

---

# Erprobung psychoakustischer Parameter für innovative Lärminderungsstrategien

---

Berichte der Bundesanstalt für  
Straßen- und Verkehrswesen  
Verkehrstechnik Heft V 391

---

# Erprobung psychoakustischer Parameter für innovative Lärminderungsstrategien

---

von

Astrid Oehme, Sandra Böhm, Hanns-Peter Horn, Sophie Pourpart, Paul Schweidler  
HFC Human-Factors-Consult GmbH, Berlin

Stefan Weinzierl, André Fiebig, Moritz Schuck  
Technische Universität Berlin

---

Berichte der Bundesanstalt für  
Straßen- und Verkehrswesen  
Verkehrstechnik Heft V 391

**bast**   
Bundesanstalt für  
Straßen- und Verkehrswesen

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

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

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

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 02.0431  
Erprobung psychoakustischer Parameter für innovative Lärminderungsstrategien

Fachbetreuung:  
Michael Chudalla

Referat:  
Umweltschutz, Immissionen

Herausgeber:  
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:  
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:  
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: [kontakt@schuenemann-verlag.de](mailto:kontakt@schuenemann-verlag.de)  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9331 | ISBN 978-3-95606-831-7 | <https://doi.org/10.60850/bericht-v391>

Bergisch Gladbach, März 2025

## **Kurzfassung – Abstract**

### **Erprobung psychoakustischer Parameter für innovative Lärminderungsstrategien**

Die Wirkung von Lärm wird bislang nahezu ausschließlich anhand des Grades der Belästigung im Verhältnis zum Tag-Abend-Nacht-Lärmindex oder dem energieäquivalenten Dauerschallpegel betrachtet. Im Gegensatz zu Schall hat Lärm jedoch eine subjektive Komponente, deren Objektivierung komplex ist. Insbesondere für Straßenverkehrsgeräusche bestehen noch Forschungslücken für eine differenzierte Betrachtung dieser Wahrnehmungskomponente.

Ziel des Vorhabens war es daher, die Anwendbarkeit psychoakustischer Parameter zur Bewertung von Straßenverkehrsgeräuschen zu prüfen und die wahrnehmungsbezogene Wirksamkeit des gängigen Maßnahmenspektrums gegen Straßenverkehrslärm jenseits der Reduzierung des Schalldruckpegels zu explorieren. Hierfür wurden in drei aufeinander aufbauenden Studien Straßenverkehrsszenen akustisch hochwertig und realistisch in einer virtuellen Testumgebung präsentiert, um a) Attribute für Straßenverkehrsgeräusche zu erheben, b) daraus ein Modell für Beschreibungsdimensionen zu erarbeiten sowie Prädiktionsmodelle auf Basis psychoakustischer Kenngrößen zu berechnen und c) durch audio-visuelle Modifikationen der ursprünglichen Straßenverkehrsszenen herkömmliche und neuartige Lärmschutzmaßnahmen zu untersuchen.

Die Studienergebnisse zeigen deutlich, dass Menschen Lärm auf mehreren Dimensionen wahrnehmen, die interindividuell Bestand haben. Für die Erhebung dieser Dimensionen wurde ein Fragebogen entwickelt, der eine umfassende qualitative Beurteilung des Höreindrucks ermöglicht. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Wahrnehmungsdimensionen zu einem gewissen Anteil anhand messbarer psychoakustischer Parameter bestimmen lassen. Damit können Messungen qualitativ besser eingeordnet werden. Mit den entwickelten Modellen und Instrumenten konnten die Unterschiede in der Wirksamkeit verschiedener Lärminderungsstrategien herausgestellt und die Wirkungsweise innovativer Ansätze untersucht werden.

### **Testing psychoacoustic parameters for innovative noise reduction strategies**

The impact of noise has been considered so far almost exclusively on the basis of the degree of annoyance in relation to the day-evening-night noise level or the energy-equivalent continuous sound level. Unlike sound, however, noise has a subjective dimension that is complex to objectify. Especially for road traffic noise, there are still research gaps for a differentiated consideration of this perceptual component.

The project therefore aimed at examining the applicability of psychoacoustic parameters for the assessment of road traffic noise and at exploring the perceptual effectiveness of the current spectrum of measures against road traffic noise beyond the reduction of the sound pressure level. For this purpose, road traffic scenes were presented in three consecutive studies with high acoustic quality and realism in a virtual test environment to a) collect attributes for road traffic noise, b) develop a model to determine descriptive dimensions and calculate predictive models based on psychoacoustic parameters, and c) investigate conventional and novel noise reduction measures by audio-visual modifications of the original road traffic scenes.

The study results clearly show that people perceive noise on several dimensions that are inter-individually consistent. For the assessment of these dimensions a questionnaire was developed, which allows a comprehensive qualitative evaluation of the auditory impression. It was shown that the perceptual dimensions can be determined on the basis of psychoacoustic parameters to a certain extent. This allows a better qualitative classification of measurements. With the developed models and instruments, the differences in the effectiveness of various noise reduction strategies could be highlighted and the impact of innovative approaches could be investigated.

# Summary

## Testing psychoacoustic parameters for innovative noise reduction strategies

### 1 Research goal

Noise impact research has been dealing with the exposure to road traffic noise and the resulting extra-aural noise effects for many years. The effect of road traffic noise is considered in noise impact studies almost exclusively on the basis of the degree of annoyance in relation to the day-evening-night noise index or the energy-equivalent continuous sound level. In contrast to sound as a physically defined, measurable quantity, however, noise has a subjective component whose objectification is complex. A differentiated analysis of the complexity of this perceptual component has been carried out so far for environmental noise in general, but for road traffic noise research gaps still exist to a considerable extent.

The aim of the present project was to test the applicability of psychoacoustic parameters, i.e. distinct, basal auditory sensations, for the assessment of road traffic noise and to explore the perceptual effectiveness of the current range of measures against road traffic noise beyond the reduction of sound pressure levels. In particular, human perception and affective evaluation of traffic noise were to be investigated and systematized with the best possible ecological validity. Specifically, it was intended to determine which perceptual dimensions can be used to describe the effect of road traffic noise on humans, which correlations exist between level indicators and (psycho)acoustic variables with these perceptual dimensions and noise annoyance, and finally whether (psycho)acoustic parameters can thus be used to evaluate noise conditions and to improve the prediction of the effectiveness of noise reduction measures.

### 2 Procedure

A literature review on (psycho)acoustic parameters as well as on the perception and assessment of environmental noise was prepared first in order to achieve the project objective. Based on this, initial study concepts for the planned series of experiments were derived. In the next step, these concepts were transferred into experimental designs and the study material was prepared. Central to this was the recording of acoustically high-quality and realistic road traffic scenes, which varied in relevant criteria such as immission point, traffic volume, traffic composition and road surface, and thus covered the range of possible road traffic sounds. The recordings were prepared for acoustic and visual reproduction in a laboratory environment. In three consecutive studies, which took place in the Mixed Reality Design Lab of the Technische Universität Berlin and the Universität der Künste Berlin, the above mentioned research questions were explored.

The aim of the first study was to collect subjective descriptions for road traffic sounds. For this purpose, 22 participants were presented with a selection of prepared audio-visual road traffic scenes in 40 pairwise comparisons using VR goggles. The participants had the task to name attributes that best describe their individual auditory impression regarding each individual scene and the experienced differences when comparing both scenes per pair. The named attributes of all participants were then categorized in a multistage procedure on the basis of which a selection of 59 unipolar items (attributes) was made.

The second study was dedicated to the derivation of a model for descriptive dimensions based on this item pool, as well as the calculation of prediction models based on (psycho-)acoustic parameters. The 59 attributes were evaluated by means of a digital questionnaire for a selection of 15 road traffic scenes by 78 persons. The survey was conducted as a listening test without visualization of the scenes. To derive the descriptive dimensions, the collected ratings were subjected to successive factor analyses. To derive models based on (psycho)acoustic parameters and other acoustic characteristics (audio features), the road traffic scenes were first subjected to a statistical audio content analysis. Subsequently, linear prediction models were calculated to test the correlations between the identified descriptive dimensions and the (psycho)acoustic parameters.

In the third study, conventional (road surface, noise barrier) and novel (masking fountain noise) noise reduction measures were implemented by audio-visual modifications of the original road traffic scenes. The influence of these measures on the rating of annoyance was examined, and how the measures (and also the original scenes) were rated with respect to the previously derived descriptive dimensions. The evaluation was carried out for 17 road traffic scenes by 40 persons.

Finally, the results were evaluated against the background of the research questions and an outlook on further research topics was proposed.

### 3 Results

Central results of the project are on the one hand a questionnaire for the comprehensive subjective evaluation of road traffic noise by means of validated descriptive dimensions for this special field of application. On the other hand, the calculation of prediction models demonstrated that ratings based on these descriptive dimensions can be predicted more accurately using (psycho)acoustic parameters. Finally, differentiated statements about the effect of conventional and novel noise protection measures could be derived. It also became apparent that noise perception is a multifaceted phenomenon that cannot be adequately described by the characteristics of sound pressure levels alone.

**Questionnaire:** The developed questionnaire captures the descriptive dimensions VALENZ (valence), DYNAMIK (dynamics), RISKANZ (riskiness), SCHWERE (heaviness), SCHÄRFE (sharpness), NÄHE (proximity) and KONSISTENZ (consistency) with three items each<sup>1</sup>.

