsten Sounds auf Basis der Erkenntnisse der Objektivierung erfolgen. Eine schematische Darstellung zur Übersicht des Validierungsschritt 1 ist in Abbildung 10.2 zu sehen.

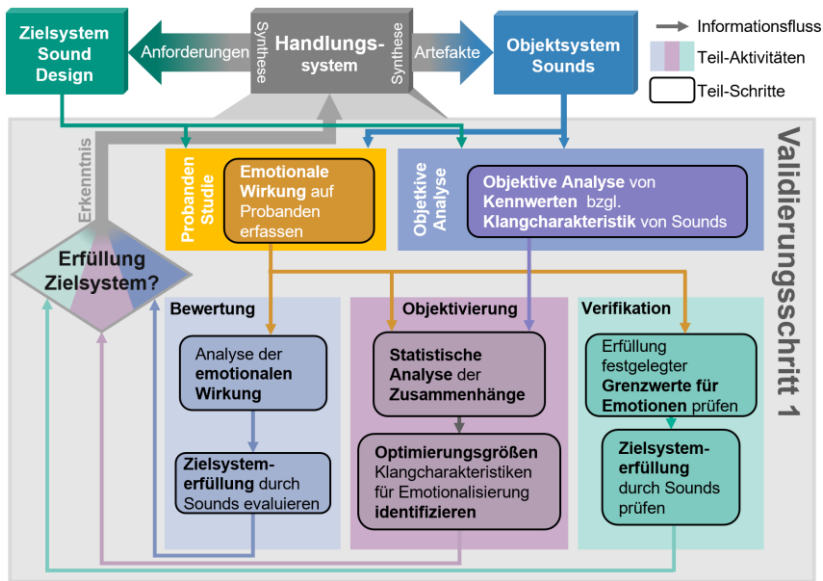


Abbildung 10.2: Schematische Darstellung zur Übersicht von Validierungsschritt 1 zur Validierung der emotionalisierenden Wirkung von Sounds

10.2 Validierungsschritt 2: Validierung der Wirkung der entwickelten Sounds auf die Wahrnehmung

Schritt 2 erfolgt im Anschluss der Auswahl oder Optimierung im Rahmen des Entwicklungsprozesses des ESD und besteht grundsätzlich aus dem Vorgehen in Kapitel 7. Zu diesem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess wurde im Zielsystem zusätzlich festgelegt, welche Fahrverhaltensparameter durch das Sound Design beeinflusst werden sollen. Im Rahmen der Validierungstätigkeit in Validierungsschritt 2 wird die Wirkung der nachweislich emotionalisierenden Sounds (Objektsystem) auf die Wahrnehmung von in Videos dargestelltem bspw. fehlerhaftem oder riskantem Fahrverhalten getestet. Des Weiteren können auf Basis der Erkenntnisse aus Schritt 1 optimierte Sounds in diesem Validierungsschritt erneut hinsichtlich ihrer emotionalen Wirksamkeit validiert werden. Dies erfolgt innerhalb Schritt 2 analog zu Schritt 1. Dabei ist jedoch wichtig, die hierfür

notwendige Datenerhebung an das Ende der Versuche zu stellen, um die Überprüfung bzgl. Wirkung der Sounds auf die Wahrnehmung der gezeigten Inhalte nicht zu beeinflussen. Die Überprüfung der Erfüllung des Zielsystems hinsichtlich der Beeinflussung der Wahrnehmung im Rahmen der Validierung erfolgt auf Subsystemebene (Video/Sound-Kombinationen) erneut mittels des Sul „Fahrende“. Diese werden repräsentiert durch Teilnehmende einer verdeckten Probandenstudie gemäß der in Kapitel 9.1.2 beschriebenen Subsystem-in-the-Loop-Validierungskonfiguration (Layer 2).

Für die Bewertung der Beeinflussungswirkung muss in diesem Schritt die Wahrnehmung der Teilnehmenden bzgl. des dargestellten Fahrverhaltens bzw. der dargestellten Fahrverhaltensparameter (bspw. Sicherheitsabstand) erfasst werden. Dies kann, wie in Kapitel 7.1.4 beschrieben, mittels Angaben der Teilnehmenden zu subjektiver Bewertung, (Ein-)Schätzung und gewünschter Änderung bzgl. dem gezeigten Fahrverhalten oder dem Fahrverhaltensparameter erfolgen. Die Informationen der Teilnehmenden sind dabei so einzuholen, dass analysierbare und statistisch verwertbare Zahlenwerte entstehen, die für den Objektivierungsschritt verwendet werden können. In der durchgeführten Untersuchung (Kapitel 7), auf dem dieser Validierungsschritt der abgeleiteten Validierungsmethodik aufbaut, wurden erneut objektive Kennwerte bzgl. der Klangcharakteristiken (psychoakustische Kennwerte) erhoben. Diese wurden im Rahmen der getätigten Untersuchung nur für einen objektiven Abgleich zwischen den für Studie 1 erstellten Sounds und den neuen, mit dem entwickelten Soundgenerator generierten Sounds verwendet. Diese objektiven Kennwerte bzgl. der Klangcharakteristiken können innerhalb der Objektivierung im vorliegenden Validierungsschritt bei einer entsprechenden Menge an Sounds jedoch auch dazu genutzt werden, Zusammenhänge zwischen den Klangcharakteristiken sowie der Wahrnehmung des Sul „Fahrende“ zu ermitteln. Hierdurch können Optimierungspotenziale der Klangcharakteristiken in Bezug auf einen wahrnehmungsbeeinflussenden Effekt identifiziert werden. Darüber hinaus können im Rahmen der Objektivierung durch die Verwendung statistischer Verfahren (Kapitel 2.7.3), die primär mit den arithmetischen Mittelwerten der Angaben statt den individuellen Einzahlwerten arbeiten, trotzdem intersubjektive Zusammenhänge zwischen der Bewertung, (Ein-)Schätzung und dem Wunsch zur Änderung sowie den unterschiedlichen Sounds oder Sound-Paaren untersucht und überprüft werden. Aufgrund der innerhalb dieser Validierungskonfiguration noch eher geringen externen Validität und fehlenden Erfahrungswerten über diese Forschungsarbeit hinaus ist es schwierig, eine Verifikation auf Basis von Absolutwerten bzgl. der Erfüllung des Zielsystems durch die entwickelten Sounds durchzuführen. Ein Vergleich mit anderen hinweisenden Fahrassistenzsystemen innerhalb des Validierungsschrittes könnte hier eine absolute Einschätzung der Effektivität der Sounds oder Sound-Paare innerhalb von Videos zumindest

annähern. Ungeachtet dessen kann jedoch ein relativer Vergleich der Wirkung unterschiedlicher Sounds oder Sound-Paare erfolgen, auf Basis dessen der effektivste Sound oder das effektivste Sound-Paar innerhalb des Objektsystems identifiziert werden kann. Sollten die Validierungsergebnisse keine signifikante Wirkung der Sounds/Sound-Paare auf die Wahrnehmung zeigen, muss entweder eine Neuentwicklung oder Optimierung der Sounds erfolgen, um den emotionalen Effekt zu erhöhen, das Versuchsdesign angepasst werden oder bei wiederholter Nichterfüllung des Zielsystems der Anwendungsfall für das ESD überdacht werden. Eine schematische Darstellung zur Übersicht des Validierungsschritt 2 ist in Abbildung 10.3 zu sehen.

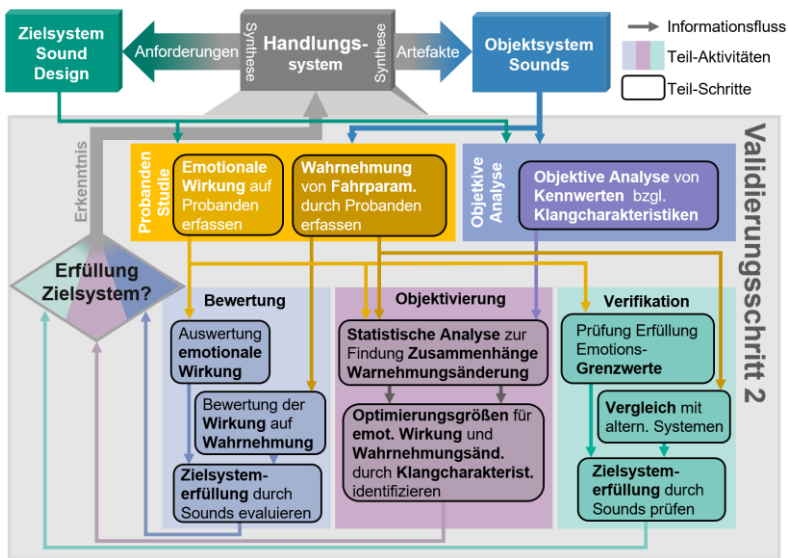


Abbildung 10.3: Schematische Darstellung zur Übersicht von Validierungsschritt 2 zur Validierung der Wirkung emotionalisierender Sounds auf die Wahrnehmung von Fahrverhaltensparametern

10.3 Validierungsschritt 3: Validierung der Wirkung des emotionalisierenden Sound Designs auf das Fahrverhalten

Schritt 3 erfolgt im Anschluss der Auswahl oder Optimierung im Rahmen des Entwicklungsprozesses des ESD auf Basis der Erkenntnisse aus Validierungsschritt 2

2 und besteht aus dem Vorgehen in Kapitel 8. Zu diesem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess wurde im Zielsystem das gesamtheitliche dynamische ESD auf Basis der bisher validierten einzelnen Sounds oder Sound-Paare festgelegt. Des Weiteren sollten, sofern es das Ressourcensystem zulässt, initiale quantifizierbare Zielwerte für die Beeinflussung des Fahrverhaltens hinsichtlich bspw. der Verbesserung der Verkehrssicherheit in das Zielsystem aufgenommen werden. Im Rahmen der Validierungstätigkeit in Validierungsschritt 3 wird die Wirkung des prototypisch implementierten ESD auf das Fahrverhalten in einem Fahrsimulator getestet. Des Weiteren können bei einem Vergleich mehrerer Sound Designs diese auf Basis des Vorgehens in Kapitel 8.2.5 hinsichtlich ihrer emotionalen Wirkung validiert werden. Die Überprüfung der Erfüllung des Zielsystems hinsichtlich der Beeinflussung des Fahrverhaltens erfolgt auf Subsystemebene (Fahren in gemischt virtuell-physischem Fahrzeug in virtueller Umgebung + ESD) erneut mittels des Sul „Fahrende“, repräsentiert durch Teilnehmende einer verdeckten Probandenstudie gemäß der in Kapitel 9.1.3 beschriebenen Subsystem-in-the-Loop-Validierungskonfiguration (Layer 1).

Für die Bewertung kann in diesem Schritt die durch die Teilnehmenden angegebene emotionale Empfindung des affektiven Stimulus erfasst werden. Zusätzlich kann auch erfasst werden, mit welchem Fahrverhaltensparameter oder mit welcher Verkehrssituation Teilnehmende das ESD assoziiert haben, um zu ermitteln, ob das ESD ausreichend schnell und intuitiv korrekt assoziiert wurde. Dies kann, wie in Kapitel 8.2.5 beschrieben, mittels Angaben der Teilnehmenden innerhalb eines Fragebogens am Ende der Studie erfolgen. Die Analyse erfolgt in diesem Validierungsschritt auf Basis der relevanten gemessenen Fahrzeug- und Fahrverhaltenskennwerte. Der Fahrsimulator sollte diese als analysierbare und statistisch verwertbare Zahlenwerte aufzeichnen und exportieren können. Diese Kennwerte sind ebenfalls für die Objektivierung relevant. Einerseits kann damit direkt die Fahrverhaltensänderung von Probanden quantifiziert werden. Zusätzlich kann mittels der passenden statistischen Verfahren (Kapitel 2.7.3) ein intersubjektiver Einfluss zwischen bspw. Klangcharakteristiken, in denen sich die validierten ESD unterscheiden, auf das Fahrverhalten untersucht und überprüft werden (Kapitel 8.2). Die externe Validität der Ergebnisse dieses Validierungsschritts hängt primär von der externen Validität der Validierungskonfiguration Fahrsimulator und der realitätsnähe der Integration des ESD ab. Deshalb muss auf Basis des Wissens über die zu erwartende externe Validität entschieden werden, ob eine absolute Validität angenommen werden kann und damit eine finale Verifikation („Das ESD wurde korrekt entwickelt.“) durchgeführt werden kann, oder ob nur ein relativer Vergleich bzgl. der Wirksamkeit der validierten ESD möglich ist. In diesem Validierungsschritt wäre zusätzlich ein

Vergleich mit anderen hinweisenden Fahrassistenzsystemen zur Einschätzung der Wirksamkeit des ESD möglich.

Sollten die Validierungsergebnisse eine Verfehlung der angestrebten Wirkung auf das Fahrverhalten zeigen, muss entweder eine Neuentwicklung oder Optimierung des Sound Designs erfolgen. Einerseits muss sichergestellt werden, dass die Sound-Paare, deren effektive Wirkung auf die Emotionen und Wahrnehmung in vorherigen Validierungsschritten bereits überprüft wurde, funktionserfüllend in das Sound Design überführt werden. Andererseits muss auf Basis der Erkenntnisse bzgl. der Wahrnehmung des Sound Design potenziell auch die Proportionalität zwischen Fahrverhalten/Fahrzeugparameter und dynamischer Änderung des Sound Designs angepasst werden. Alternativ muss das Versuchsdesign für die Validierung möglicherweise hinterfragt oder aber bei wiederholter Nichterfüllung des Zielsystems der Anwendungsfall überdacht werden. Eine schematische Darstellung zur Übersicht des Validierungsschritt 3 ist in Abbildung 10.4 zu sehen.

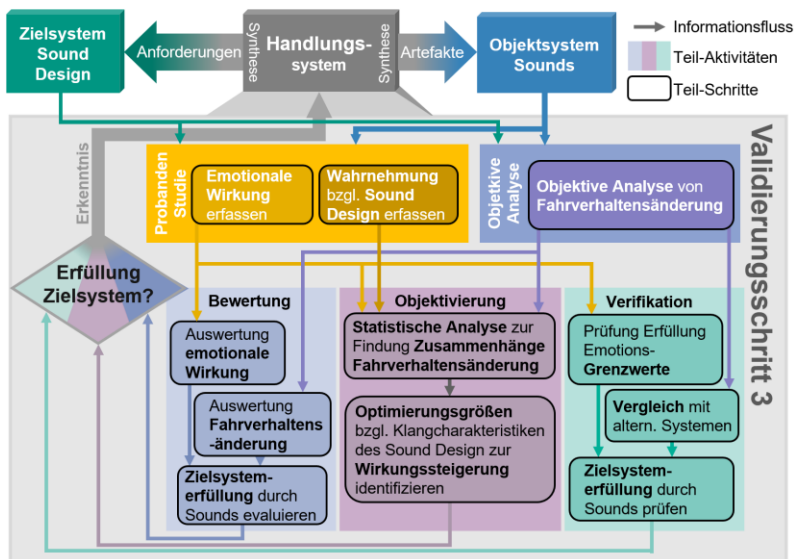


Abbildung 10.4: Schematische Darstellung zur Übersicht von Validierungsschritt 3 zur Validierung der Wirkung des emotionalisierenden Sound Design auf das Fahrverhalten in einem Fahrsimulator.

10.4 Validierungsschritt 4: Weiterführende Validierung des emotionalisierenden Sound Designs während des realen Fahrens

Schritt 4 erfolgt im Anschluss der Auswahl oder Optimierung des virtuell prototypischen ESD auf Basis der Erkenntnisse aus Validierungsschritt 3. Dieser Schritt wurde in der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt. Es wurde jedoch eine Validierungskonfiguration auf Basis einer entwickelten technischen Lösung aufgezeigt (Kapitel 9.2), die diese Validierungstätigkeit ermöglicht. Zu diesem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess wurde im Zielsystem das finale dynamische ESD auf Basis von Validierungsschritt 3 im Fahrsimulator festgelegt. Zusätzlich wurden quantifizierbare Zielwerte für die Beeinflussung des Fahrverhaltens hinsichtlich der Verbesserung der Verkehrssicherheit im Vergleich mit anderen Fahrerassistenzsystemen die funktionsähnlich oder -gleich sind, in das Zielsystem aufgenommen. Im Rahmen der Validierungstätigkeit in Validierungsschritt 4 wird die Wirkung des prototypisch final implementierten und in das Gesamtsystem Fahrzeug integrierten ESD auf bspw. das Fahrverhalten in realen Fahrten getestet. Die extrem hohe Validität innerhalb dieses Validierungsschritts sowie die Möglichkeit für Langzeitstudien ermöglicht eine finale Überprüfung diverser Validierungsziele wie bspw. bzgl. einer Veränderung der Wirksamkeit des ESD aufgrund eines Gewöhnungseffektes über einen längeren Zeitraum oder die tatsächliche Akzeptanz durch Fahrende eines solchen Systems in natürlichem Fahrkontext. Dem gegenüber steht jedoch eine deutliche Reduktion der Sicherheit des Sul „Fahrende“ sowie der Wiederholbarkeit innerhalb der Datenerhebungsphase während der Validierung. Die Überprüfung der Erfüllung des Objektsystems hinsichtlich des Zielsystems erfolgt auf Gesamtsystemebene (Fahren in realem Fahrzeug) erneut mittels des Sul „Fahrende“, repräsentiert durch Teilnehmende einer, je nach Studiendauer und Umsetzung des ESD, zumindest initial verdeckten Probandenstudie gemäß der in Kapitel 9.1.4 beschriebenen System-in-the-Loop-Validierungskonfiguration.

Für die Bewertung kann in diesem Schritt die durch die Teilnehmenden angegebene ganzheitliche Empfindung und Wahrnehmung des ESD erfasst werden. Hierfür bietet sich eine Kombination aus einer qualitativen (bspw. Interviews, von Teilnehmenden geführte Tagebücher, Selbstangaben während der Fahrt) sowie quantitativen (Fragebögen, Skalen etc.) Datenerhebung entsprechend der Validierungsziele an. Die Analyse erfolgt in diesem Validierungsschritt auf Basis der relevanten erfassten Daten über das Sul „Fahrende“ sowie die gemessenen Fahrzeug- und Fahrverhaltenskennwerte. Bzgl. des Gesamtsystem Fahrzeugs sollten diese als analysierbare und statistisch verwertbare Zahlenwerte aufgezeichnet werden können. Diese Kennwerte sind ebenfalls für den

Objektivierungsschritt relevant. Einerseits kann damit direkt die Fahrverhaltensänderung eines jeden Probanden quantifiziert werden. Zusätzlich kann mittels der passenden statistischen Verfahren (Kapitel 2.7.3) ein Einfluss auf das Fahrverhalten analog zur Validierung im Fahrsimulator untersucht und überprüft werden (Kapitel 8.2). Die externe Validität der Ergebnisse dieses Validierungsschritts kann als sehr hoch angenommen werden. Deshalb ist dieser Validierungsschritt sehr gut dazu geeignet, die Verifikation, und damit die Überprüfung, ob das ESD korrekt entwickelt wurde, durchzuführen. Hierzu kann in diesem Validierungsschritt auch ein Vergleich mit anderen hinweisenden Fahrassistenzsystemen zur Verifikation des ESD erfolgen. Sollten die Validierungsergebnisse ein ungünstiges Verhältnis zwischen Wirkung (kurzfristig und langfristig) und Akzeptanz aufzeigen, muss entweder eine Neuentwicklung oder Optimierung des Sound Designs erfolgen, um das entwickelte Sound Design als Mehrwert im Mobilitätskontext zu etablieren. Alternativ muss bei wiederholter Nichterfüllung des Zielsystems der Anwendungsfall oder das ESD als solches überdacht werden. Eine schematische Darstellung zur Übersicht des Validierungsschritt 4 ist in Abbildung 10.5 zu sehen.

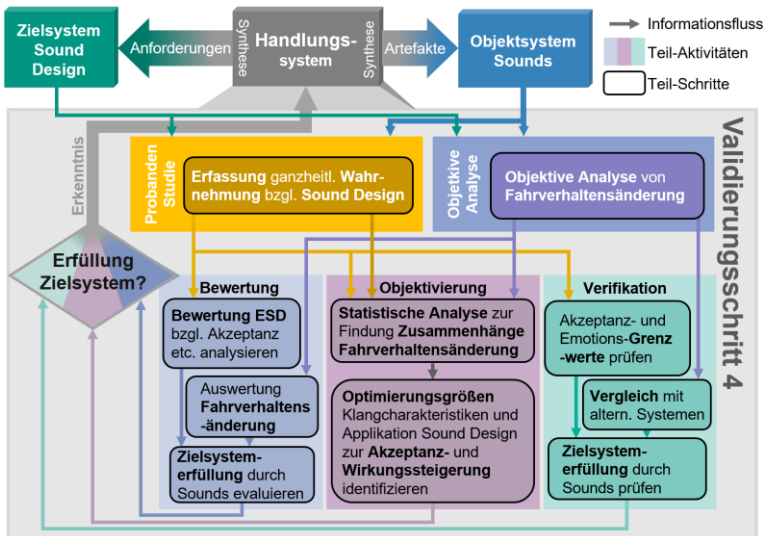


Abbildung 10.5: Schematische Darstellung zur Übersicht von Validierungsschritt 4 zur Validierung der Wirkung des emotionalisierenden Sound Design auf das Fahrverhalten in einem realen Fahrzeug.

In Abbildung 10.6 ist zusätzlich eine übersichtliche Darstellung der Integration aller Validierungsschritte der Validierungsmethodik über einen beispielhaften Entwicklungsprozess eines emotionalisierenden Sound Design dargestellt.

Die Validierungsmethodik abgeleitet aus den durchgeführten Untersuchungen gemäß den Anforderungen an eine Validierung sowie den hierfür notwendigen Validierungsaktivitäten mit deren Teil-Aktivitäten im Forschungsstand der KaSPro auf Basis des entwickelten XiL-Validierungsframeworks ist damit umfassend beschrieben, und beantwortet damit die Forschungsfrage dieses Kapitels:

Unterfrage 2.3: Wie kann eine abgeleitete notwendige Validierungsmethodik bestehend aus Validierungstätigkeiten für eine kontinuierliche Validierung emotionalisierender Sound Designs von initialen Einzelsounds bis zur prototypischen Umsetzung des Sound Designs auf Basis der durchgeführten Untersuchungen sowie des entwickelten XiL-Validierungsframework gestaltet sein?

Mit den gesamtheitlichen Ergebnissen aus den Kapiteln 9 und 10 wurde damit auch die *Hauptforschungsfrage 2* beantwortet:

Hauptforschungsfrage 2: Welche Validierungsmethodik sowie ein hierfür notwendiges XiL-Validierungsframework für eine kontinuierliche Validierung emotionalisierender Sound Designs von initialen Einzelsounds bis zur prototypischen Umsetzung des Sound Designs kann aus den durchgeführten Untersuchungen abgeleitet werden?

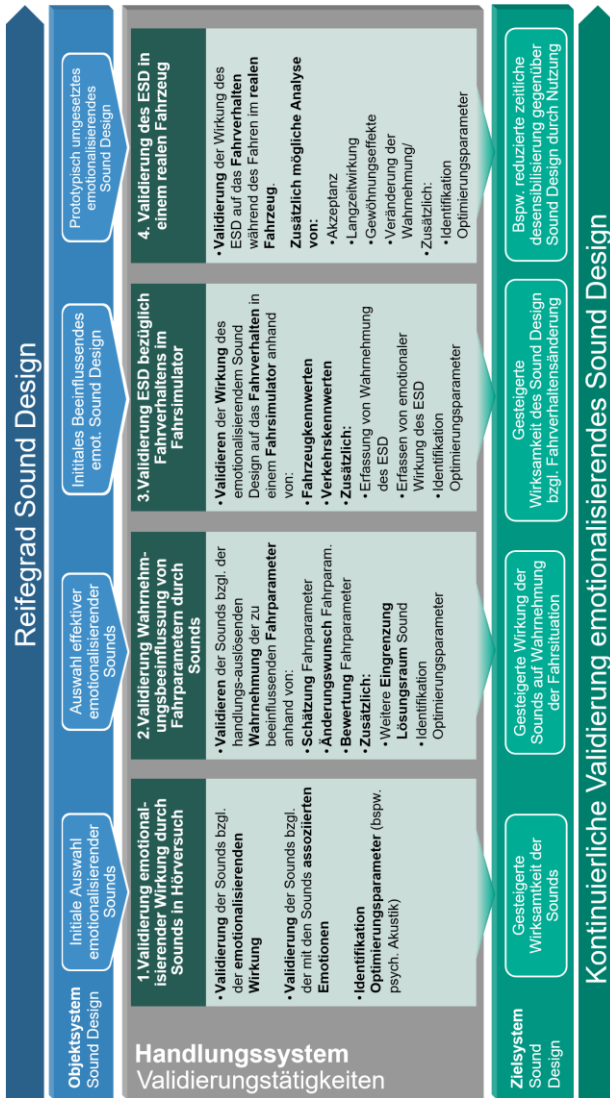


Abbildung 10.6: Darstellung der Einzelschritte der kontinuierlichen Validierung über den Reifegrad des emotionalisierenden Sound Designs

11 Zusammenfassung und Ausblick

11.1 Zusammenfassung und Fazit

In den Grundlagen und dem Stand der Forschung dieser Arbeit wurde gezeigt, dass hinweisende auditive Signale im Fahrzeuginnenraum bereits zur Anpassung des Fahrverhaltens eingesetzt werden, um die Fahrsicherheit zu erhöhen. Es gibt jedoch bisher keine etablierten Ansätze, die emotionsauslösende (emotionalisierende) auditive Reize für die Beeinflussung des Fahrverhaltens nutzen. Der dargelegte Forschungsstand belegt, dass Emotionen das Fahrverhalten und die Risikobereitschaft beeinflussen können und dass unterschiedliche Emotionen durch auditive Reize stimuliert werden können. Dennoch fehlt es an konkreten Lösungen, die eine gezielte akute Veränderung des emotionalen Zustands zur Beeinflussung des Fahrverhaltens nutzen. Mit dem Fehlen von Ansätzen oder Lösungen für die Nutzung emotionalisierender auditiver Reize im Mobilitätskontext geht damit auch eine Lücke in der methodengestützten Validierung und entsprechend notwendigen Validierungsumgebungen einher. Dieser Mangel an etablierten Methoden zur Validierung von emotionalisierenden Sound Designs (ESD) erschwert im Umkehrschluss die Entwicklung und Untersuchung dieser Konzepte zur Steigerung der Verkehrssicherheit.