- VALENZ: This dimension measures as how pleasant, calming and relaxing an auditory stimulus is perceived. It is thus similar to the well-known classical affect dimension *valence*, which has already been used in other research to evaluate environmental sounds.
- DYNAMIK: This dimension describes as how eventful, vivid and detailed an auditory impression is evaluated. For this dimension, the highest prediction quality could be achieved by audio features.
- RISKANZ: This dimension summarized as how threatening, alarming, and aggressive a stimulus is perceived, and thus also represents an affective component of the listener's experience. For this dimension a good prediction quality could be achieved by means of selected audio features as well.
- SCHWERE: The dimension includes humming, booming and muffled descriptors, i.e. rather low-frequency, bass-containing aspects of an auditory stimulus.
- SCHÄRFE: The dimension corresponds in content and in the calculated models well with the established psychoacoustic parameter *sharpness*.
- NÄHE: The dimension describes how direct, close and dominant an auditory event is perceived and corresponds, among others, with the sound pressure level.
- KONSISTENZ: With the help of this dimension it can be evaluated how consistent, monotonous and flowing an auditory event is perceived.

The factor structure of the questionnaire, tested by confirmatory factor analysis, proved to be robust. In addition, a high construct validity could be determined and a good retest reliability could be observed. The questionnaire is suitable for the evaluation of road traffic noise by laypersons and experts.

**Prediction quality of (psycho)acoustic parameters:** The machine learning algorithm LASSO was applied to test (psycho)acoustic parameters with respect to their predictive quality for the descriptive dimensions. Prediction models were built with the data set from the second study and evaluated with the data set from the third study. The majority of the prediction models proved to be robust against the new data sets from the third study.

It was shown that different (psycho)acoustic parameters are relevant for the different descriptive dimensions. Conventional sound pressure level indicators ( $L_{Aeq}$ ,  $L_{Ceq}$ ), standardized psychoacoustic parameters (loudness, sharpness), and special parameters from the field of audio content analysis (timbral booming, spectral skewness) were used in the linear prediction models. For example, a model for the prediction of annoyance was based on the combination of the quantities of the C-weighted sound pressure level ( $L_{C5}$ ), the 3rd mel-frequency cepstral coefficient (MFCC) and the spectral skewness. The model was able to reproduce the data from the third study on the effect of noise reduction measures very well. Also, the evaluations concerning the dimension VALENZ could be predicted well by a combination of sound pressure level variables ( $L_{A95-LA5}$ ,  $L_{C5}$ ) and the auditory parameter *Timbral Warmth*.

---

<sup>1</sup> Please note that the dimensions and items are labeled in German. The English translations are currently only an approximation and subject to further research.

Overall, all prediction models developed for the various descriptive dimensions of the perception of road traffic noise consistently showed good prediction results even for the data of the third study, which were unknown during model development. Only the model for calculating the characteristics of road traffic noise with regard to the dimension SCHÄRFE was not able to satisfactorily approximate the evaluations from the study with virtually implemented noise protection measures. A detailed analysis clarified that the model inadequately represented the effects of the additive sound design measure, i.e., the introduction of masking fountain noise. The developed prediction models hence need to be evaluated and validated in further studies, with a particular focus on considering innovative noise control measures based on additive sound design.

**Effect of noise reduction measures:** Four road traffic scenes were selected that were suitable for depicting different noise reduction measures. The noise reduction measures low noise pavement, noise barrier and fountain were evaluated in each case in distinct road traffic scenes. Each measure was available in two versions and was also tested against the respective scene without measure. In a fourth traffic scene, all noise reduction measures were implemented separately from each other.

Overall, the different noise reduction measures had different effects on the auditory impression, whereby the influence on some descriptive dimensions was significantly more pronounced than on others. As expected, it was observed that traffic noise was perceived as less annoying, more pleasant, less threatening and less direct depending on the height of the noise barrier (1.5 vs. 3 meters). The fountains (A and B with different noise characteristics) resulted in sound perceived as more flowing and consistent compared to the control condition. Both fountains led to an increase in perceived NÄHE and a reduction in perceived SCHÄRFE in the fourth road traffic scene. The entire scene was perceived to be more direct, more dominant, and less whistling and howling compared to the control condition. This gives reason to believe that the expected masking effects have occurred due to the sound of the splashing fountain water. For fountain B this even resulted in a more positive VALENZ. These effects could also be observed in a reduced form for the further investigated fountain scene. Presumably due to small acoustic differences caused by the simulated road surfaces, this measure had little effect on the ratings.

## 4 Summary and outlook

In summary, the study results clearly demonstrate that people perceive noise as an impression on several dimensions that are inter-individual and can be specifically addressed. For the elicitation of these dimensions, a questionnaire was developed and tested, which allows a qualitative assessment of the auditory impression apart from exclusively loudness-related variables. Furthermore, it could be shown that the perceptual dimensions can be determined to a certain extent on the basis of measurable (psycho)acoustic parameters. Although this cannot substitute for studies with test persons, measurements can be better classified in terms of quality. Finally, the developed models and instruments were used to highlight the differences in the effectiveness of various noise reduction strategies and to better understand the effects of innovative approaches such as masking.

The observed correlations can now be used to develop targeted noise reduction measures that positively influence certain perception-related aspects beyond the global noise annoyance associated with the auditory impression. For example, further masking methods could be considered, whose effect could moderate characteristics such as the perceived SCHÄRFE or SCHWERE and thus also have a positive influence on the VALENZ of the impression. The computational models for the prediction of the individual perceptual dimensions by means of (psycho)acoustic parameters should be validated in further studies in order to be able to reliably assess their generalizability and range.

# Inhalt

Glossar	10
1 Einleitung	13
2 Psychoakustische Parameter und Messgrößen	16
2.1 Klassische psychoakustische Parameter	16
2.2 Audio Features	18
2.3 Wahrnehmung und Bewertung von Umgebungsgeräuschen	22
2.3.1 Soundscapes	22
2.3.2 Beschreibungsdimensionen	25
2.3.3 Lärmschutzmaßnahmen	27
2.4 Fazit für die Studiendurchführung	32
2.4.1 Unabhängige Variablen (UV)	33
2.4.2 Abhängige Variablen	34
2.4.3 Umsetzung der Studien im Simulator: Schallfeldsynthese und Raumakustiksimulation	35
3 Studie zur Entwicklung von Beschreibungsdimensionen	37
3.1 Versuchsmaterial	37
3.1.1 Technisches Set-Up: Aufnahmeaufbau	37
3.1.2 Aufnahme der Soundscapes	38
3.1.3 Auswahl der Dyaden	39
3.1.4 Vorbereitung der Testumgebung	40
3.1.5 Postproduktion der Aufnahmen	41
3.2 Versuchsdesign	41
3.3 Versuchsdurchführung	42
3.4 Stichprobe	44
3.5 Ergebnisse	45
3.5.1 Datenbereinigung	45
3.5.2 Kategorisierung nach Beschreibungsdimensionen	46
4 Studie zur Modellbildung	54
4.1 Versuchsmaterial	54

4.1.1	Technisches Set-Up: Aufnahmeaufbau	54
4.1.2	Auswahl der Stimuli	54
4.1.3	Wiedergabe der Stimuli	55
4.1.4	Vortest	55
4.2	Versuchsdesign	56
4.3	Versuchsdurchführung	58
4.4	Stichprobe	59
4.5	Ergebnisse	59
4.5.1	Datenaufbereitung	59
4.5.2	Kurzbeschreibung der Analysemethode	60
4.5.3	Strukturentdeckender Teil	60
4.5.4	Hypothesenprüfender Teil	62
4.5.5	Bewertungsunterschiede zwischen Laien und Experten	63
4.6	Prädiktionsmodelle auf Basis von Audioinhaltsanalysen	66
4.6.1	Extraktion von Audio Features	66
4.6.2	Lineare Vorhersagemodelle	68
5	Studie zur Prüfung von Lärmschutzmaßnahmen	72
5.1	Versuchsmaterial	72
5.1.1	Auswahl der Stimuli	72
5.1.2	Räumliche Filterung und Modifikation des Audiomaterials	74
5.1.3	Umsetzung der visuellen Augmentation	77
5.1.4	Wiedergabe der audio-visuellen Stimuli	78
5.1.5	Vortest	79
5.2	Versuchsdesign	79
5.3	Versuchsdurchführung	82
5.4	Stichprobe	83
5.5	Ergebnisse	84
5.5.1	Maßnahmen im Vergleich	85
5.5.2	Belagsvarianten	87
5.5.3	Brunnenvarianten	88
5.5.4	Schallschutzwände	90
5.5.5	Qualität des entwickelten Untersuchungsinstruments	92
5.6	Erprobung der (psycho)akustischen Prädiktionsmodelle	93

6	Zusammenfassung und Fazit	96
	Literatur	100
	Bilder	110
	Tabellen	112
	Anhang I	113
	Anhang II	115

## Glossar

Begriff	Definition
Ambisonics	(auch Ambisonic). Verfahren zur Aufnahme und Wiedergabe eines Klangfeldes. Für die Wiedergabe ist keine feste Anzahl von Lautsprechern vorgegeben. Die jeweiligen Signale werden nach mathematischen Vorgaben aus den übertragenen Werten für Schalldruck- und Schallschnelle für jede einzelne Lautsprecherposition berechnet.
Comparative Fit Index	(CFI). Quantifiziert die Güte, mit der die empirischen Beziehungen im Datensatz insgesamt durch das Modell vorhergesagt werden (s.a. TLI)
Explorative Datenanalyse	(EFA). Dient der Analyse und Untersuchung von Datensätzen über die formalen Modellierungs- oder Hypothesentestaufgabe hinaus und bietet ein besseres Verständnis der Variablen des Datensatzes und der Beziehungen zwischen ihnen
Jitter	Schnittstelle der Max/MSP-Oberfläche, mit der 2D/3D Vektorgrafiken und Effekte angesteuert werden können.
Konfirmatorische Faktorenanalyse	(CFA). Multivariates Analyseverfahren zur statistischen Überprüfung einer beobachteten Merkmalen zugrunde liegenden angenommenen latenten Faktorenstruktur.
Konstruktreliabilität	Gibt an, wie zuverlässig die einzelnen Items die jeweiligen Faktoren des Konstrukts erheben bzw. wie (statistisch) schlüssig die einzelnen Faktoren in sich sind.
LASSO	Least absolute shrinkage and selection operator
MANOVA	(multivariate Varianzanalyse). Varianzanalyse mit mehreren abhängigen Variablen. Dabei wird untersucht, ob es

	einen multivariaten Unterschied zwischen den Gruppen über alle abhängigen Variablen hinweg gibt.
Maximum-Likelihood-Schätzer	(MLR). Verfahren zur Schätzung von Parametern einer Grundgesamtheit auf Basis einer Stichprobe. Grundgedanke ist, den Wert eines Parameters so zu bestimmen, dass das Auftreten der konkreten Beobachtungen in der Stichprobe am wahrscheinlichsten ist.
Oblimin Verfahren	Methode der Faktorrotation, die keine vollständige inhaltliche Unabhängigkeit (= Orthogonalität) der Faktoren unterstellt bzw. voraussetzt.
Plane-Wave-Decomposition	Ermittlung der Amplituden, Phasen und Richtungen von ebenen Wellen, die zusammengenommen eine beliebige Wellenfront approximieren.
RMSE	(Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme). Maßzahl zur Beurteilung der Prognosegüte
Spherical Harmonics (Kugelflächenfunktionen)	Spezielle Funktionen, mit denen die Oberfläche einer Kugel beschrieben wird. Sie werden häufig zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen verwendet. Da die sphärischen Harmonischen einen vollständigen Satz orthogonaler Funktionen und damit eine orthonormale Basis bilden, kann jede auf der Oberfläche einer Kugel definierte Funktion als Summe dieser sphärischen Harmonischen geschrieben werden.
Tucker-Lewis Index	(TLI). quantifizieren die Güte, mit der die empirischen Beziehungen im Datensatz insges. durch das Modell vorhergesagt werden (s.a. CFI)
Varianzanalyse	(ANOVA). Gruppe statistischer Signifikanztests zur Prüfung von Mittelwertunterschieden einer abhängigen Variablen für verschiedene Stufen einer

---

	mehrklassigen unabhängigen Variablen oder mehrerer unabhängiger Variablen.
Virtual Studio Technology	(VST). Programmierschnittstelle für Audio-Plug-ins. Über die Schnittstelle können virtuelle Effektgeräte und Instrumente in einer Musik-Software verwendet werden.
Zweifaktorielle Varianzanalyse	Methode zur Erkennung signifikanter Unterschiede zwischen den Mittelwerten mehrerer Gruppen, die sich hinsichtlich zweier Faktoren unterscheiden.

---

# 1 Einleitung

Die Lärmwirkungsforschung beschäftigt sich bereits seit vielen Jahren mit der Belastung des Menschen durch Straßenverkehrsgeräusche und dadurch hervorgerufenen extra-auralen Lärmwirkungen einschließlich der Lärmbelästigung (BERGLUND et al. 1999, BABISCH 2006, MÜNZEL et al. 2020). Bisher erfolgte dabei jedoch keine differenzierte Betrachtung der Komplexität der Wahrnehmung. Die Wirkung von Straßenverkehrsgeräuschen wird in Lärmwirkungsstudien nahezu ausschließlich anhand des Grades der Belästigung im Verhältnis zum Tag-Abend-Nacht-Lärmindex ( $L_{DEN}$ ) oder dem energieäquivalenten Dauerschallpegel  $L_{Aeq}$  betrachtet. Zwar explorierten einige Arbeiten (z.B. AXELSSON et al., 2010) bereits verschiedene Dimensionen, die der Wahrnehmung von Umgebungsgeräuschen zu Grunde zu liegen scheinen und orientierten sich dabei stark an Erkenntnissen der Umweltpsychologie (z. B. MEHRABIAN & RUSSELL 1974), jedoch wurden die Dimensionen weder spezifisch für Straßenverkehrsgeräusche noch im Kontext virtueller Realität mit hoher Immersionsgüte ermittelt.

Im Gegensatz zu Schall als physikalisch definierte, messbare Größe hat Lärm eine subjektive Komponente, deren Objektivierung komplex und bis heute nur ansatzweise erforscht ist. Lärm wird allgemein als unerwünschter Schall bezeichnet (ISING et al. 1996b; NIEMANN, HAMMERSEN & LAUßMANN 2014). Das Bundesimmissionsschutzgesetz (2013) definiert Umgebungslärm als „belästigende oder gesundheitsschädliche Geräusche im Freien, die durch Aktivitäten von Menschen verursacht werden, einschließlich des Lärms, der von Verkehrsmitteln, Straßenverkehr, Eisenbahnverkehr, Flugverkehr sowie Geländen für industrielle Tätigkeiten ausgeht [...]“. Unerwünscht ist Lärm, weil er a) die Gesundheit schädigt, b) die Leistung mindert, c) die Kommunikation stört und belästigt sowie d) die subjektive Befindlichkeit beeinträchtigt (ISING et al. 1996b, OKOKON et al. 2018, WALLAS et al. 2018). Laut WHO (2018) sollte der Begriff „Gesundheit“ als ein ganzheitliches Konstrukt aus körperlichem, mentalem und sozialem Wohlbefinden verstanden werden. Auswirkungen von Umgebungslärm können z. B. Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Schlafstörungen, kognitive Beeinträchtigungen, dauerhafte Gehörschäden und Tinnitus, pränatale Beeinträchtigungen und Fehlgeburten oder auch ein geringeres allgemeines Wohlbefinden und verringerte mentale Gesundheit sein (UMWELTBUNDESAMT 2019). Verhältnismäßig leicht ist es, die aurale Wirkung, also die Schädigungen des Gehörs, von Lärm bei hohen Schallstärken zu erfassen und zu definieren. Beispiele sind Wirkungen von lauten Maschinen oder Flugzeugturbinen in unmittelbarer Nähe. Die aurale Wirkung hängt von der Dauer und der Intensität der Beschallung ab (ISING et al. 1996a). Dieser Aspekt von Lärm ist über (möglicherweise frequenzbandkorrigierte) Schalldrücke beschreibbar.

Wesentlich schwieriger ist die objektive Erfassung der auf emotionalen und kognitiven Prozessen beruhenden Wirkungen von Schall, die auch bei „leisen“ Geräuschen auftreten können – eine Betrachtungsweise, die Lärm als physischen Stressor auffasst (ISING et al. 1996b). Wie NIEMANN et al. (2014: S. 1) zusammenfassen, hat Lärm analog zu anderen Stressoren sowohl „psychische (Belästigung, Ärger, Anspannung) als auch physiologische (endokrinologische, vegetative) Komponenten, die Einfluss nehmen auf bestimmte Funktionssysteme des menschlichen Organismus, wie z. B. das Herzkreislaufsystem oder den Stoffwechsel.“ Da psychische und physische Wirkungen eng miteinander gekoppelt sind, kann dauerhafte Belästigung auch negative gesundheitliche Folgen haben und z. B. das Risiko depressiver Symptome erhöhen

(ORBAN et al. 2016). Da „Belästigung“ stark individuell ist, ist allerdings – wie erwähnt – die Objektivierung über physikalisch messbare oder berechenbare Kennwerte des Schalls schwierig.

In Ermangelung besserer Indikatoren werden zur Bewertung von Lärm heute in der Regel einfache Schalldruckkennwerte herangezogen. So werden beispielsweise in den Leitlinien für Umgebungslärm der WHO (2018) Grenzwerte für die Lärmbelastung durch Straßenverkehr in Werten wie „Durchschnittliche Belastung“ oder „Nächtliche Dauerschallbelastung“, jeweils operationalisiert in dB(A)-Werten, gefordert (UMWELTBUNDESAMT 2019).