Die vorliegende Dissertation verfolgte deshalb grundsätzlich zwei übergeordnete Forschungsziele. Das erste Ziel war die erstmalige Entwicklung eines dynamischen ESD zur Beeinflussung des Fahrverhaltens und zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, um die potenzielle Wirkung eines solchen Sound Design auf das Fahrverhalten zu untersuchen. Eine Erhöhung der Verkehrssicherheit sollte im Rahmen der Forschung anhand einer Beeinflussung des Sicherheitsabstands erfolgen. Die genutzte Emotion zur Beeinflussung war ein mittels des Sound Design induziertes Gefühl der Bedrohung im Kontext geringer Sicherheitsabstände. Das zweite Forschungsziel dieser Arbeit zielte darauf ab, die Lücke bzgl. einer Methodik für die Validierung emotionalisierender Sound Designs sowie einer hierfür notwendigen Validierungsumgebung zu schließen. Durch die Etablierung neuer Validierungsansätze für ESD wurde damit ein Beitrag zur validierungsgestützten Entwicklung dieser Sound Designs geleistet.

Um die Entwicklung eines emotionalisierenden aktiven Sound Designs zu ermöglichen und dessen Einfluss auf die Verkehrssicherheit zu untersuchen, wurde zunächst eine Auswahl potenziell emotionalisierender Sounds auf Basis der

harmonischen Struktur von nachgewiesenen emotionalisierenden Musikstücken sowie professionellen Werkzeugen zur Synthese von Sounds erstellt. Im Rahmen einer Probandenstudie wurden dann auf Basis der erfassten emotionalen Wirkung und Assoziation geeignete Sounds identifiziert, die als Basis für das allgemeine Sound Design und als emotionale bedrohliche Stimuli dienen können. Weiterhin wurden potenziell emotionalisierende Eigenschaften dieser Sounds mittels einer Korrelation zwischen der emotionalen Wirkung und objektiven psychoakustischen Parametern der Sounds gesucht, um mögliche Optimierungsparameter für ein ESD zu identifizieren. Die Ergebnisse zeigten grundsätzlich, dass die erstellten Sounds die jeweils angestrebten Emotionen in den Teilnehmenden hervorrufen konnten. Die Korrelationen zeigten, dass das emotional eher beruhigende und angenehme aktive Sound Design als Basis für das ESD ein niedriges Maß an Impulshaltigkeit, Schwankungsstärke, Schärfe und eine hohe Tonhaltigkeit aufweisen sollte. Der negative/bedrohliche emotionalisierende Stimulus innerhalb des Sound Designs sollte hingegen durch eine hohe Impulshaltigkeit, Schwankungsstärke, Schärfe und eine eher niedrige Tonhaltigkeit charakterisiert sein.

Im Rahmen einer videobasierten Studie wurde im Anschluss die beeinflussende Wirkung emotionalisierender Sounds auf die Risikowahrnehmung und Risikobereitschaft bzgl. Sicherheitsabständen untersucht. Hierfür wurden die in Studie 1 als emotional zielführend und effektiv identifizierten Sounds sowie Varianten dieser Sounds verwendet, die auf Basis der Korrelationen zwischen Emotionen und psychoakustischen Parametern optimiert wurden. Die neu generierten und optimierten Sounds zeigten ähnliche oder sogar stärkere emotionale Reaktionen im Vergleich zu den Sounds aus der vorherigen Studie, insbesondere hinsichtlich der Erzeugung von Bedrohungsgefühlen. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigten innerhalb von Probanden eine signifikante Erhöhung des geschätzten Sicherheitsabstands bei allen bedrohlichen Sounds im Vergleich zu einem positiv emotionalisierenden Sound. Unter Einfluss von bedrohlichen Sounds im Vergleich zu einem positiv emotionalisierenden Sound äußerten die Versuchspersonen den Wunsch, den Sicherheitsabstand zu erhöhen. Dieser Effekt war jedoch nur bei 2 von 3 bedrohlichen Sounds signifikant. Bei den gleichen Sounds zeigte sich auch eine signifikant höhere Wahrscheinlichkeit, den gezeigten Sicherheitsabstand als zu gering zu bewerten. Die Ergebnisse bestätigten, dass bedrohliche Sounds zu einer Verringerung des wahrgenommenen Sicherheitsabstands führen, und den Wunsch einer Vergrößerung des Sicherheitsabstands wahrscheinlicher machen, während beruhigende positive Sounds einen gegenteiligen Effekt haben. Die statistisch signifikanten Unterschiede in der Schätzung und Bewertung von Sicherheitsabständen zwischen positiven und bedrohlichen Sounds deuten darauf hin, dass die Richtung der emotionalen Reize einen direkten Einfluss auf die Wahrnehmung der

Teilnehmenden hat. Diese Erkenntnisse legen nahe, dass emotionalisierende Sounds potenziell zur Beeinflussung des Fahrverhalten genutzt werden können.

Dieses Potenzial wurde in einer dritten Studie analysiert. Dazu wurde ein auf Basis der Sounds entwickeltes dynamisches ESD hinsichtlich dessen Wirkung auf das Fahrverhalten in Bezug auf den Sicherheitsabstand innerhalb einer Fahrsimulatorstudie untersucht. Als Indikatoren für das Fahrverhalten in Bezug auf den Sicherheitsabstand wurde die Aufenthaltsdauer innerhalb unterschiedlicher Zeitabstandsbereiche (Sicherheitsabstand in Zeit) sowie der durchschnittliche Sicherheitsabstand in den Zeitabstandsbereichen verwendet. Im Kontrollgruppen-setup, in dem eine Gruppe mit ESD gesteuert durch den Zeitabstand fuhr, eine zweite Gruppe hingegen mit einem normalen aktiven Sound Design, zeigt sich nur ein signifikanter Unterschied im durchschnittlich gefahrenen Sicherheitsabstand im in Deutschland empfohlenen Zeitabstandsbereich $< 1,8$ s. Bei einem Vergleich der beiden Fahrten innerhalb von Studienteilnehmenden mit und ohne emotionalisierendem Sound Design (Within-Participants-Setup) zeigte sich für die Aufenthaltsdauer in allen Zeitabstands-Bereichen eine signifikante Verringerung unter Einfluss des emotionalisierenden Sound Designs. Für den durchschnittlichen Zeitabstand zeigte sich in allen Bereichen eine Erhöhung während des Fahrens mit dem ESD. Allerdings war dieser Effekt für den sicherheitskritischen Zeitabstandsbereich $< 0,9$ s im Gegensatz zu den unkritischeren Bereichen nicht signifikant. Die vorliegenden Ergebnisse stützen die starke Indikation aus Studie 2, dass ein angsteinflößendes oder bedrohliches emotionalisierendes Sound Design die Wahl des Zeitabstands in Folgefahrten effektiv beeinflussen könnte. Dies legt nahe, dass das Sound Design die Verkehrssicherheit durch Verhaltensbeeinflussung verbessern könnte, wenngleich weitere Forschung notwendig ist, um die Effektivität in besonders kritischen Situationen weiter zu untersuchen und zu optimieren. Zusätzlich konnte mit der Studie auch eine bereits bestehende externe Validität der Versuchsumgebung von Studie 2 zur Wahrnehmung zumindest in Bezug auf Studien innerhalb eines Fahrsimulators gezeigt werden.

Im Hinblick auf das erste Forschungsziel wurde im Rahmen der Arbeit damit gezeigt, dass ein dynamisches, sich mit dem Zeitabstand änderndes emotionalisierendes Sound Design potenziell positiv auf den gewählten Sicherheitsabstand während des Fahrens und damit auf die Verkehrssicherheit wirken kann. Basierend auf den Ergebnissen sollten die affektiven Sounds durch Erhöhung des Maßes an Dissonanz der Sounds und modulierten metallischen Zischgeräuschen erreicht werden. Ein hohes Niveau an Impulshaltigkeit, das Ähnlichkeiten zu erregender Musik mit einem höheren Musiktempo aufweist, sollte jedoch vermieden werden.

Zur Erfüllung des zweiten Forschungsziels der Arbeit wurde eine Validierungsmethodik im Sinne des Validierungsverständnis der KaSPro – Karlsruher Schule der Produktentwicklung nach Albers sowie ein Validierungsframework basierend auf dem IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz entwickelt. Die Methodik und die Validierungsumgebungen wurden hierfür aus den Forschungsmethoden sowie den Versuchsumgebungen für die Untersuchung der Wirkung des im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelten Sound Design abgeleitet.

Das XiL-Validierungsframework besteht aus 4 Validierungskonfigurationen. Die erste Validierungskonfiguration ermöglicht die Validierung der emotionalen Wirkung einzelner Sounds als Teillösungen für die zur entwickelnde ESD auf Element-in-the-Loop-Ebene. Die zweite Validierungskonfiguration ermöglicht die Validierung bezüglich der Wirkung der Sounds auf die Wahrnehmung eines Fahr- oder Verkehrsparameters in Videos in der Subsystem-in-the-Loop-Ebene 1. Die dritte Validierungskonfiguration ermöglicht die Validierung hinsichtlich der Wirkung eines prototypischen ESD auf das Fahrverhalten in einer virtuellen Fahrsituation auf Subsystem-in-the-Loop-Ebene 2. Die vierte Validierungskonfiguration ermöglicht die finale Validierung eines ESD in Fahrten mit einem realen Fahrzeug auf System-in-the-Loop-Ebene. Da im Rahmen der Forschungsarbeit keine Studie mit realen Fahrzeugen durchgeführt wurde, wurde hierfür ein Koppelsystem geschaffen, das eine Kommunikation zwischen einem Soundgenerator, der das ESD erzeugt, und einem Fahrzeug sowie zusätzlicher für das Sound Design relevanter externer Sensoren entwickelt.

Auf Basis des XiL-Validierungsframeworks wurde im Anschluss eine Validierungsmethodik für eine kontinuierliche Validierung über den gesamten Entwicklungsprozess hinweg von Element-in-the-Loop bis System-in-the-Loop-Ebene abgeleitet. Diese ermöglicht die Durchführung der innerhalb der Validierung notwendigen Teil-Aktivitäten Bewertung, Objektivierung und Verifikation zur Validierung des entwickelten Objektsystems bzgl. des damit zu erfüllenden Zielsystems. Die Methodik unterstützt damit eine kontinuierliche Validierung des ESD von einer frühen Entwicklungsphase bis zur prototypischen Umsetzung.

Mögliche Grenzen und Einschränkungen des entwickelten Validierungsframeworks und der abgeleiteten Validierungsmethodik ergeben sich insbesondere hinsichtlich der externen Validität der Validierungsstudien in den frühen Entwicklungsphasen der Sounds bzw. des Sound Designs. Während durch die Nutzung von Online- oder Laborstudien sowie der Verwendung eines Simulators eine Validierung bereits in frühen Reifegraden ermöglicht wird, können diese Validierungskonfigurationen nicht alle potenziell notwendigen Bedingungen vollständig abbilden. Insbesondere das

Versetzen der Studienteilnehmenden in den realen Fahrkontext sowie die authentische Erfassung ihrer emotionalen Reaktionen bleiben möglicherweise unzureichend berücksichtigt, was bei der Interpretation der Validierungsergebnisse bedacht werden muss.

Zudem besteht eine mögliche Einschränkung in der generellen Anwendbarkeit der Methodik auf andere Formen des ESD. Da die Methodik auf den spezifischen Rahmenbedingungen der durchgeführten Untersuchungen im Kontext des Sicherheitsabstands basiert, könnte sie je nach Art des zu validierenden ESD nicht unverändert auf alternative Konzepte oder bestimmte Fahrzeugtypen übertragbar sein. Des Weiteren könnte eine geringe Stichprobengröße in bestimmten Validierungsschritten die statistische Signifikanz der Ergebnisse beeinträchtigen, was die Robustheit und Zuverlässigkeit der abgeleiteten Erkenntnisse einschränken könnte. Diese Faktoren sollten bei der Anwendung und Weiterentwicklung der Methodik sorgfältig berücksichtigt werden.