Die Bedeutsamkeit des Straßenverkehrslärms wird in der Einschätzung der WHO deutlich, welche im westlichen Europa den Verlust von gesunden Lebensjahren (DALY) aufgrund von Erkrankungen, die durch Verkehrslärm verursacht wurden, auf mindestens eine Million schätzt (WHO 2011). Im Sinne des Gesundheitsschutzes muss also die Reduzierung des Verkehrslärms gefordert werden, wie es sich in den Forderungen der WHO (2018) widerspiegelt. Bekannte Maßnahmen zur Lärminderung im Bereich Verkehr sind die Reduzierung der Verkehrsstärke, Lärmschutzwände oder auch technische Maßnahmen an Reifen oder Straßenbelag zur Reduzierung des Abrollgeräusches. Alle Maßnahmen zielen aber auf eine (physikalisch definierte) Geräuschabsenkung ab, die zwar auch zur Verminderung der Lästigkeit des Schalleindrucks oder der psychischen Beeinträchtigung durch diesen führt, die aber nicht berücksichtigt, dass die subjektive Lärmempfindung nicht nur vom (bewerteten) Schalldruckpegel abhängt. Eine der weiteren lärmbeeinflussenden Faktoren ist beispielsweise der allgemeine Geräuschcharakter (GENUIT, SCHULTE-FORTKAMP & FIEBIG 2023). Diese psychoakustische Maskierung kann man sich zu Nutze machen, um durch ausgesuchten Zusatzschall den Lärmeindruck zu mindern. Mehr Schall kann also zu geringerem, subjektiv empfundenem Lärm führen. Da Maßnahmen zur Schallreduzierung immer auch mit Kosten verbunden sind, kann erwartet werden, dass zielgerichtete Maßnahmen, die spezifisch auf die Reduzierung der störenden Komponente im Verkehrslärm ausgelegt sind, besonders effektiv und ökonomisch sind. Somit erweist sich eine ganzheitliche Betrachtung der „Geräuschlandschaft (Soundscape) Verkehr“ als dringend erforderlich. Gleichzeitig ist jedoch eine Einschätzung des Handlungsbedarfs vor Ort und eine Planung von Lärmschutzmaßnahmen dringend auf technische Parameter angewiesen, da ein qualitativer Ansatz, wie er für die Beschreibung von Soundscapes durch Personen vor Ort vorgesehen ist (DIN ISO/TS 12913-2:2018), wenn überhaupt erst dann durchgeführt werden kann, wenn die Umgebung vorliegt, d. h. wenn etwaige Maßnahmen bereits umgesetzt sind.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollte dieser Herausforderung durch die Untersuchung der Wirkung herkömmlicher und innovativer Lärmschutzmaßnahmen im Hörsimulator begegnet werden. Dabei wurden die akustischen Eigenschaften von Verkehrsgeräuschen mit und ohne Lärmschutzmaßnahmen durch objektive Indikatoren, d. h. psychoakustische Parameter der Soundscape Verkehr, beschrieben und mittels subjektiver Deskriptoren, d. h. qualitativer Beschreibungsdimensionen, bewertet. Es wurde prospektiv geprüft, welche Lärmschutzmaßnahmen effektiv die empfundene Lästigkeit der Verkehrsgeräusche reduzieren.

Hierfür wurden sukzessive drei Probandenstudien durchgeführt. Im ersten Studienteil zur Entwicklung von Beschreibungsdimensionen (Kap. 3) wurden Attribute erhoben, die dezidiert beim Erleben von Straßenverkehrsgeräuschen verbalisiert wurden. Diese wurden im zweiten Studienteil zur Modellbildung (Kap. 4) methodisch erprobt und in ihrer

Anzahl bei möglichst gleichbleibender Aussagekraft reduziert. Im dritten Studienteil zur Prüfung von Lärmschutzmaßnahmen wurden schließlich etablierte und neue Lärminderungsstrategien unter Einsatz des in den Vorgängerstudien entwickelten Erhebungsinstrumentes erprobt (Kap. 5).

## 2 Psychoakustische Parameter und Messgrößen

Die Psychoakustik beschäftigt sich als eine Teildisziplin der Psychophysik mit der Bestimmung der funktionalen Zusammenhänge zwischen akustischen Reizen und den durch sie hervorgerufenen auditiven Empfindungen. Bisher haben sich die psychoakustischen Parameter Lautheit, Schärfe, Rauigkeit, Schwankungsstärke und Tonalität etabliert, deren Berechnungsverfahren vielfach national und international Gegenstand der Standardisierung sind. Psychoakustische Parameter beschreiben basale auditive Empfindungsgrößen, die jeweils „a sensation which we can consider separately“ (dt. „eine Empfindung, die wir separat beurteilen können“) hervorrufen (FASTL & ZWICKER 2007: S. 239). Dabei werden die psychoakustischen Parameter als rein sensorische Größen verstanden, die keiner höheren kognitiven Verarbeitung unterliegen. Die wahrnehmungsbezogenen psychoakustischen Parameter sind dabei aber nicht auf die bereits genannten klassischen Größen begrenzt. Verschiedene Signaleigenschaften und die spezifischen durch sie hervorgerufenen Empfindungen werden ebenfalls als relevante psychoakustische Größen eingestuft, z. B. die Impulshaltigkeit (SOTTEK 2014). Der Begriff „psychoakustische Parameter“ soll sich daher im Folgenden auf die Gesamtheit psychoakustisch motivierter Messgrößen beziehen, von spektral oder temporal gewichteten Schalldruckpegeln über Parameter wie Rauigkeit und Schärfe bis hin zu den sogenannten Audio Features, einer relativ neu etablierten Klasse von Parametern in der Audiosignalverarbeitung (s. Kapitel 2.2).

### 2.1 Klassische psychoakustische Parameter

Beim wichtigsten psychoakustischen Parameter Lautheit wird zwischen der stationären und zeitvarianten Lautheitsberechnung unterschieden. Frühere standardisierte Berechnungsvorschriften erlaubten die Bestimmung der stationären Lautheit auf Basis von gemittelten Terzpegeln (DIN 45631, 1991). Mittlerweile existieren Berechnungsverfahren zur Ermittlung der zeitvarianten Lautheit (DIN 45631/A1, 2010, ISO 532-1), die unmittelbar auch stationäre Lautheitsberechnungen abdecken. Dabei zeigen Untersuchungen, dass die verschiedenen Berechnungsverfahren zwar eine hohe Übereinstimmung bei den ermittelten Lautheitswerten aufweisen, vollständig deckungsgleich sind die Ergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Implementierungen und Signalverarbeitungsschritte jedoch nicht (vgl. GENUIT et al. 2009). Vor allem die Betrachtung der einzelnen gehörbezogenen Frequenzbänder zur Berechnung der spezifischen Lautheiten (Terzbandfilter oder Filter mit äquivalenten Rechteckbandbreiten) hat einen Einfluss auf das Ergebnis der Lautheitsberechnung (SCHLITTENLACHER et al. 2012). Jedoch zeigen vergleichende Untersuchungen zur Vorhersagegüte der verschiedenen Lautheitsberechnungen, dass das Zwicker-Verfahren (z. B. DIN 45631/A1, ISO 532-1) nicht nur deutlich verbreiteter in der Anwendung ist, sondern in der Regel auch besser experimentelle Daten abbilden kann. SCHLITTENLACHER et al. (2011: S. 4) halten hierzu fest: „[...] estimations of DIN 45631 (1991) are close to the subjective evaluations. [...] By contrast, the outcomes of ANSI S3.4-2007 are too high for all tested sounds, indicating that it needs further refinement.“ Bei der Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche und der Ableitung eines repräsentativen Einzahlwertes für die Lautheitsfunktion über die Zeit wird in den Normen häufig die Perzentillautheit  $N_5$  als repräsentativer Einzahlwert für die durchschnittlich empfundene Lautheit empfohlen, da der statistische Mittelwert von zeitvarianten Lautheiten im Vergleich zur beurteilten Lautheit zu niedrige Ergebnisse liefert würde (DIN 45631/A1: S. 13; FASTL 1991, KEILHACKER 2013). Insgesamt gilt, dass prominente,

laute Geräuschsequenzen innerhalb einer längeren Exposition ein höheres perzeptives Gewicht in der kognitiven Reizintegration erhalten und daher abgeleitete repräsentative Einzahlwerte diesem Effekt Rechnung tragen müssen (vgl. SCHLITTENLACHER et al. 2017, FIEBIG & SOTTEK 2015). Neben dem üblichen  $N_5$ -Wert werden daher mitunter auch das kubische Lautheitsmittel oder der Lautheitspegel in phon (equivalent continuous loudness level,  $LL_P$ ) zur Charakterisierung der Gesamtlautheit verwendet (vgl. SCHLITTENLACHER et al. 2017, FIEBIG & SOTTEK 2015).

Auch für andere psychoakustische Parameter existieren etablierte Berechnungsvorschriften oder Standards, z. B. für die messtechnische Bestimmung der Schärfe (DIN 45692, 2009). Nach der DIN 45692 würden „mit zunehmender Schärfe Geräusche üblicherweise als aggressiver und häufig auch als lästiger beurteilt“ (DIN 45692: S. 3). In mehreren Studien wurde ein positiver Zusammenhang zwischen der Ausprägung der Schärfe und dem Grad der Lästigkeit von Verkehrsgeräuschen beobachtet (z. B. ROSSBERG & GUIDATI 2009, CIK et al. 2009). Die Rauigkeit als psychoakustische Größe wird ebenfalls aktuell im Deutschen Institut für Normung standardisiert mit dem Ziel der „Festlegung einer einheitlichen Vorgehensweise bei der Bestimmung der Rauigkeit von Schallen“ (DIN 2021: S. 31).