11.2 Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Wirkung emotionalisierender Sounds auf die Wahrnehmung von Sicherheitsabständen, sowie die positive Wirkung des entwickelten Sound Design auf den gewählten Sicherheitsabstand während des Fahrens in einem Simulator dargelegt. Damit sind erste Indizien erbracht, dass ein ESD eine steigernde Wirkung auf die Verkehrssicherheit haben könnte. In Bezug auf den Sicherheitsabstand sollte zukünftige Forschung noch einmal überprüfen, ob ein ESD während des Fahrens in sehr geringen Sicherheitsabständen keine Wirkung mehr auf den durchschnittlich gefahrenen Sicherheitsabstand hat. Hiermit könnte bestätigt werden, dass ein fehlender Effekt in diesem Bereich, wie bereits diskutiert, tatsächlich an dem in der Fahrsimulatorstudie verwendeten scheinbar ungeeigneten sehr impulshaltigen Sound lag.

In Bezug auf den Ansatz des ESD wäre eine Vielzahl zukünftiger Forschungstätigkeiten sinnvoll. Einerseits könnte das Anwendungsfeld bzgl. alternativer relevanter Fahrparameter für die Verkehrssicherheit erweitert werden. Hierfür könnte ein ähnliches Sound Design hinsichtlich einer Wirkung auf bspw. das Geschwindigkeitsverhalten oder das Abbremsen und Halten bei roten Ampeln, Stoppschildern oder passierenden Personen oder Radfahrern untersucht werden. Andererseits könnte im Hinblick auf die induzierten Emotionen durch das ESD untersucht werden, ob möglicherweise ein positive Reinforcement (positive Belohnung) mittels eines entsprechenden Sound Design einen besseren Effekt erzielen könnte. Auch eine Kombination aus einer Erhöhung positiver Emotionen

beim Erreichen bspw. sicherer Sicherheitsabstände und erst beim Unterschreiten eine Induktion negativer Emotionen sollte analysiert werden. Generell könnte die Induktion positiver Emotionen eine Anwendung eines ESD über die Verkehrssicherheit hinaus attraktiv machen, bspw. für das Belohnen von energieeffizientem Fahren. Auch eine Nutzung innerhalb der automatisierten und autonomen Mobilität wäre denkbar, um Fahrende effektiv in den Zustand der Kontrollübernahme oder -abgabe überführen zu können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, den es zu erforschen gilt, ist die Akzeptanz eines solchen Systems als tatsächliches finales System innerhalb eines Fahrzeugs, speziell im Kontext einer in der Fahrzeugentwicklung üblicherweise angestrebten Steigerung des Fahrkomforts. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die naheliegende Steigerung der „Unangenehmheit“ eines Geräusches mit einer bedrohlichen / angsteinflößenden Wirkung von Geräuschen billigend hingenommen, da der Fokus innerhalb der Forschungstätigkeit darauf lag, einen grundsätzlichen Effekt nachweisen zu können. Die Verbindung des Unangenehmen (niedrige Valenz) mit dem Sicherheitsabstand war dabei ein explizites Ziel. In der Fahrstudie gaben einige Teilnehmende sogar an, von dem Sound Design gestresst oder genervt gewesen zu sein. In zukünftiger Forschung sollte also untersucht werden, ob Arten von bedrohlichen Sounds und Sound Designs möglich sind, die nicht als stressig oder lästig empfunden werden. Dies könnte die Akzeptanz eines solchen auditiven Systems als Produkt zur Steigerung der Verkehrssicherheit drastisch erhöhen. Alternativ könnte auch der Ansatz eines suggestiven Sound Design verfolgt werden. Dies könnte grundsätzlich auf ähnliche Emotionen abzielen, dabei jedoch nur auf einer unterschweligen Ebene wirken, ohne dass Fahrende das Geräusch salient (vordergründig) wahrnehmen. Dieser Ansatz wurde nicht verfolgt, da hierfür initial die in dieser Arbeit gezeigte Wirkung eines ESD auf das Fahrverhalten bestätigt werden musste. Für zukünftige Forschungsprojekte, gerade im Hinblick auf kooperative Projekte mit dem Fachbereich der Wahrnehmungspsychologie oder angrenzenden Fachbereichen, könnte dies jedoch ein interessantes Forschungsfeld darstellen. Ein weiterer relevanter Aspekt ist auch, wie ein ESD im Zusammenspiel mit Hören von Musik, Hörbüchern oder anderen akustischen Unterhaltungsinhalten während des Fahrens umzusetzen ist, bspw. durch eine Reduktion der Maskierung des ESD durch diese akustischen Ereignisse basierend auf der Relevanz des ESD für die Verkehrssicherheit.

Bzgl. der Validierungsmethodik und Validierungskonfiguration für ein ESD konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit gezeigt werden, dass die Anwendung der Methodik unter Verwendung des Frameworks zielführend für die Entwicklung eines ESD verwendet werden kann. Innerhalb der Validierungsschritte der Methodik und des XiL-Validierungsframeworks sind bereits relevante Aspekte für die Bewertung

und Objektivierung des (Fahr-)Komforts im Kontext einer Produktentwicklung des Systems ESD enthalten. Durch die notwendige Ableitung aus den durchgeführten Studien beschränken sie sich jedoch primär auf die Gewinnung von Erkenntnissen bzgl. der Wirksamkeit eines solchen Systems. In zukünftiger Forschungsarbeit, bspw. im Kontext der Entwicklung eines von Kunden akzeptierbaren ESD, sollte die Methodik um diesen Komfort-Aspekt erweitert werden. Des Weiteren wurden die abgeleiteten Validierungsschritte der Methodik und die Validierungskonfigurationen des XiL-Validierungsframework nur auf Basis jeweils einer durchgeführten Studie abgeleitet. Zwar konnte bspw. die video-basierte Validierungskonfiguration teilweise mit den Ergebnissen der Fahrsimulator-Studie evaluiert werden, eine abschließende ganzheitliche Validierung der Methodik wurde jedoch nicht durchgeführt. Deshalb sollten in einer zukünftigen Forschungstätigkeit die Validierungsmethodik sowie die Validierungskonfigurationen selbst im Rahmen der Umsetzung und Validierung eines alternativen Ansatzes für ein ESD validiert und weiterentwickelt werden.

Literaturverzeichnis

- Adell, E., Várhelyi, A. & Hjälmdahl, M. (2008). Auditory and haptic systems for in-car speed management – A comparative real life study. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 11(6), 445–458. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2008.04.003>
- Albers, A. (2010). Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In *Proceedings of the TMCE, n.p* (Bd. 12, S. 343–356).
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S. & Matros, K. (2016). Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) & Udo Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 541–569). München: Carl Hanser.
- Albers, A., Behrendt, M., Schroeter, J., Ott, S. & Klingler, S. (2008). X-in-the-Loop: A Framework for Supporting Central Engineering Activities and Contracting Complexity in Product Engineering Processes. In *DS 75-6: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13)* (Design Information and Knowledge, Bd. 6, S. 391–400). Seoul, Korea.
- Albers, A. & Düser, T. (2008). Integrierte Validierungsumgebung für energieeffiziente Fahrerassistenzsysteme am Rollenprüfstand. In *IPG Technology Conference 2008, 23.-24.9. 2008*. Ettlingen, Deutschland.
- Albers, A., Düser, T. & Ott, S. (2008). X-in-the-loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebssystemen. In *Haus der Technik* (16, 17). Kassel.
- Albers, A., Düser, T., Sander, O., Roth, C. & Henning, J. (2010). X-in-the-Loop-Framework für Fahrzeuge, Steuergeräte und Kommunikationssysteme. *ATZelektronik*, 5(5), 60–65. <https://doi.org/10.1007/bf03224034>
- Albers, A., Ebel, B. & Lohmeyer, Q. (Hrsg.). (2012). *Systems of objectives in complex product development. 9th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2012, Karlsruhe, Deutschland*.

- Albers, A., Fischer, J., Klingler, S. & Behrendt, M. (2014). *Durchgängige Validierung und Verifizierung am Beispiel der akustischen Eigenschaften eines Elektrofahrzeugs*. Konferenzvortrag. Grazer Symposium Virtuelles Fahrzeug (GSVF), Graz, Österreich.
- Albers, A., Matros, K., Behrendt, M. & Jetzinger, H. (2015). Das Pull-Prinzip der Validierung - Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess. *Konstruktion*, 67(6), 74–81.
- Albers, A., Pinner, T., Yan, S., Hettel, R. & Behrendt, M. (Hrsg.). (2016). *Koppelsystems: Obligatory Elements within Validation Setups. Proceedings of DESIGN 2016*.
- Alt, N. W. & Jochum, S. Sound Design Under the Aspects of Musical Harmonic Theory. In *SAE Technical Paper Series 2003*. <https://doi.org/10.4271/2003-01-1508>
- Anund, A., Lahti, E., Fors, C. & Genell, A. (2015). The effect of low-frequency road noise on driver sleepiness and performance. *PloS One*, 10(4), e0123835. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123835>
- Aures, W. (1985). Berechnungsverfahren für den sensorischen Wohlklang beliebiger Schallsignale. *Acustica*, (59), 130–141. Verfügbar unter: <https://www.ingentaconnect.com/content/dav/aaau/1985/00000059/00000002/art00008>
- Babić, D. [Darko], Babić, D. [Dario], Sucha, M., Stanić, V. & Toman, M. (2021). The influence of music genres on the driving behaviour of young drivers and their visual scanning of the environment. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 81, 396–407. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2021.07.001>
- Baumberger, B., Flückiger, M., Paquette, M., Bergeron, J. & Delorme, A. (2005). Perception of relative distance in a driving simulator. *Japanese Psychological Research*, 47(3), 230–237. <https://doi.org/10.1111/j.1468-5884.2005.00292.x>
- Becker, J., Sottek, R. & Lobato, T. (2022). Psychoacoustic Modeling of Fluctuation Strength. DAGA. Verfügbar unter: https://pub.dega-akustik.de/DAGA_2022/data/articles/000307.pdf

- Berg, C. M. (1990). Philip Glass on Composing for Film and Other Forms: The Case of Koyaanisqatsi. *Journal of Dramatic Theory and Criticism*, 301–320. Supplement: Performance Art/Theory. Verfügbar unter: <https://journals.ku.edu/jdtc/article/view/1777>
- Bismarck, G. von. (1974). Timbre of Steady Sounds: A Factorial Investigation of its Verbal Attributes. *Acta Acustica united with Acustica*, (30). Verfügbar unter: <https://www.ingentaconnect.com/content/dav/aaua/1974/00000030/00000003/art00005>
- Björk, E. A. (1985). Perceived Quality of Natural Sounds. Untersuchung zur Wahrnehmbarkeit natürlicher Schallereignisse. *Acta Acustica united with Acustica*, (57), 185–188.
- Bodden, M. & Belschner, T. (2014). Comprehensive Automotive Active Sound Design part 1: electric and combustion vehicles. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, (249), 3214–3219.
- Bortz, J. & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation. für Human- und Sozialwissenschaftler* (4. überarbeitete Auflage). Berlin: Springer.
- Bradley, M. M. & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: the Self-Assessment Manikin and the Semantic Differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 25(1), 49–59. [https://doi.org/10.1016/0005-7916\(94\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0005-7916(94)90063-9)
- Brandstätter, V., Schüler, J., Puca, R. M. & Lozo, L. (2018). *Motivation und Emotion*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56685-5>
- Breuer, J., Hugo, C. von, Mücke, S. & Tattersall, S. (2015). Nutzerorientierte Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (S. 183–196). Springer Fachmedien.
- Breyer, B. & Bluemke, M. (2016). Deutsche Version der Positive and Negative Affect Schedule PANAS (GESIS Panel). <https://doi.org/10.6102/zis242>

- Breyer, G. (2010). A review of the rules and practices concerning the safe distance between two vehicles on roads by members of CEDR's TG Road Safety. *CEDR report*, (2009/10.1). Verfügbar unter: <https://www.cedr.eu/docs/view/60794fa6cf0c0-en>
- Bringoux, L., Monnoyer, J., Besson, P., Bourdin, C., Denjean, S., Dousset, E. et al. (2017). Influence of speed-related auditory feedback on braking in a 3D-driving simulator. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 44, 76–89. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.10.006>
- Brodsky, W. (2001). The effects of music tempo on simulated driving performance and vehicular control. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 4(4), 219–241. [https://doi.org/10.1016/S1369-8478\(01\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S1369-8478(01)00025-0)
- Cassio Toledo (Autor). (2022). *Relaxing music with nature sounds - waterfall*. <https://www.youtube.com/watch?v=IE6RYpe9IT0>, Last time checked: 23/05/15. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=IE6RYpe9IT0>
- Chang, K.-J. & Park, D. C. (2016). Technology of an Emotional Engine Sound Designing for Active Sound Control Using Order Balance and Musical Instrument Sound. In *SAE Technical Paper Series* (SAE Technical Paper Series). SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, Vereinigte Staaten.
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin*, 112(1), 155–159. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.112.1.155>
- Costa, M., Ricci Bitti, P. E. & Bonfiglioli, L. (2000). Psychological Connotations of Harmonic Musical Intervals. *Psychology of Music*, 28(1), 4–22. <https://doi.org/10.1177/0305735600281002>
- Coutinho, E. & Cangelosi, A. (2011). Musical emotions: predicting second-by-second subjective feelings of emotion from low-level psychoacoustic features and physiological measurements. *Emotion*, 11(4), 921–937. <https://doi.org/10.1037/a0024700>
- Coutinho, E. & Dibben, N. (2013). Psychoacoustic cues to emotion in speech prosody and music. *Cognition & Emotion*, 27(4), 658–684. <https://doi.org/10.1080/02699931.2012.732559>

- Crankcaseaudio. (2018). *REV sound generator for games*. Zugriff am 14.12.2019. Verfügbar unter: <http://www.crankcaseaudio.com/works>
- Czolbe, F. (2020). Konzepte des Bauhauses im Sound Design heute. Zur kooperativen Klanggestaltung bei elektrifizierten Automobilen. In F. Czolbe (Hrsg.), *Klangwelten gestalten. Zur Aktualität des Bauhauses in Sound Design und auditiver Stadtplanung* (S. 93–114). pp. 104-112.
- Dekker, C. (2015). The impact of movie soundtracks on the estimation of driving speeds. *Graduation Thesis*. Verfügbar unter: <https://coendekker.nl/media/pdf/Coen-Dekker-The-impact-of-movie-soundtracks-on-the-estimation-of-driving-speeds-Version-3-1.pdf>
- Denjean, S., Kronland-Martinet, R., Roussarie, V. & Ystad, S. (2021). Zero-Emission Vehicles Sonification Strategy Based on Shepard-Risset Glissando. In R. Kronland-Martinet, S. Ystad & M. Aramaki (Hrsg.), *Perception, Representations, Image, Sound, Music* (Lecture notes in computer science, Bd. 12631, S. 709–724). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70210-6_46
- Ebel, B. (2015). Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung. In A. Albers (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung* (Bd. 85). ISSN: 1615-8113. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000048334>
- ECMA-418-2. (2022). ECMA-418-2, 2nd edition, December 2022. Verfügbar unter: https://www.ecma-international.org/wp-content/uploads/ECMA-418-2_2nd_edition_december_2022.pdf
- Eich, E. & Metcalfe, J. (1989). Mood dependent memory for internal versus external events. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15(3), 443–455. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.15.3.443>
- El-Haji, M., Freudenmann, T., Gauterin, F. & Albers, A. (2014). Ontology-grounded validation methodology for innovative automobile development projects. *IJITM*, 13(2/3), 108–133.

- European Broadcasting Union (Hrsg.). (2023). *Recommendation R 128: Loudness Normalisation and Permitted Maximum Level of Audio Signals*. Zugriff am 10.06.2024. Verfügbar unter: <https://tech.ebu.ch/docs/r/r128.pdf>
- Fagerlönn, J. (2011). Making Auditory Warning Signals Informative: Examining the Acceptance of Auditory Icons as Warning Signals in Trucks. In *Internoise 2014* (S. 95–101). Iowa City: University of Iowa.
- Fiebig, A. & Schulte-Fortkamp, B. (2015). Acceptance of synthetic driving sounds in the interior of electric vehicles. In A. Fiebig & B. Schulte-Fortkamp (Hrsg.), *Acceptance of synthetic driving sounds in the interior of electric vehicles* (Proceedings, 1st ed. 2019, S. 28–44). Springer Vieweg.
- Field, A. (2024). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics* (6. Auflage). Thousand Oaks: SAGE Publishing.
- Fritz, C. O., Morris, P. E. & Richler, J. J. (2012). Effect size estimates: current use, calculations, and interpretation. *Journal of Experimental Psychology. General*, 141(1), 2–18. <https://doi.org/10.1037/a0024338>
- Fuchs, A., Nijman, E. & Priebisch, H.-H. (2016). *Automotive NVH Technology* (SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, 1st ed. 2016). Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24055-8>
- Funke, F., Reips, U.-D. & Thomas, R. K. (2011). Sliders for the Smart: Type of Rating Scale on the Web Interacts With Educational Level. *Social Science Computer Review*, 29(2), 221–231. <https://doi.org/10.1177/0894439310376896>
- Genuit, K. (2009). Comparison of loudness calculation procedures in the context of different practical applications. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Vol. 2009(5), 2206–2216. Institute of Noise Control Engineering.
- Genuit, K. (2010). *Sound-Engineering im Automobilbereich*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01415-4>
- Genuit, K. & Fiebig, A. (2011). Fahrzeugakustik und Sound design im Wandel der Zeit. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 113(7-8), 530–535. <https://doi.org/10.1365/s35148-011-0124-y>

- Graham, R. (1999). Use of auditory icons as emergency warnings: evaluation within a vehicle collision avoidance application. *Ergonomics*, 42(9), 1233–1248. <https://doi.org/10.1080/001401399185108>
- Groeger, J. A. & Chapman, P. R. (1996). Judgement of Traffic Scenes: The Role of Danger and Difficulty. *Applied Cognitive Psychology*, 10(4), 349–364. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0720\(199608\)10:4<349::AID-ACP388>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0720(199608)10:4<349::AID-ACP388>3.0.CO;2-4)
- Gwak, D. Y., Yoon, K., Seong, Y. & Lee, S. (2014). Subjective evaluation of additive sound designed to reinforce acoustic feedback of electric vehicle. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 249, 2157–2161.
- Hanley, A. (Native Instruments, Hrsg.). (2015). *Building in Primary*. Zugriff am 25.07.2019. Verfügbar unter: https://www.native-instruments.com/fileadmin/ni_media/downloads/manuals/REAKTOR_6_Building_in_Primary_English_2015_11.pdf
- Hartig, F. (2022). DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models, CRAN: Contributed Packages, R package version 0.4.6. Verfügbar unter: <https://cran.r-project.org/web/packages/DHARMA/vignettes/DHARMA.html>
- Hauswirth, I. (2018a). Psychoakustische Analysen I. *HEAD acoustics Application Notes*, 1–10. Verfügbar unter: https://global.head-acoustics.com/downloads/de/application_notes/Psychoakustische-Analysen_I_d.pdf
- Hauswirth, I. (2018b). Psychoakustische Analysen II. *HEAD acoustics Application Notes*, 1–11. Verfügbar unter: <https://cdn.head-acoustics.com/fileadmin/data/de/Application-Notes/Psychoakustische-Analysen-II-01.2018.pdf>
- HEAD Acoustics. (2018). *H3S HEAD 3D Sound Simulation System*. Zugriff am 14.12.2019. Verfügbar unter: https://www.head-acoustics.com/de/nvh_h3s.htm
- HEAD Acoustics. (2023). *ASP 103. D51103 Artemis SUITE Psychoacoustics - Advanced Analysis*. Zugriff am 14.05.2024. Verfügbar unter: <https://cdn.head->

acoustics.com/fileadmin/data/en/Data-Sheets/AS/ASM_15/D51103e-ASP-103-ArtemiS-SUITE-Psychoacoustics-Advanced-Analysis.pdf

HEAD Acoustics. (2024, 14. Mai). *ArtemiS SUITE. Modulare Software-Plattform für die Analyse von Schall und Schwingungen*. Zugriff am 14.05.2024. Verfügbar unter: <https://www.head-acoustics.com/de/produkte/analyse-software/artemis-suite>

Heller, J. (2012). *Experimentelle Psychologie*. Oldenburg: Oldenburg Wissenschaftsverlag. <https://doi.org/10.1524/9783486714258>

Hellier, E., Naweed, A., Walker, G., Husband, P. & Edworthy, J. (2011). The influence of auditory feedback on speed choice, violations and comfort in a driving simulation game. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14(6), 591–599. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2011.07.004>

Hempel, T. (2001). *Untersuchungen zur Korrelation auditiver und instrumenteller Messergebnisse für die Bewertung von Fahrzeuginnenraumgeräuschen als Grundlage eines Beitrags zur Klassifikation von Hörereignissen (Mensch-Maschine-Kommunikation)*. München: Herbert Utz Verlag.

Hills, B. L. (1980). Vision, visibility, and perception in driving. *Perception*, 9(2), 183–216. <https://doi.org/10.1068/p090183>

Horswill, M. S., Hill, A. & Silapurem, L. (2020). The development and validation of video-based measures of drivers' following distance and gap acceptance behaviours. *Accident; Analysis and Prevention*, 146, 105626. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105626>

Horswill, M. S. & McKenna, F. P. (1999). The development, validation, and application of a video-based technique for measuring an everyday risk-taking behavior: drivers' speed choice. *The Journal of Applied Psychology*, 84(6), 977–985. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.84.6.977>

Horswill, M. S. & Plooy, A. M. (2008). Auditory feedback influences perceived driving speeds. *Perception*, 37(7), 1037–1043. <https://doi.org/10.1068/p5736>

ISO 26262-1. (2018). *Road vehicles - Functional safety*, International Organization for Standardization. 26262-1. Zugriff am 02.12.2024. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:26262:-1:ed-2:v1:en>

- ISO 532-1 (International Organization for Standardization, Hrsg.). (2017). *Acoustics — Methods for calculating loudness Part 1: Zwicker method* (Edition 1), International Organization for Standardization. Zugriff am 06.06.2024. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/63077.html>
- Jeon, M., Lautala, P., Nadri, C., Nelson, D. N., Michigan Technological University & Virginia Polytechnic Institute and State University. 2022, 1. February. *In-Vehicle Auditory Alerts Literature Review* (DOT/FRA/ORD-22/05). United States. Department of Transportation. Federal Railroad Administration. Retrieved from <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/60401>
- Kaptein, N. A., Theeuwes, J. & van der Horst, R. (1996). Driving Simulator Validity: Some Considerations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1550(1), 30–36. <https://doi.org/10.1177/0361198196155000105>
- Karpathy, A., Johnson, J. & Fei-Fei, L. (2015, 6. Juni). *Visualizing and Understanding Recurrent Networks*. <https://arxiv.org/pdf/1506.02078>, Last time checked 23/05/15. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/1506.02078>
- Kavzoglu, T. (2009). Increasing the accuracy of neural network classification using refined training data. *Environmental Modelling & Software*, 24(7), 850–858. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.11.012>
- Kittner, I., Wegscheider, S. & Pirkner, P. (1994). *Allgemeine Psychologie: experimentalpsychologische Grundlagen* (Bd. 2). Wien: Facultas.
- Kleinginna, P. R. & Kleinginna, A. M. (1981). A categorized list of emotion definitions, with suggestions for a consensual definition. *Motivation and Emotion*, 5(4), 345–379. <https://doi.org/10.1007/BF00992553>
- Kleppmann, W. (2013). *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren. Praxisreihe Qualitätswissen*. München: Hanser.
- Koelsch, S., Skouras, S., Fritz, T., Herrera, P., Bonhage, C., Küssner, M. B. et al. (2013). The roles of superficial amygdala and auditory cortex in music-evoked fear and joy. *NeuroImage*, 81, 49–60. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.008>

- Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.). (2023). *Bundeseinheitlicher Tatbestandskatalog KBA-Langfassung, gebunden* (15. Auflage). Massing im Rottal: V.P.A. Verfügbar unter: <https://search.worldcat.org/title/1390743119>
- Kühn, M. & Hannawald, L. (2015). Verkehrssicherheit und Potenziale von Fahrerassistenzsystemen. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (S. 55–70). Springer Fachmedien.
- Küppers, T. (2013). Zielgeräuscentwicklung und Klangsynthesegestaltung im Innenraum von Elektrofahrzeugen. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 115(10), 826. <https://doi.org/10.1007/s35148-013-0284-z>
- Kwak, S. G. & Kim, J. H. (2017). Central limit theorem: the cornerstone of modern statistics. *Korean Journal of Anesthesiology*, 70(2), 144–156. <https://doi.org/10.4097/kjae.2017.70.2.144>
- Lang, P. J. (1995). The emotion probe. Studies of motivation and attention. *The American Psychologist*, 50(5), 372–385. <https://doi.org/10.1037//0003-066x.50.5.372>
- Levitin, D. (2011). *This Is Your Brain on Music: The Science of a Human Obsession*. Dutton: Atlantic Books Ltd.
- Lin, C.-T., Chiu, T.-T., Huang, T.-Y., Chao, C.-F., Liang, W.-C., Hsu, S.-H. et al. (2009). Assessing effectiveness of various auditory warning signals in maintaining drivers' attention in virtual reality-based driving environments. *Perceptual and Motor Skills*, 108(3), 825–835. <https://doi.org/10.2466/PMS.108.3.825-835>
- Lu, J., Xie, X. & Zhang, R. (2013). Focusing on appraisals: how and why anger and fear influence driving risk perception. *Journal of Safety Research*, 45, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2013.01.009>
- Lu, Z., Happee, R. & Winter, J. C. de. (2020). Take over! A video-clip study measuring attention, situation awareness, and decision-making in the face of an impending hazard. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 72, 211–225. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.05.013>