Die Erkenntnisse der Psychoakustik fließen seit langem bereits in die Lärmbewertung und in die Entwicklung geeigneter Messgrößen zur Bewertung von Umgebungsgeräuschen ein (GENUIT et al. 2023). Beispielsweise basiert der A-Frequenzbewertungsfilter zur Anpassung des Schalldruckpegels an die frequenzabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs auf psychoakustische Grundlagen bzw. auf Kurven gleicher Lautheit (ISO 226:2003). Die Bewertung von Verkehrslärm, wie sie in Form von Lärmkarten, Lärmaktionsplänen und im Rahmen der im BUNDES-IMMISSIONSSCHUTZGESETZ (BImSchG) (2013) vorgesehenen Lärminderungsplanung vorgesehen ist, folgt den vorgegebenen Anforderungen in der Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm. Diese sehen derzeit lediglich eine Bestimmung des frequenzbewerteten Schalldruckpegels nach ISO 1996-2 vor, gehen aber in keiner Weise auf den Charakter der durch Verkehrsmittel erzeugten Geräusche ein, obwohl schon seit langem bekannt ist, dass etwa die empfundene Lästigkeit von Fluglärm nur sehr gering mit dem Schalldruckpegel korreliert (MCKENNEL 1973). Nach GUSKI (1999) können nur 30 % bis 40 % der Varianz in Untersuchungen zur Lärmbelästigung durch den Schalldruckpegel aufgeklärt werden. Neben persönlichen (z. B. individuelle Lärmempfindlichkeit, vgl. ELLERMEIER et al. 2001), und sozialen Faktoren, wird angenommen, dass durch eine Berücksichtigung der Psychoakustik weitere Varianz aufgeklärt werden könne (FIEBIG 2020).

So wird etwa bei der Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz oder bei der Bestimmung der Umwelteinwirkungen durch Geräusche von Gewerbe- und Industrieanlagen durch die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA-LÄRM 2017) der frequenzbewertete Schalldruckpegel durch verschiedene Zuschläge für die Impulshaftigkeit, die Tonhaltigkeit, die Informationshaltigkeit und für tieffrequente Anteile des Geräuschs nach DIN 45645, DIN 45680 und DIN 45681 korrigiert. Dadurch soll die tatsächliche Störwirkung des Schalls verbessert abgeschätzt werden, da bestimmte Wirkungen allein mit dem Schalldruckpegel nicht charakterisiert werden können. Zur Abschätzung von notwendigen Zuschlägen werden mitunter psychoakustisch orientierte Berechnungsverfahren hinzugezogen, um die tatsächliche Störwirkung begründet quantifizieren zu können, z. B. unter Verwendung von ECMA TR/108 (ECMA 2019) bzw. ECMA 418-2 (ECMA 2022).

Keines dieser Verfahren kommt bisher jedoch zwingend bei der Bewertung von Verkehrslärm zur Anwendung. Das Gleiche gilt für die psychoakustischen Parameter Rauigkeit und Schärfe, die nicht nur bei der Bewertung, sondern auch beim Sound Design von Maschinen- und Fahrzeuggeräuschen etabliert sind, und die auch zur Bewertung der Lästigkeit von Verkehrslärm bereits mit Erfolg eingesetzt wurden (ISHIYAMA & HASHIMOTO 2000). FASTL und ZWICKER (2007) zeigten, dass mit der Metrik „Psychoacoustic Annoyance“, die auf einer gewichteten Kombination aus den klassischen psychoakustischen Parametern basiert, die in psychoakustischen Experimenten erhobene Lästigkeit von Geräuschen vorhersagen kann. Dabei wurde die Vorhersagequalität dieser Metrik zur Charakterisierung der allgemeinen psychoakustischen Auffälligkeit von Signalen am Beispiel von bewerteten Fahrzeuggeräuschen bestätigt.

Untersuchungen zur Lästigkeit von einzelnen Kraftfahrzeugvorbeifahrten wie auch von komplexeren Straßenverkehrsgeräuschen zeigten, dass durch eine Kombination aus psychoakustischen Größen die Lästigkeitswirkung des Verkehrsgeräusches detailliert vorhergesagt werden kann (FIEBIG et al. 2009). Wahrnehmungsrelevant sind dabei vor allem auffällige Einzelereignisse wie motorisierte Zweikrafträder. Diese tragen in erheblicherem Maße, als dies der Beitrag zum Mittelungspegel vermuten ließe, zur Lärmbelästigung bei (FIEBIG et al. 2012). Auch bei spezifischen Untersuchungen zur erhöhten Störwirkung von Straßenverkehrsgeräuschen konnte ein Mehrwert der Psychoakustik zur Vorhersage der Bewertungen von exponierten Personen beobachtet werden. Beispielsweise konnte für lichtzeichengeregelte Kreuzungen und Einmündungen sowie für Kreisverkehre eine Erhöhung der Störwirkung festgestellt werden, obwohl dort tendenziell geringere Mittelungspegel im Vergleich zum zuführenden Straßenabschnitt vorliegen, bei dem anwesende Fahrzeuge mit konstanter Geschwindigkeit fahren (PAPENFUS et al. 2011). Mit Hilfe einer psychoakustisch motivierten Metrik, in der die Parameter Lautheit, Schärfe und Parameter zur Quantifizierung auffälliger Geräuschmuster verwendet wurden, ließen sich die subjektiven Urteile vorhersagen (ebd.).

Es zeigte sich, dass sich bei Überfahren von Agglomeratmarkierungen neben der von der Markierungsart abhängigen Erhöhung des Schalldruckpegels auch psychoakustische Ausprägungen signifikant erhöhen (MÜLLER et al. 2015). Mit Hilfe einer Metrik, die eine gewichtete Kombination von Lautheit und Tonalität nutzte, konnte die resultierende Lästigkeit für unterschiedliche Entfernungen zuverlässig vorhergesagt werden (ebd.). Durch die Betrachtung von psychoakustischen Parametern konnten in verschiedenen Projekten zur Lästigkeit von Verkehrsgeräuschen Geräuschbewertungen verbessert vorhergesagt werden (GENUIT et al. 2023).

## 2.2 Audio Features

In der Audiosignalverarbeitung steht eine große Batterie von Parametern, den sogenannten Audio Features, zur Verfügung, die in vielen Bereichen mit Erfolg eingesetzt werden, um spezifische Schall-Wirkungen vorauszusagen, die durch spektro-temporale oder tonale Eigenschaften von Geräuschen bedingt sein können. So wurden z. B. die Audio Features der Timbre Toolbox (PEETERS et al. 2011) verwendet, um die empfundene Dynamik von Musikinstrumenten (im Sinne von piano/forte-Spiel) zu modellieren, welche sich nur zu etwa 50 % aus der Schalleistung der Schallquellen ergibt (WEINZIERL et al. 2018). Noch weitergehend war die Identifikation von Audio Features, mit denen sich die Eignung von Musik zur Repräsentation von Markenwerten im Sinne

eines Audio Branding vorhersagen lässt, was im Rahmen eines EU-Projekts erforscht wurde (LEPA et al. 2020).

Klassische akustische Parameter werden in diesem Zusammenhang auch als Low Level Features bezeichnet, weil sie elementare Eigenschaften des Signals wie den über einen bestimmten Zeitraum energieäquivalent gemittelten Schalldruck angeben. Davon unterschieden werden (Higher Level) Audio Features, die einen unmittelbaren Bezug zu perceptiven, emotionalen oder kognitiven Zuschreibungen eines akustischen Signals haben, und die häufig sogenannte „auditorische Modelle“ beinhalten, also Nachbildungen des menschlichen Wahrnehmungsvorgangs mit Mitteln der digitalen Signalverarbeitung, und dabei meist eine aufwändigere Berechnung erfordern.

Audio Features werden meist aus einer spektro-temporalen Zerlegung des Audiosignals durch eine Kurzzeit-Fouriertransformation (Short-time Fourier Transform, STFT) berechnet. Beispiele für Audio Features sind sogenannte „Timbre Features“, die als Prädiktoren für die Klangfarbe von Audiosignalen eingesetzt werden. So hat sich bei der Analyse der Klänge von Musikinstrumenten etwa gezeigt, dass der Spectral Centroid SC (auch: Spectral Center of Gravity, SCG), der den physikalischen Schwerpunkt des Betragsspektrums von akustischen Signalen berechnet, ein guter Indikator für die wahrgenommene „Helligkeit“ von Klängen ist (CACLIN et al. 2005, SCHUBERT & WOLFE 2006). Er berechnet sich als Summe über die den Frequenzstützpunkten  $k$  zugeordneten Frequenzen  $f_k$ , gewichtet mit dem Betragsspektrum  $|X[k]|$  an dieser Stelle des Spektrums und normiert auf die Summe über alle Werte  $|X[k]|$ :

$$SC[m] = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} |X[m, k]| \cdot f_k}{\sum_{k=0}^{N-1} |X[m, k]|}$$

Bild 2.1 zeigt die Analyse des an einer Ampel aufgenommenen Signals von anfahrenden und beschleunigenden Fahrzeugen, bei der die Zeit in x-Richtung und die Frequenz in y-Richtung angezeigt wird. In der STFT erkennt man die spektralen Anteile des Geräuschs, vom tieffrequenten Dröhnen beim Anlassen des Motors, eine erste Beschleunigungsphase (Sekunde 1,5-2,5), den Schaltvorgang (Sekunde 2,5-3) und eine weitere Beschleunigungsphase (Sekunde 3-4) mit ausgeprägten tonalen Anteilen, die als aufsteigenden Linien im Spektrogramm sichtbar sind. Der Spectral Centroid als spektraler Schwerpunkt des Signals verschiebt sich in der dieser Zeit von 2000 Hz auf

4000 Hz.

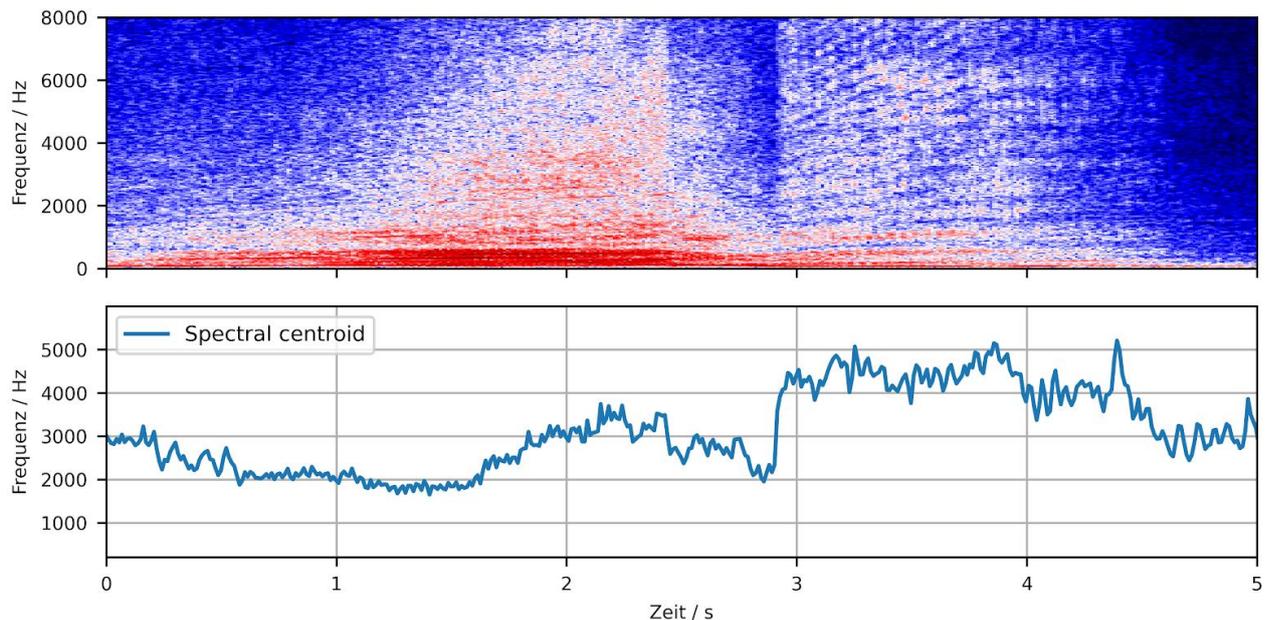


Bild 2.1 Spektrogramm (oben) und aus dem Spektrogramm berechneter Spectral Centroid (unten) für das Geräusch von anfahrens und beschleunigenden Fahrzeugen an einer auf grün schaltenden Ampel

Als zweite Dimension der Klangfarbe hat sich die wahrgenommene „Schärfe“ des Toneinsatzes erwiesen, die durch die Einschwingdauer (Attack Time) in der zeitlichen Hüllkurve der Energie des Audiosignals prädiziert werden kann. Eine noch bessere Übereinstimmung ergab sich in verschiedenen Studien zwischen dem Logarithmus der Einschwingdauer und der wahrgenommenen Schärfe (CACLIN et al. 2005).

Audio Features wurden ursprünglich für Multimedia-Anwendungen entwickelt. So spezifiziert der MPEG-7 Standard zur Beschreibung von Multimedia Content durch signalbasierte Metadaten für den Audio-Bereich 17 Audio Features (ISO/IEC 15938-4, LINDSAY & HERRE 2001). Das durch MPEG-7 inspirierte Projekt CUIDADO (Content-based Unified Interfaces and Descriptors for Audio/music Databases available Online) hat dieses Repertoire sogar auf insgesamt 54 Features erweitert (PEETERS 2004).

Allerdings geht die Anwendung inzwischen über Medienanwendungen, wie die Suche in großen Archiven und Datenbanken für multimedialen Content, die halbautomatische Bearbeitung von Signalen, Musikempfehlungsdienste und automatische Erzeugung von Playlists, hinaus. Auch Anwendungen wie die akustische Überwachung von Schienenfahrzeugen (ZHANG et al. 2017, DERNBACH et al. 2020), die Überwachung von Ökosystemen (XU et al. 2020) oder die Analyse von medizinischen Geräuschen wie Atemgeräuschen oder Husten (YADAV et al. 2020) greifen auf Audio Features zurück, auch wenn dieser Ansatz gegenüber einer direkten Analyse des Audiosignals mit Techniken des maschinellen Lernens in den letzten Jahren etwas in den Hintergrund getreten ist. Mit dem Einzug neuronaler Netze in die Audiosignalverarbeitung wird häufig direkt auf spektro-temporalen Darstellungen des Audiosignals gearbeitet (vgl. Bild 2.1, oben), ohne dass eine Vorverarbeitung durch Audio Features erforderlich ist. Im Gegensatz zu einer „blinden“ Klassifikation durch neuronale Netze erlauben Feature-basierte Regressionsmodelle jedoch zum einen eine bessere inhaltliche Interpretation der dadurch vorgenommenen Verarbeitung des Audiosignals, zum anderen ist die Entwicklung solcher Modelle aufgrund des in diesen Features enthaltenen Vorwissens nicht auf riesige Datenmengen („Big Data“) angewiesen, sondern auch mit einer

begrenzten Anzahl von ökologisch validen Stimuli durchführbar, wie sie im vorliegenden Projekt vorgesehen ist.

Zur Berechnung von Audio Features existieren eine Reihe von Software-Toolboxes, die in verschiedenen Programmiersprachen vorliegen und in denen Funktionen zur Berechnung von Audio Features enthalten sind (Tabelle 2.1). Manche dieser Tools extrahieren Features für bestimmte Anwendungen wie eine Bestimmung der Klangfarbe (Timbre Toolbox) oder von tonalen Anteilen (Chroma Toolbox), andere berechnen das gesamte Spektrum signalbezogener Features (MOFFAT et al. 2015).

<b>Toolbox</b>	<b>Programmiersprache, Dokumentation, Quellcode</b>
	C/C++, Python, R, Pure Data
Aubio	BROSSIER, 2006 <a href="https://aubio.org/">https://aubio.org/</a>
Chroma Toolbox	MATLAB MÜLLER & EWERT, 2011 <a href="https://www.audiolabs-erlangen.de/resources/MIR/chromatoolbox/">https://www.audiolabs-erlangen.de/resources/MIR/chromatoolbox/</a>
Essentia	C/C++, Python, MATLAB, Pure Data/Max-MSP BOGDANOV et al., 2013 <a href="https://essentia.upf.edu/">https://essentia.upf.edu/</a>
jAudio	Java MCENNIS et al., 2005 <a href="http://jaudio.sourceforge.net/">http://jaudio.sourceforge.net/</a>
Librosa	Python MCFEE et al., 2015 <a href="https://librosa.org/">https://librosa.org/</a>
LibXtract	C/C++, Supercollider, Pure Data/Max-MSP, Java BULLOCK, 2007 <a href="http://www.sf.net/projects/libxtract">http://www.sf.net/projects/libxtract</a>
Marsyas	C/C++, Python, Java, Lua TZANETAKIS & COOK, 2000 <a href="https://github.com/marsyas/marsyas">https://github.com/marsyas/marsyas</a>
Meyda	Javascript RAWLINSON et al., 2015

Toolbox	Programmiersprache, Dokumentation, Quellcode
	<a href="https://meyda.js.org/">https://meyda.js.org/</a>
	MATLAB
MIR Toolbox	LARTILLOT & TOIVIAINEN, 2007 <a href="https://www.jyu.fi/hytk/fi/laitokset/mutku/en/research/materials/mirtoolbox">https://www.jyu.fi/hytk/fi/laitokset/mutku/en/research/materials/mirtoolbox</a>
	MATLAB
Timbre Toolbox	PEETERS et al., 2011 <a href="https://github.com/mondaugen/timbretoolbox">https://github.com/mondaugen/timbretoolbox</a>
	MATLAB, Python, C/C++
YAAFE	MATHIEU et al., 2010 <a href="http://yaafe.sourceforge.net/">http://yaafe.sourceforge.net/</a>