- MAGIX Software. (2023). Acid pro 11 [Computer software]. Verfügbar unter:
<https://www.magix.com/de/musik-bearbeiten/acid/acid-pro/>
- Martin, M. A. & Metha, A. (1997). Recall of early childhood memories through musical mood induction. *The Arts in Psychotherapy*, 24(5), 447–454.
[https://doi.org/10.1016/S0197-4556\(97\)00020-8](https://doi.org/10.1016/S0197-4556(97)00020-8)
- Mecklenbräuker, S. & Hager, W. (1986). Zur experimentellen Variation von Stimmungen: Ein Vergleich einer deutschen Adaptation der selbstbezogenen Velten-Aussagen mit einem Musikverfahren. Experimental variation of moods: a comparison of the german adaptation of the Velten technique in a music-behaviour (en). *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, 33(1), 71–94.
- Megías, A., Di Stasi, L. L., Maldonado, A., Catena, A. & Cándido, A. (2014). Emotion-laden stimuli influence our reactions to traffic lights. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 22, 96–103.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2013.09.017>
- Menzel, D., Fastl, H., Graf, R. & Hellbrück, J. (2008). Influence of vehicle color on loudness judgments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5), 2477–2479. <https://doi.org/10.1121/1.2890747>
- MIDI Spezifikationen*. (2024a). Zugriff am 24.06.2024. Verfügbar unter:
<https://midi.org/specs>
- MidiWorld. (1995-2009). *Midiworld - Midi Files at MidiWorld*. Zugriff am 15.11.2024. Verfügbar unter: <https://www.midiworld.com/>
- Mishra, P. [Prabhaker], Singh, U., Pandey, C. M., Mishra, P. [Priyadarshni] & Pandey, G. (2019). Application of student's t-test, analysis of variance, and covariance. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(4), 407–411.
https://doi.org/10.4103/aca.ACA_94_19
- Montesquieu, C. L. S. de & Roger, J. (2019). *Verkehrsunfälle Deutschland*. Statistisches Bundesamt (Destatis).
- Mortsiefer, H. (2019). Der neue Elektro-Sound. Available online:
<https://background.tagesspiegel.de/mobilitaet/der-neue-elektro-sound>

- (15.02.2024). *Tagesspiegel Background*. Verfügbar unter:
<https://background.tagesspiegel.de/mobilitaet/der-neue-elektro-sound>
- Mursic, R. A., Riecke, B. E., Apthorp, D. & Palmisano, S. (2017). The Shepard-Risset glissando: music that moves you. *Experimental Brain Research*, 235(10), 3111–3127. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5033-1>
- Navarro, J., Osiurak, F. & Reynaud, E. (2018). Does the Tempo of Music Impact Human Behavior Behind the Wheel? *Human Factors*, 60(4), 556–574. <https://doi.org/10.1177/0018720818760901>
- Nees, M. A. & Walker, B. N. (2011). Auditory Displays for In-Vehicle Technologies. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 7(1), 58–99. <https://doi.org/10.1177/1557234X11410396>
- OSC Spezifikationen. (2021, 8. April). Zugriff am 24.06.2024. Verfügbar unter:
https://opensoundcontrol.stanford.edu/spec-1_0.html#introduction
- Osgood, C. E. (1957). *The measurement of meaning* (9. Auflage). Urbana: University of Illinois Press.
- Pallesen, K. J., Brattico, E., Bailey, C., Korvenoja, A., Koivisto, J., Gjedde, A. et al. (2005). Emotion processing of major, minor, and dissonant chords: a functional magnetic resonance imaging study. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060, 450–453. <https://doi.org/10.1196/annals.1360.047>
- Pilgerstorfer, M., Runda, K., Conter, M. & Gatscha, M. (2013). *drivEkustik - Fahrverhalten in und akustische Wahrnehmung von Elektrofahrzeugen* (Forschungsarbeiten des österreichischen Verkehrssicherheitsfonds, Lfd. Nr. 027). Endbericht - Forschungsarbeiten des österreichischen Verkehrssicherheitsfonds.
- Pot, E. (2017). *RNN based Music generator*. Zugriff am 11.11.2024. Verfügbar unter:
https://github.com/llSourceCell/How_to_generate_music_in_tensorflow_LIVE/tree/master/deepmusic
- Precht, L., Keinath, A. & Krems, J. F. (2017). Effects of driving anger on driver behavior – Results from naturalistic driving data. *Transportation Research Part*

- F: *Traffic Psychology and Behaviour*, 45, 75–92.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.10.019>
- PyPI. (2024, 14. Juni). *Open Sound Control server and client implementations in pure python*. Zugriff am 14.06.2024. Verfügbar unter:
<https://pypi.org/project/python-osc/>
- Reaktor 6 – digital modular synthesizer | Komplete. (2024, 8. Maib). Zugriff am 08.05.2024. Verfügbar unter: <https://www.native-instruments.com/en/products/komplete/synths/reaktor-6/>
- Roach, N. W., Heron, J. & McGraw, P. V. (2006). Resolving multisensory conflict: a strategy for balancing the costs and benefits of audio-visual integration. *Proceedings. Biological Sciences*, 273(1598), 2159–2168.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3578>
- Roads, C. (2023). *The computer music tutorial* (2. Auflage). Cambridge Massachusetts: The MIT Press.
- Roidl, E., Frehse, B. & Höger, R. (2014). Emotional states of drivers and the impact on speed, acceleration and traffic violations - a simulator study. *Accident; Analysis and Prevention*, 70, 282–292.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.04.010>
- Ropohl, G. (1975). *Systemtechnik - Grundlagen und Anwendung*. München: Carl Hanser.
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39(6), 1161–1178. <https://doi.org/10.1037/h0077714>
- Russell, J. A. & Mehrabian, A. (1978). Approach-Avoidance and Affiliation as Functions of the Emotion-Eliciting Quality of an Environment. *Environment and behavior*, 10(3), 355–387. <https://doi.org/10.1177/0013916578103005>
- Scott-Parker, B. (2017). Emotions, behaviour, and the adolescent driver: A literature review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 50, 1–37. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.06.019>

- Serrano, J., Di Stasi, L. L., Megías, A. & Catena, A. (2013). Affective-sound Effects On Driving Behaviour. *TRANSPORT*, 29(1), 100–106.
<https://doi.org/10.3846/16484142.2013.815133>
- Shepard, R. N. (1964). Circularity in Judgments of Relative Pitch. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 36(12), 2346–2353.
<https://doi.org/10.1121/1.1919362>
- SK Pang Electronics Ltd. (2024, 28. Mai). *Teensy 4.1 Triple CAN Board with 240x240 LCD and Ethernet*. Zugriff am 28.05.2024. Verfügbar unter:
<https://www.skpang.co.uk/products/teensy-4-1-triple-can-board-with-240x240-lcd-and-ethernet>
- Software | Arduino. (2024, 27. Maic). Zugriff am 28.05.2024. Verfügbar unter:
<https://www.arduino.cc/en/software>
- Solomon, L. N. (1959). Search for Physical Correlates to Psychological Dimensions of Sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 31(4), 492–497. <https://doi.org/10.1121/1.1907741>
- Sottek, R. (2015). Psychoacoustically based tonality model for the evaluation of noise with tonal components. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(4_Supplement), 2320. <https://doi.org/10.1121/1.4920468>
- Sottek, R. (2016). Sharpness perception and modeling of stationary and time-varying sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(4_Supplement), 2953–2954. <https://doi.org/10.1121/1.4969118>
- Sottek, R. & Genuit, K. (2013). Perception of roughness of time-variant sounds. *Proceedings of Meetings of Acoustics*, (Vol. 19), 50195.
<https://doi.org/10.1121/1.4800213>
- Sottek, R., Vranken, P. & Busch, B. (1995). Ein Modell zur Berechnung der Impulshaltigkeit. *Fortschritte der Akustik*, 791–794.
- Statistisches Bundesamt. (2024, 1. Januar). *Verkehrsunfälle in Deutschland*. Zugriff am 09.07.2024. Verfügbar unter:
https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/_inhalt.html#_e4hryr3xy

- Stratton, V. N. & Zalanowski, A. H. (1989). The Effects of Music and Paintings on Mood. *Journal of Music Therapy*, 26(1), 30–41.
<https://doi.org/10.1093/jmt/26.1.30>
- Streicher, B., Lange, S., Eisele, G. & Steffens, C. (2021). Effiziente Methoden im Active Sound Design. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 123(1), 58–61.
<https://doi.org/10.1007/s35148-020-0623-9>
- Sutton, L. J., Teasdale, J. D. & Broadbent, D. E. (1988). Negative self-schema: the effects of induced depressed mood. *The British Journal of Clinical Psychology*, 27(2), 188–190. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8260.1988.tb00773.x>
- Swart, D. J., Bekker, A. & Bienert, J. (2016). The comparison and analysis of standard production electric vehicle drive-train noise. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 12(3), 260.
<https://doi.org/10.1504/IJNVN.2016.080140>
- Teensy® 4.0. (2024, 17. April). Zugriff am 13.05.2024. Verfügbar unter:
<https://www.pjrc.com/store/teensy40.html>
- Teensyduino: Software Setup for Teensy on Arduino IDE. (2024, 27. März). Zugriff am 28.05.2024. Verfügbar unter:
<https://www.pjrc.com/teensy/tutorial.html>
- Tschöke, H. (2015). *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Basiswissen (ATZ / MTZ-Fachbuch)*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-04644-6>
- Underwood, G., Crundall, D. & Chapman, P. (2011). Driving simulator validation with hazard perception. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14(6), 435–446. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2011.04.008>
- Unipark. (2023, 17. November). *Online Umfrage | Online Umfrage erstellen: Gratis testen!* Zugriff am 08.05.2024. Verfügbar unter: <https://www.unipark.com/>
- Västfjäll, D. (2001). Emotion induction through music: A review of the musical mood induction procedure. *Musicae Scientiae*, 5(1_suppl), 173–211.
<https://doi.org/10.1177/10298649020050S107>

- Västfjäll, D., Gulbol, M.-A., Kleiner, M. & Gärling, T. (2002). Affective Evaluations Of And Reactions To Exterior And Interior Vehicle Auditory Quality. *Journal of Sound and Vibration*, 255(3), 501–518. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.4166>
- VDI, 2206 (Juni 2004). *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin: Beuth.
- Vieillard, S., Peretz, I., Gosselin, N., Khalfa, S., Gagnon, L. & Bouchard, B. (2008). Happy, sad, scary and peaceful musical excerpts for research on emotions. *Cognition & Emotion*, 22(4), 720–752. <https://doi.org/10.1080/02699930701503567>
- Vogel, K., Kircher, A., Alm, H. & Nilsson, L. (2003). Traffic sense - which factors influence the skill to predict the development of traffic scenes? *Accident; Analysis and Prevention*, 35(5), 749–762. [https://doi.org/10.1016/s0001-4575\(02\)00078-7](https://doi.org/10.1016/s0001-4575(02)00078-7)
- Vollrath, M., Krems, J. F., Hasselhorn, M., Heuer, H. & Rösler, F. (2011). *Verkehrspsychologie. Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker* (1. Auflage). Stuttgart: Kohlhammer. Verfügbar unter: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1930415>
- Wang, E. Y. & Wang, E. M. (2012). In-car sound analysis and driving speed estimation using sounds with different frequencies as cues. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(1), 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2011.11.001>
- Wang, M., Sun, D. & Chen, F. (2012). Using naturalistic driving films as a design tool for investigating driver requirements in HMI design for ADAS. *Work (Reading, Mass.)*, 41 Suppl 1, 5045–5052. <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0795-5045>
- Wiese, E. E. & Lee, J. D. (2004). Auditory alerts for in-vehicle information systems: the effects of temporal conflict and sound parameters on driver attitudes and performance. *Ergonomics*, 47(9), 965–986. <https://doi.org/10.1080/00140130410001686294>
- Winner, H., Fecher, N., Regh, F. & Hoffman Jens (2009). Fahrversuche zur Untersuchung von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. In H. Winner & R.

Bruder (Hrsg.), *Wie realitätsnah lässt sich Fahrerverhalten messen? Neue Methoden und Werkzeuge* (S. 67–79).

WIVW - Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften. (2024). *SILAB Driving Simulator*. Zugriff am May 6th 2024. Verfügbar unter: <https://wivw.de/en/SILAB>

Yan, S., Mandel, C., Behrendt, M. & Albers, A. (2019). Dokumentation von Erfahrungswissen in der Entwicklung von vernetzten Validierungsumgebungen. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2019*. Stuttgart, Deutschland.

Yang, W., Makita, K., Nakao, T., Kanayama, N., Machizawa, M. G., Sasaoka, T. et al. (2018). Affective auditory stimulus database: An expanded version of the International Affective Digitized Sounds (IADS-E). *Behavior Research Methods*, 50(4), 1415–1429. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-1027-6>

Zaimovic, M. (2019). *Koyaanisqatsi - Ein Dialog zu einem dialoglosen Film. Hausarbeit - Minimal Music Seminar*. Hausarbeit. Technische Universität Berlin.