Tabelle 2.1 Software-Toolboxes zur Berechnung von Higher Level Audio Features

## 2.3 Wahrnehmung und Bewertung von Umgebungsgeräuschen

### 2.3.1 Soundscapes

Die Soundscape-Forschung stellt einen Paradigmenwechsel vom reinen Lärmschutz hin zu einem neuen multidisziplinären Ansatz dar, indem nicht nur physikalische Messungen durchgeführt werden, sondern in einem interdisziplinären Ansatz gemeinsam mit Human- und Sozialwissenschaftlern die Vielfalt der Soundscapes in verschiedenen Ländern und Kulturen erforscht wird (KANG et al. 2016). Der Fokus liegt hierbei stärker auf tatsächlichen Erlebensaspekten akustischer Umgebungen, wobei Umweltgeräusche als „Ressource“ und nicht ausschließlich als „Emissionsmüll“ betrachtet werden (z. B. SCHULTE-FORTKAMP 2013). Dies beinhaltet im Gegensatz zur reinen Reduktion des Schalldruckpegels beispielsweise auch eine Maskierung unerwünschter mit erwünschten Geräuschen sowie die Reduzierung unerwünschter Geräusche (KANG et al. 2016). Die Soundscape-Forschung beschäftigt sich jedoch nicht nur mit der Reduktion von Lärm, sondern vielmehr mit der proaktiven Gestaltung von Geräuschlandschaften im öffentlichen Raum, bei der häufig positiv konnotierte naturbezogene Geräusche eingesetzt werden (FIEBIG & SCHULTE-FORTKAMP 2023). Themen sind u. a. der Erhalt und die Schaffung von (akustischen) Erholungsräumen, die Qualität von Geräuschlandschaften und die geräuschbezogene Stadtplanung. Dabei werden im transdisziplinären Diskurs gesellschaftliche, kulturelle und gesundheitsbezogene Aspekte betrachtet (vgl. KANG et al. 2013, SCHULTE-FORTKAMP & JORDAN 2023). Die Bedeutung dieses Forschungsansatzes wird in der Förderung und den Aktivitäten großer Forschungsnetzwerke sichtbar. So widmete sich im Zeitraum von 2009 bis 2013 ein internationales Netzwerk mit zuletzt 52 Teilnehmern in der europäischen COST (European Cooperation in Science and Technology) Action dem Thema „Soundscape of European Cities and Landscapes“, um wissenschaftliche Grundlagen und praktische Anleitungen zum Thema Soundscape zu erarbeiten (KANG et al. 2013). Im Zuge dessen entstanden über 300 Publikationen sowie die Grundlagen für die Harmonisierung der Forschung in diesem Bereich, wie auch für einen ISO-Standard zur

wahrnehmungsbasierten Bewertung der Qualität einer Soundscape in dedizierten Arbeitsgruppen (LERCHER & SCHULTE-FORTKAMP 2013). Die Arbeitsgruppen des Netzwerkes definierten Soundscape als "a contextually derived delineation of a space (place) - based on a perceived (sonic) environment" (dt. "eine kontextuell geleitete Abgrenzung eines Raumes (Ort) - basierend auf einer wahrgenommenen (klanglichen) Umgebung") (ebd. 2013: S. 120).

Die größte Herausforderung bei der Erfassung von Soundscapes besteht darin, dass es sich um ein facettenreiches Phänomen handelt, welches daher nicht anhand einzelner weniger Parameter bewertet werden kann (KANG et al. 2016). Eine Soundscape muss durch die menschliche Wahrnehmung der jeweiligen akustischen Umgebungen gemessen, beurteilt und bewertet werden (ISO 12913-1:2014). Dies prägt auch die Sammlung physikalischer oder wahrnehmungsbezogener Daten, d. h. auch Aufnahmen von akustischen Umgebungen sollten mit binauraler Technologie durchgeführt werden, die es ermöglicht, die akustische Umgebung zu erleben und akustische Größen zu bestimmen, die das menschliche Hörempfinden nachahmen. Um diese Geräuschemessungen angemessen zu beschreiben und zu analysieren, müssen psychoakustische Parameter verwendet werden, die mehrere Dimensionen der grundlegenden Hörempfindungen abdecken (KANG et al. 2016, GENUIT et al 2023), sondern anstrebt, in holistischer Weise den vielfältigen Kontextfaktoren Rechnung zu tragen (SCHULTE-FORTKAMP & JORDAN, 2023). Etablierte psychoakustische Parameter wie Lautheit, Rauheit, Schärfe, Schwankungsstärke sowie Tonalität ermöglichen es, den Charakter einer akustischen Umgebung detailliert zu beschreiben und das physikalische Phänomen, die akustische Umwelt, mit dem Wahrnehmungskonstrukt der akustischen Umgebung, der Soundscape, in Beziehung zu setzen (ebd.). Typische Methoden, die hierfür eingesetzt werden, sind der Soundwalk (Begehung der Umwelt), Befragungstechniken unter Einsatz semantischer Differentiale, Laborexperimente, Verhaltensbeobachtungen und Interviews (ALETTA et al. 2016).

Auch wenn der Fokus des vorliegenden Forschungsprojektes nicht darin besteht, den Charakter und die Wirkung von Geräuschen durch eine Befragung der betroffenen Personen vor Ort zu ermitteln, sondern ihn durch geeignete psychoakustische Parameter technisch erfassbar zu machen, sind zwei Erkenntnisse aus der Erforschung komplexer Soundscapes nach DIN ISO 12913 auch im vorliegenden Fall von Bedeutung, nämlich die der Kontextsensitivität sowie der Notwendigkeit einer Aufschlüsselung der Wahrnehmungsdimensionen einer Soundscape.

Es hat sich gezeigt, dass eine Bewertung der akustischen Umgebung nicht nur durch die Eigenschaften des Geräusches selbst, sondern wesentlich durch den „Kontext“ bedingt ist, in dem Personen mit Geräuschen konfrontiert sind. Dieser Kontext beinhaltet die räumliche Konstellation von Schallquellen und Empfängern ebenso wie personale und situative Faktoren, also etwa die Aktivität (berufliche Tätigkeit, Freizeit), die soziale Interaktion (allein, in Gesellschaft) und die Persönlichkeit der Hörenden (STEFFENS et al. 2017). Beispielhaft seien hier die Untersuchungen von BILD et al. (2018) und NIELBO et al. (2013) vorgestellt, die sich mit der Bewertung unterschiedlicher Soundscapes in Bezug zu deren Affordanz (Aufforderungscharakter) für bestimmte Aktivitäten beschäftigten. BILD et al. (2018) untersuchten die Rolle und das Zusammenspiel vom Grad der sozialen Interaktion bei der Ausführung von Aktivitäten, der Vertrautheit mit dem zu bewertenden Ort und den dort vorkommenden Geräuschen sowie den (auditiven) Erwartungen der Nutzer auf deren Soundscape-Bewertungen. In einem Methodenmix aus quantitativen, qualitativen und räumlichen Analysen analysierten die Forscher, wie 188 Nutzer dreier öffentlicher Räume in Amsterdam deren Soundscapes in Bezug auf die

eigenen, vor Ort ausgeführten Aktivitäten bewerten. Dokumentiert wurde die Nutzung städtischer Parks in Amsterdam durch nicht-teilnehmende Beobachtung mit Verhaltenskartografie, um räumliche Daten über beobachtbare Aktivitätskategorien zu sammeln. Ergänzt wurden diese Beobachtungen mit Fragebögen zur Bewertung der Geräuschkulisse vor Ort (Störung/Unterbrechung, Anregung/Stimulation und Eignung) sowie mit freien Antworten, die die Bewertungen der Nutzer im Detail erheben sollten und damit Gründe für deren Bewertungen und Assoziationen lieferten. Besucher, die allein unterwegs waren und sozial interaktive Befragte bewerteten ihre Soundscape in Bezug auf ihre dort ausgeführten Aktivitäten unterschiedlich, wobei letztere höhere Eignungs- und niedrigere Störungsbewertungen vergaben als erstere. Dies deutet auf qualitativ unterschiedliche Hörerfahrungen hin, die anhand der qualitativen Begründungen der Nutzer für diese Bewertungen noch weiter analysiert wurden. Sowohl die Befragten, die allein unterwegs waren, als auch die sozial interaktiven bezogen sich auf störende oder ablenkende Effekte, die einige Geräuschquellen auf ihre eigene Aktivität hatten: Im Fall der Alleingänger störte die Geräuschkulisse ihren Gedankenprozess oder ihre Fähigkeit, sich zu entspannen, während bei sozial interaktiven Befragten die Unterhaltung durch Geräusche unterbrochen wurde oder sie ihre Gesprächslautstärke anpassen mussten, um sich gegenseitig verstehen zu können. Die Erklärungen, was stimulierend auf die Befragten wirkte, war sowohl heterogener als auch eher auf einer Metaebene angesiedelt (z. B. ein Gefühl der Geselligkeit, Naturgeräusche und Geräusche sozialer Interaktionen, die Atmosphäre, die ein Urlaubsgefühl erzeugte, etc.). Für einen Hauptteil der Teilnehmer wurden ihre Erwartungen an die Geräuschkulisse der Parks getroffen – eine ruhige Umgebung mit einem Springbrunnen und Vögeln; im Fall der sozial aktiven Befragten umfassten die Erwartungen auch die vorhandenen Stadtgeräusche.