Zavalishin, V. (Native Instruments, Hrsg.). (2018). *Building in Core*. Zugriff am 30.07.2019. Verfügbar unter: https://www.native-instruments.com/fileadmin/ni_media/downloads/manuals/REAKTOR_6_Building_in_Core_English_2015_11.pdf

Zeller, P. (2012). *Handbuch Fahrzeugakustik. Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch* (ATZ / MTZ-Fachbuch, 2., überarbeitete Auflage). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8657-6>

Zhang, Y., Guo, Z. & Sun, Z. (2020). Driving Simulator Validity of Driving Behavior in Work Zones. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2020/4629132>

Zone, B. M. (Autor). (2022). *Tibetan meditation music*. <https://www.youtube.com/watch?v=rmPmq-HIG5g>, Last time checked 23/05/15 [Music]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=rmPmq-HIG5g>

Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor co-betreut wurden:

- Gudisi Ramesh, K. (2023). *Integration of a Sound Generator into a Driving Simulator and Setup of a Validation Environment for Suggestive Sound Designs*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Heizmann, L. (2019). *Implementierung einer Softwareumgebung zur Parametrierung virtueller Gangstufen für ein aktives Fahrzeugsounddesign*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Huang, J. (2022). *Integration einer Fahrerassistenzkamera in eine Fahrzeug-Soundgenerator Schnittstelle*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Lefringhausen, T. (2019). *Implementierung eines synthetischen Fahrzeugsounds auf Basis des Shepard-Risset Glissandos*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Yao, X. (2018). *Entwicklung einer Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Soundgenerator*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Yueksel, D. (2023). *Untersuchung der Wirkung von suggestivem Sound Design auf Einschätzung des Fahrabstands*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Zaimovic, M. (2022). *Untersuchung der Suggestivität von Fahrzeuggeräuschen im Elektroauto. Zum Einfluss musikalischer Attribute auf das Fahrverhalten*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Technische Universität Berlin, Berlin.

Publikationsliste

- Farshi Ghodsi, K., Bopp, M., Petersen, M., Gohlke, T. & Albers, A. (2024). *Numerical study of noise and vibration behaviour of lightweight gearbox housing* (DAGA, Hrsg.). Fortschritte der Akustik - DAGA. <https://doi.org/10.35097/KXkwPUHntQGLrDiD>
- Farshi Ghodsi, K., Petersen, M., Colangeli, C., Cuenca, J., Kucukcoskun, K., Ott, S. et al. (2024). *Effect of Lightweight Design on the NVH Behavior of an Electric Vehicle Gearbox Housing* (DAGA, Hrsg.). Fortschritte der Akustik - DAGA. <https://doi.org/10.35097/svJLboVnTFAbJQV>
- Nan, Z., Behrendt, M., Lu, M., Petersen, M. & Albers, A. (2021). OPA method-based contribution analysis of components on the vibration of fuel cell in fuel cell vehicles. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 263(3), 3720–3730. <https://doi.org/10.3397/IN-2021-2501>
- Nan, Z., Behrendt, M., Petersen, M. & Albers, A. (2020). NVH analysis of fuel cell with consideration of driving maneuvers in FCV. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 261(2), 4510–4521. Verf. unter: <https://www.ingentaconnect.com/content/ince/incecp/2020/00000261/00000002/art00059>
- Petersen, M., Deml, B. & Albers, A. (2024). The Effect of an Emotionalizing Sound Design on the Driver's Choice of Headway in a Driving Simulator. *Acoustics*, 6(2), 541–567. <https://doi.org/10.3390/acoustics6020029>
- Petersen, M., Düser, T. & Albers, A. (2023). Implementation of a Validation Environment for an Emotionalizing Sound Design in a Driving Simulator. *Symposium Driving Simulation*, 9. <https://doi.org/10.5445/IR/1000170068>
- Petersen, M., Yüksel, D. & Albers, A. (2024). Effect of Emotionalizing Sounds on the Estimation and Evaluation of Displayed Safety Distances. *Acoustics*, 6(2), 386–407. <https://doi.org/10.3390/acoustics6020021>
- Petersen, M., Zaimovic, M. & Albers, A. (2023). Evaluating emotionalizing effects of active sound designs. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 268(4), 4689–4700. https://doi.org/10.3397/IN_2023_0666

Anhang A

Fragebogen Probandenstudie zur emotionalen Wirkung von Sounds

Begrüßungstext:

Hörversuch zur Audioqualität

Vielen Dank, dass Sie an diesem Experiment teilnehmen! Bitte nehmen Sie sich Zeit, um die Anweisungen durchzulesen. Sie nehmen heute an einem Versuch teil, bei dem Sie die Qualität von Geräuschen bewerten sollen.

Der Versuch sollte ca. 20 - 30 min Ihrer Zeit in Anspruch nehmen. Im Folgenden hören Sie verschiedene Geräusche, wobei Sie nach jedem Durchgang genügend Zeit haben werden um die Qualität nach mehreren Kriterien zu bewerten. Die beschreibenden Adjektive auf den Skalen dienen als Anhaltspunkt und sollen Sie bei Ihrer Urteilsfindung unterstützen. Nehmen Sie die Beurteilung bitte intuitiv vor. Machen Sie sich nicht allzu viele Gedanken. Bei dieser Untersuchung, die rein subjektiver Natur ist, gibt es weder richtige noch falsche Antworten. Ausschließlich Ihr persönlicher Eindruck der akustischen Gesamtsituation ist für die Untersuchung wichtig.

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Sie können den Fragebogen jederzeit abbrechen. Ihre Teilnahme ist anonym, Ihre Antworten können nicht auf Sie zurückgeführt werden. Das bedeutet ebenfalls, dass Ihr persönlicher Datensatz nach Abschluss der Befragung für uns nicht identifizierbar ist. Falls Sie nach der Studie Auskunft über Ihre Daten haben wollen oder Ihre Teilnahme zurückziehen, bitten wir Sie, dies im abschließenden Kommentarfeld (falls nötig gemeinsam mit einer Kontaktadresse) zu vermerken. Ihre Daten werden ausschließlich für wissenschaftliche Zwecke verwendet. Die Forschung folgt keinem kommerziellen Interesse. Wir behandeln all Ihre Daten strengvertraulich.

Abfrage allgemeiner Informationen:

Alter:

Geschlecht

☐ weiblich

☐ männlich

☐ divers

Wie fühlen Sie sich?

Unaufmerksam

Aufmerksam

Bewerten Sie bitte Ihre aktuelle raumakustische Situation:

unangenehm

angenehm

Bitte dokumentieren Sie Hersteller und Modell Ihres Abhörsystems

Kopfhörer:

Lautsprecher:

Anderes:

Ist bei Ihnen eine Hörminderung bekannt?

☐ ja

☐ nein

☐ weiss ich nicht

☐ Falls ja, welche:

Welchen Beruf/Tätigkeit üben Sie aus?

Musikhörverhalten:

Wie oft hören Sie Musik?

☐ ich höre keine Musik

☐ 1x pro Monat

☐ mehrmals pro Monat

☐ 1x pro Woche

☐ mehrmals pro Woche

☐ 1x pro Tag

☐ mehrmals täglich

Beherrschen Sie ein Instrument

☐ ja

☐ nein

☐ Falls ja, welches:

☐ Falls ja, wie lange schon:

Haben Sie tiefergehende musiktheoretische Kenntnisse? (z.b. Konsonanz/Dissonanz von Intervallen, Harmonielehre)

☐ ja

☐ nein

Haben Sie erlebt, dass die Musik mit Ihnen als Zuhörer kommuniziert?

☐ nie

☐ selten

☐ manchmal

☐ oft

☐ immer

Einführung:

Hören Sie sich das folgende Geräusch an und stellen Sie ihr Abhörsystem auf eine passende Lautstärke ein.

Stellen Sie die Lautstärke Ihres Systems so ein, damit Sie keine Unannehmlichkeiten erfahren, aber das Geräusch klar zu hören ist.

Wie fühlten Sie sich beim Hören des Geräuschs?

☐ ernst

☐ traurig

☐ ängstlich

☐ unbeschwert

☐ bedroht

☐ beruhigt

☐ aufgeregt

"Das Geräusch klingt..."

	trifft stark zu	trifft zu	trifft eher zu	weder noch	trifft eher zu	trifft zu	trifft stark zu	
gleichmäßig	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	ungleichmäßig
grob	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	fein
hart	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	weich
hochfrequent	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	tieffrequent
lebhaft	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	ruhig
rau	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	glatt
tonhaltig		☐	☐	☐	☐	☐	☐	nicht tonhaltig
harmonisch	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	disharmonisch

Bewerten Sie das Geräusch anhand folgender verbaler Deskriptoren.

"Das Fahrzeug klingt..."

	trifft stark zu	trifft zu	trifft eher zu	weder noch	trifft eher zu	trifft zu	trifft stark zu	
langweilig	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	anregend
abstoßend	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	anziehend
unangenehm	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	angenehm
bedrohlich	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	harmlos
harmonisch	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	disharmonisch
aufdringlich	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	unaufdringlich
laut	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	leise
beruhigend	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	aufregend
anstrengend	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	erholsam

- Auf der nächsten Seite folgt der Hörversuch. Sie sollten die Lautstärke Ihres Abhörsystems ab sofort nicht mehr ändern.
- Sie werden dazu aufgefordert die Geräusche anhand einer Reihe verbaler Deskriptoren zu beschreiben. Deskriptoren die unklar erscheinen haben einen kleinen Infobutton darunter, welcher mithilfe von Mouseover das Wort genauer beschreibt.
- Im Idealfall hören Sie sich das Geräusch ein Mal an, wobei Sie die Möglichkeit haben werden es ein weiteres Mal anzuhören.
- Des Weiteren werden Ihre Ergebnisse gespeichert und Sie können auch die Zurückfunktion ohne Weiteres nutzen. Zusätzlich können Sie auch ohne Probleme Pausen einlegen.

Tatsächlicher Fragebogen:

4.1 Geraeusch_1

Hören Sie sich das Geräusch an und bewerten dieses mit Hilfe der folgenden verbalen Deskriptoren.

Wie fühlten Sie sich beim Hören des Geräuschs?

- ☐ ernst
- ☐ traurig
- ☐ ängstlich
- ☐ unbeschwert
- ☐ bedroht
- ☐ beruhigt
- ☐ aufgeregt

"Das Geräusch klingt..."

	trifft stark zu	trifft zu	trifft eher zu	weder noch	trifft eher zu	trifft zu	trifft stark zu	
gleichmäßig	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	ungleichmäßig
grob	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	fein
hart	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	weich
hochfrequent	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	tieffrequent
lebhaft	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	ruhig
rau	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	glatt
tonhaltig		☐	☐	☐	☐	☐	☐	nicht tonhaltig
harmonisch	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	disharmonisch

Hier können Sie sich das Geräusch nochmals anhören.

Anhang A

Stellen Sie sich nun vor, Sie sitzen in einem Auto, das ein solches Fahrgeräusch macht.

"Das Fahrzeug klingt..."

	trifft stark zu	trifft zu	trifft eher zu	weder noch	trifft eher zu	trifft zu	trifft stark zu	
langweilig	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	anregend
abstoßend	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	anziehend
unangenehm	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	angenehm
bedrohlich	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	harmlos
harmonisch	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	disharmonisch
aufdringlich	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	unaufdringlich
laut	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	leise
beruhigend	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	aufregend
anstrengend	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	erholsam

Kam es beim Hören der Geräusche zu einer technischen Störung, Unterbrechung o.Ä was das Abhören eingeschränkt hat?

- ☐ Ja
- ☐ Nein
- ☐ Falls Ja, welche?

Anhang B

Fragebogen Studie zur Wahrnehmung von Sicherheitsabständen in Abhängigkeit von emotionalisierenden Sounds

Begrüßungstext

Untersuchung der Einschätzung des Sicherheitsabstandes von Autofahrer*innen

Vielen Dank, dass Sie an dieser Studie teilnehmen! Bitte lesen Sie alle Anweisungen genau durch. Der Versuch sollte etwa 15 min Ihrer Zeit beanspruchen. **Bitte führen Sie diese Studie auf PC/Mac/Laptop durch und nicht auf Mobilgeräten. Nutzen Sie bitte unbedingt Kopfhörer während der Studie.**

Nach einigen demografischen Fragen werden Ihnen im ersten Teil der Studie fünf Videos gezeigt. Bei diesen sollen Sie den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einschätzen und angeben, ob Sie als Fahrer*in einen anderen Abstand wählen würden. Im zweiten Teil folgen Fragen zu den gezeigten Videos. Zu den Abschnitten wird es jeweils ein Einführungsbeispiel geben.

Ihre Beurteilungen sollten **intuitiv** erfolgen. **Machen Sie sich daher nicht lange Gedanken und verwenden Sie keine Methoden**, um den Sicherheitsabstand zu schätzen. **Bitte schauen Sie sich die Clips vor der Beantwortung der Fragen immer in voller Länge an, ohne zu pausieren.** Bei dieser Untersuchung geht es um Ihren subjektiven Eindruck. Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten.

Als Dankeschön können Sie bei Beendigung der Umfrage an einer **Verlosung eines Amazon Gutscheins in Höhe von 25 €** teilnehmen. Um an der Verlosung teilzunehmen, müssen Sie Ihre E-Mail-Adresse angeben. Diese wird getrennt gespeichert, und kann nicht mit Ihren Antworten innerhalb der Studie in Verbindung gebracht werden.

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Sie können den Fragebogen jederzeit abbrechen. **Ihre Teilnahme ist anonym, Ihre Antworten können nicht auf Sie zurückgeführt werden.** Das bedeutet ebenfalls, dass Ihr persönlicher Datensatz nach Abschluss der Befragung für uns nicht identifizierbar ist. Falls Sie nach der Studie Auskunft über Ihre Daten haben wollen oder Ihre Teilnahme zurückziehen, bitten wir Sie, dies im abschließenden Kommentarfeld (falls nötig gemeinsam mit einer Kontaktadresse) zu vermerken. **Ihre Daten werden ausschließlich für wissenschaftliche Zwecke verwendet. Die Forschung folgt keinem kommerziellen Interesse. Wir behandeln all Ihre Daten streng vertraulich.**

Demografisches

Alter:

in Jahren

Geschlecht:

☐ weiblich

☐ männlich

☐ divers

Wie fühlen Sie sich gerade?

☐ unaufmerksam

☐ eher unaufmerksam

☐ neutral

☐ eher aufmerksam

☐ aufmerksam

Fragebogen Studie zur Wahrnehmung von Sicherheitsabständen in Abhängigkeit von emotionalisierenden Sounds

Wie würden Sie Ihre momentanen Umgebungsgeräusche bewerten?

Wechseln Sie wenn möglich zu einem ruhigen Ort

laut

leise

Besitzen Sie einen gültigen Führerschein?

☐ ja

☐ nein

Anhang B

Haben Sie eine Hörbeeinträchtigung?

☐ Falls ja, welche:

☐ Falls ja aber korrigiert (z.B. Hörgerät), welche:

☐ Ich weiß es nicht

☐ nein

Haben Sie eine Sehbeeinträchtigung?

☐ Falls ja, welche:

☐ Falls ja aber korrigiert (z.B. Brille), welche:

☐ Ich weiß es nicht

☐ nein

Welche Wiedergabesysteme verwenden Sie?

Wenn möglich wechseln Sie bitte auf einen großen Monitor

Audiowiedergabe (z.B.
Kopfhörerhersteller/ -modell)

Bildwiedergabe (z.B. Laptop/ PC, Zoll
Bildschirm)

Fahrerfahrung

Wie lange besitzen Sie einen Führerschein?

in Jahren (ungefähr)

Hatten Sie in den letzten 2 Jahren einen oder mehrere Unfälle mit dem Auto?

☐ ja

☐ nein

Fragebogen Studie zur Wahrnehmung von Sicherheitsabständen in Abhängigkeit von emotionalisierenden Sounds

Wie viele Kilometer fahren Sie in etwa im Jahr?

- ☐ bis 6000 km
- ☐ 6001 km bis 9000km
- ☐ 9001 km bis 12000km
- ☐ 12001km bis 15000km
- ☐ mehr als 15001 km

Wählen Sie aus, in welchen Umgebungen Sie aktuell am häufigsten fahren

Mehrfachnennung möglich

- ☐ Stadtverkehr
- ☐ Ländlich
- ☐ Autobahn

Kontrolle/ Einführung

Einführung

- Schauen Sie sich den Clip an und stellen Sie Ihre Wiedergabegeräte so ein, dass Sie alles gut sehen können und die Fahrgeräusche deutlich hören können.
- Nutzen Sie unbedingt **Kopfhörer** für die Studie!
- Sie können diesen Clip wiederholen, bis Sie mit Ihren Einstellungen zufrieden sind. Die Clips auf den folgenden Seiten sollten nicht wiederholt werden.
- Füllen Sie dann den Fragebogen aus.
- Schätzen Sie den Abstand bitte **intuitiv**, und verwenden Sie keine Methoden zum Ableiten des Abstands.

Achtung: Falls Ihr Video während dem Abspielen immer wieder anhält: Lassen Sie es einmal am Anfang komplett laden (starten und gleich stoppen) und schauen Sie es komplett an, sobald es fertig geladen hat.

Bitte schauen Sie sich dieses Video komplett an, ohne zu pausieren oder vorzuspulen.

Wie groß schätzen Sie den Abstand zum vorausfahrenden Auto ein?

in Metern angeben

Wie bewerten Sie den gezeigten Sicherheitsabstand?

- ☐ zu niedrig. Ich würde den Abstand um Meter erhöhen.
- ☐ angemessen. Ich würde den Abstand nicht ändern.
- ☐ zu hoch. Ich würde den Abstand um Meter verringern.

Kam es zu technischen Fehlern beim Abspielen des Clips?

- ☐ Nein
- ☐ Ja, folgende:

Fragebogen Videos + Sicherheitsabstand Beispiel:

Bitte schauen Sie sich dieses Video komplett an, ohne zu pausieren oder vorzuspulen.

Wie groß schätzen Sie den Abstand zum vorausfahrenden Auto ein?
in Metern angeben

Wie bewerten Sie den gezeigten Sicherheitsabstand?

- ☐ zu niedrig. Ich würde den Abstand um Meter erhöhen.
- ☐ angemessen. Ich würde den Abstand nicht ändern.
- ☐ zu hoch. Ich würde den Abstand um Meter verringern.

Kam es zu technischen Fehlern beim Abspielen des Clips?

- ☐ Nein
- ☐ Ja, folgende:

Frage nach Beendigung des Videoteils zur Evaluation des Sicherheitsabstands:

Haben Sie bei allen der gesehenen Videos den Abstand intuitiv und ohne Hilfe von Messmethodiken
oder Bestimmungstechniken geschätzt?

- ☐ Ja
- ☐ Nein, ich habe bestimmte Techniken genutzt, um den Abstand zu bestimmen, und zwar:

Emotionale Bewertung Sounds:

Einführung

- Hören Sie sich den Clip an und stellen Sie Ihr Wiedergabegerät so ein, dass Sie die Fahrgeräusche gut hören können.
- Nutzen Sie unbedingt **Kopfhörer** für die Studie!
- Sie können diesen Clip wiederholen, bis Sie mit Ihren Einstellungen zufrieden sind.
- Nachdem alles richtig eingestellt ist, hören Sie sich den Clip noch einmal komplett an.
- Bewerten Sie die dann die Geräusche nach Ihrem Empfinden.

Hören Sie sich den Audioclip eines Fahrzeugs komplett an und beantworten Sie danach die Fragen.

Wie fühlten Sie sich beim Hören des Clips?

- ☐ ernst
- ☐ traurig
- ☐ ängstlich
- ☐ unbeschwert
- ☐ bedroht
- ☐ beruhigt
- ☐ aufgeregt

Fragebogen Studie zur Wahrnehmung von Sicherheitsabständen in Abhängigkeit von emotionalisierenden Sounds

Wie bewerten Sie das Geräusch?

	trifft stark zu	trifft zu	trifft eher zu	weder noch	trifft eher zu	trifft zu	trifft stark zu	
gleichmäßig	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	ungleichmäßig
grob	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	fein
hart	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	weich
hochfrequent	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	tiefrequent
lebhaft	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	ruhig
rau	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	glatt
tonhaltig		☐	☐	☐	☐	☐	☐	nicht tonhaltig
harmonisch	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	disharmonisch
dumpf	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	metallisch

Wie wirkt das Geräusch auf Sie?

	trifft stark zu	trifft zu	trifft eher zu	weder noch	trifft eher zu	trifft zu	trifft stark zu	
langweilig	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	anregend
abstoßend	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	anziehend
unangenehm	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	angenehm
bedrohlich	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	harmlos
harmonisch	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	disharmonisch
aufdringlich	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	unaufdringlich
laut	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	leise
beruhigend	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	aufregend
anstrengend	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	erholsam

Nach Abschluss Fragebogen:

Klarstellung:

Bitte geben Sie die folgenden Informationen nicht weiter!

Vielen Dank für Ihre Teilnahme bisher! Diese Studie betrachtet nicht nur, wie gut Menschen den Sicherheitsabstand im Straßenverkehr schätzen können. Es wird auch untersucht, ob unterschiedliche Geräusche einen Einfluss auf die Einschätzung und Wahl des Sicherheitsabstands haben können. Zusätzlich wird die emotionale Wirkung von Geräuschen untersucht.

Dieses Wissen könnte das Ergebnis der Erhebung beeinflussen und wurde Ihnen deshalb bis jetzt vorenthalten. Aus diesem Grund bitten wir Sie auch darum, dieses Wissen nicht mit Menschen zu teilen, die noch nicht an dieser Studie teilgenommen haben.

Vielen Dank!

Haben Sie alle Fragen dieser Studie ehrlich und gewissenhaft ausgefüllt?

☐ Ja

☐ Nein

Anhang C

Fragebogen Studie zur Wirkung eines ESD auf das Fahrverhalten

Teil I

Ihr Alter (in Jahren)

- ☐ 17 oder jünger
- ☐ 18-25
- ☐ 26-35
- ☐ 36-45
- ☐ 46-55
- ☐ 56-65
- ☐ 66 oder älter

Ihr Geschlecht

- ☐ Männlich
- ☐ Weiblich
- ☐ Divers

Wie fühlen Sie sich gerade?

- ☐ unaufmerksam
- ☐ eher unaufmerksam
- ☐ neutral
- ☐ eher aufmerksam
- ☐ aufmerksam

Haben Sie eine Hörbeeinträchtigung?

- ☐ Nein
☐ Falls ja, welche:

- ☐ Falls ja, aber korrigiert (z.B. Hörgerät), welche:

- ☐ Ich weiß es nicht

Haben Sie eine Sehbeeinträchtigung?

- ☐ Nein
☐ Falls ja, welche:

- ☐ Falls ja, aber korrigiert (z.B. Brille), welche:

- ☐ Ich weiß es nicht

Besitzen Sie einen Führerschein?

- ☐ Ja
Falls ja, wie viele Jahre?

- ☐ Nein

Hatten Sie in den letzten 2 Jahren einen Autounfall?

- ☐ Ja
- ☐ Nein

Wie viele Kilometer fahren Sie in etwa im Jahr?

- ☐ bis 6000 km
- ☐ 6001 km bis 9000km
- ☐ 9001 km bis 12000km
- ☐ 12001km bis 15000km
- ☐ mehr als 15001 km

Wählen Sie aus, in welchen Umgebungen Sie aktuell am häufigsten fahren
(Mehrfachnennungen möglich)

- ☐ Stadtverkehr
- ☐ Ländlich
- ☐ Autobahn

Haben sie bereits Erfahrung mit dem Fahren eines E-Fahrzeugs?

- ☐ Ja
- ☐ Nein

Haben sie bereits Erfahrung mit dem Fahren eines Automatik-Fahrzeugs?

- ☐ Ja
- ☐ Nein

Teil II

Wie fühlen Sie sich gerade?

- ☐ unaufmerksam
- ☐ eher unaufmerksam
- ☐ neutral
- ☐ eher aufmerksam
- ☐ aufmerksam

Haben Sie in einer der beiden Fahrten eine Änderung am Geräusch des Fahrzeugs wahrgenommen, die Ihnen ungewöhnlich vorkam?

- ☐ Ja
- ☐ Nein

Falls ja: Wie würden Sie diese Geräuschänderung beschreiben?

Falls ja: In welcher Situation haben Sie diese Geräuschänderung wahrgenommen?

Falls ja: Wie haben Sie sich bei dieser Geräuschänderung gefühlt?

Falls ja: Wie haben Sie sich bei dieser Geräuschänderung verhalten?

Haben Sie alle Fragen gewissenhaft beantwortet?

- ☐ Ja
- ☐ Nein

Sind Sie bei den Fahrten im Simulator so gefahren, wie sie auch im realen Verkehr gefahren wären?

- ☐ Ja
- ☐ Nein

Falls nein: Wie hat sich Ihr Fahrverhalten unterschieden?

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Manuel Kurt Fernand Petersen

Geburtsdatum: 24.10.1984

Staatsangehörigkeit: Deutsch/Französisch

Familienstand: Verheiratet

Bildungsgang

1991 – 1995 Südschule Neureut (Grundschule)

1995 – 2002 Schulzentrum Neureut (Realschulabschluss)

2003 – 2006 Albert-Einstein-Gymnasium (Abitur)

2006 – 2014 Studium des Maschinenbaus mit Vertiefungsrichtung Mechatronik und Mikrosystemtechnik (Diplom)

Berufstätigkeit

02.2014 – 02.2018 NVH Ingenieur bei der BorgWarner Turbosystems GmbH

03.2018 – 12.2023 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruhe Institut für Technologie

Seit 04.2025 Softwareentwickler für Audio-Plugins bei der HOFA GmbH