In der Untersuchung von NIELBO et al. (2013) wurden fünfzehn Teilnehmern Stereoaufnahmen von acht öffentlichen Orten in Paris und Montreal präsentiert. Die Probanden bewerteten nach jedem Durchgang auf einer kontinuierlichen Skala von 0 bis 100, wie angemessen sie die jeweilige Geräuschkulisse für eine bestimmte Aktivität empfanden. Dabei wurden vier Aktivitäten in zufälliger Reihenfolge vorgelegt: für eine Prüfung lernen, sich mit einem Freund treffen, Fahrrad fahren und nach der Schule/Arbeit entspannen. Die Klंगाusschnitte mit einer Dauer von jeweils 12 bis 15 Sekunden wurden so gewählt, dass sie verschiedene Arten von akustischen Umgebungen mit unterschiedlichen Geräuschquellen repräsentieren. Manche der Soundscapes schienen für mehrere oder jede der vier Aktivitäten gleichermaßen (un)geeignet, während andere besonders geeignet für bestimmte Arten von Aktivitäten bewertet wurden, so z. B. zum Studieren und Entspannen (z. B. S5 Rue Montorgueil, Paris, mit einem Bürgersteigcafé in der Fußgängerzone mit Gesprächsfetzen, klirrendem Geschirr, leiser Musik aus dem Lautsprecher, Vogelstimmen, sehr leisen Verkehrsgeräuschen und S8 Square St. Louis, Montréal, einer großen städtischen Parkanlage mit ein paar sich unterhaltenden Menschen, Lachen und der Hintergrundmusik einer Akustikgitarre). Die Soundscapes mit mutmaßlich stärkerem Verkehrslärm im Hintergrund wurden als weniger geeignet für die vier Aktivitäten bewertet, jedoch teils mit hoher Varianz. Die Teilnehmenden bezogen sich im Allgemeinen mehr auf akustische Eigenschaften der Geräuschkulissen und die Auswirkungen auf die Hörenden, wenn sie die Angemessenheit für das Studium im Vergleich zum Fahrradfahren bewerteten. Bei letzterem schienen räumliche Aspekte und Ereignisse in der Umgebung relevanter zu sein. Die Autoren argumentieren, dass dies ein Indiz dafür ist, dass die Aktivität, die sich der Hörende durch die Instruktionen gerade vorstellt, eine wichtige Rolle bei der Auswahl markanter Merkmale in der Geräuschkulisse spielt, auf die er sich konzentriert. Generell hatten Verkehrsgeräusche einen großen

Einfluss auf die Angemessenheitsbewertungen der Probanden. Die Aufnahmen mit hörbarem und auffälligem Verkehrslärm wurden von den Probanden für alle Aktivitäten eher als unangemessen bewertet (alle Werte lagen unter 50). Geräuschkulissen, in welchen einzelne Fahrzeuge hörbar waren, wurden für das Radfahren als eher ungeeignet bewertet (alle Werte lagen unter 50). Dies betraf jedoch nicht jene Soundscapes, in denen der Verkehrslärm im Hintergrund war. Dies wird als Anzeichen dafür interpretiert, dass einzelne Fahrzeuge einschüchternd klingen und eine spezifischere Bedrohung darstellen können. Die Geräusche von Menschenmengen, Vögeln und Straßenmusik vermittelten ebenfalls eine geringere Affordanz zum Fahrradfahren, während sie im Allgemeinen als angemessen für ein Treffen mit Freunden bewertet wurden.

Daneben beeinflusst aber auch schon das reine Framing der Ausgangssituation die Urteile von Probanden. KRZYWICKA und BYRKA (2020) präsentierten in einem Onlineexperiment sechs verschiedene Stimuli, die entweder belebte (u. a. Vogelgezwitscher) oder unbelebte (u. a. Schwimmgeräusche) Geräuschproben beinhalteten. Probanden wurden gebeten, sich vorzustellen, sie wären mental erschöpft und würden sich entweder allein oder in Gesellschaft in der jeweiligen Soundscape entspannen. Die Geräuschumgebungen selbst erhielten entweder natürliche oder urbane Beschreibungen (z. B. der Hörstimulus „laufende und blökende Ziegen“ wurde entweder mit [auf einer] Wiese oder [in einem] Zoo beschriftet. Allein diese Beschreibung führte dazu, dass der gleiche Stimulus entweder als mehr oder weniger natürlich bewertet wurde. Als natürlich beschriebene Stimuli wurden zudem gegenüber urbanen präferiert, wobei belebte Soundscapes als natürlicher empfunden wurden. Trotz der umfangreichen Stichprobengröße von 216 Probanden hatte die soziale Komponente, variiert als Between-Subjects-Faktor, keinen statistisch bedeutsamen Effekt auf die Bewertungen der Soundscapes.

Neben der oben dargestellten Kontextsensitivität der Soundscape-Bewertung hat die durch den Soundscape-Ansatz inspirierte Forschung zudem belegt, wie wichtig eine Aufschlüsselung der verschiedenen Wahrnehmungsdimensionen (Soundscape dimensions) von akustischen Ereignissen ist, weil sich diese – je nach Kontext – auf ganz unterschiedliche Weise auf ein Gesamturteil auswirken können. Im folgenden Kapitel werden hierzu einschlägige Untersuchungen zusammengefasst.

### **2.3.2 Beschreibungsdimensionen**

Soundscape-Deskriptoren sind Beschreibungsdimensionen, die messen, wie Menschen eine akustische Umgebung wahrnehmen. Soundscape-Indikatoren werden wiederum zur Vorhersage des Wertes eines Soundscape-Deskriptors herangezogen (ALETTA et al. 2016: S. 66). In ihrer Literaturrecherche identifizieren ALETTA et al. (2016) acht potenzielle Soundscape-Deskriptoren: Lärmbelästigung, Angenehmheit, Ruhe oder Friedlichkeit, Musikähnlichkeit, die wahrgenommene affektive Qualität, Erholbarkeit / Erholungswert, die Qualität der Geräuschlandschaft sowie die Angemessenheit. In den verarbeiteten Studien wurde jede dieser Beschreibungsdimensionen mit unterschiedlichen Indikatoren korreliert bzw. in einem regressionsanalytischen Prädiktionsmodell verwendet. Häufig wurden dabei die psychoakustischen Parameter Lautheit, Schärfe und Rauigkeit als Soundscape-Indikatoren genutzt, aber auch Tonalität und die Schwankungsstärke bzw. die Entwicklung der Geräusche über die Zeit (temporale Variabilität) wurden in verschiedenen Studien herangezogen. Andere Studien nutzten eher Umgebungsvariablen als Indikatoren für ihre Modelle, so z. B. das Vorhandensein von Verkehrsgeräuschen und menschlichen Stimmen. In den

recherchierten Untersuchungen konvergierte die Mehrzahl der Deskriptoren in Richtung eines zweidimensionalen Modells der wahrgenommenen affektiven Qualität, z. B. Angenehmheit – Ereignisfülle (pleasantness/eventfulness) (z. B. AXELSSON et al. 2010) oder Ruhe – Lebhaftigkeit/Lebendigkeit (calmness/vibrancy) (z. B. CAIN et al. 2013). In neueren Studien wurde die Vertrautheit (familiarity) mit dem Geräuschumfeld als dritte Dimension beobachtet (STEFFENS et al. 2017).

Zur Validierung einer geeigneten Übersetzung der Deskriptoren und der zuverlässigen Bestimmung von deren Ausprägungen in akustischen Umgebungen mit Hilfe verschiedener Attribute werden aktuell auf Basis internationaler Kooperationen Untersuchungen angestellt (ALETTA et al. 2020, MOSHONA et al., 2023). Auch die klassischen emotionsbezogenen Dimensionen Valenz (pleasure) und Aktivierung (arousal) werden zur Beschreibung von Soundscapes genutzt (ANDRINGA & VAN DEN BOSCH 2013). Die Angemessenheit einer Soundscape für einen bestimmten Ort kann ebenso als mögliche Beschreibungsdimension gelten, die zusätzliche Information zur wahrgenommenen affektiven Qualität liefert. Sie sollte jedoch aufgrund ihrer starken Abhängigkeit vom Kontext (vgl. Kapitel 3.1) nicht allein verwendet werden, um eine Soundscape zu bewerten (ALETTA et al. 2016). Die Bewertung der Angenehmheit scheint ebenfalls kontextabhängig zu variieren und ist zudem stark von der präsentierten visuellen Szenerie abhängig (ALETTA & KANG 2018). Speziell für die Bewertung von Lärmbelästigung entwickelt, bieten die auf Arbeiten des IC BEN-Teams (International Commission on the Biological Effects of Noise) basierenden Standardfragen ebenfalls eine Orientierung. Es werden Standarditems für zwei Typen von Antwortformaten angeboten, eine kategoriale mit den Verbalankern „äußerst, stark, mittelmäßig, etwas, überhaupt nicht“ sowie eine elfstufige Intervallskala von 0 („wenn Sie sich überhaupt nicht gestört oder belästigt fühlten“) bis 10 („wenn Sie sich äußerst gestört oder belästigt fühlten“) (FIELDS et al. 2001: S. 672).

Die bereits beobachteten Strukturen können eine theoretische Grundlage für die im Projekt geplanten Untersuchungen bieten. Da sich die Mehrzahl der Studien jedoch mit der Untersuchung des Erholungswertes einer Soundscape beschäftigten, ist unklar, inwieweit die qualitative Aufschlüsselung der durch Verkehrslärm ausgelösten Wirkungen zu ähnlichen Ergebnissen führt. So könnte sich Verkehrslärm bspw. in mittlerer Ausprägung positiv auf eine wahrgenommene Lebendigkeit oder Lebhaftigkeit (vibrancy) auswirken, in einer hohen Ausprägung jedoch nicht (vgl. ALETTA & KANG 2018).

Die Erhebung der Soundscape-Deskriptoren erfolgte bisher recht heterogen. So wurden unterschiedliche semantische Differentiale zur Beschreibung von Soundscapes unter anderem in KANG und ZHANG (2010, 18 bzw. 28 Skalen); HARRIET (2013, 9 Skalen); DAVIES et al. (2014, 19 Skalen) und VIOLLON & LAVANDIER (2000, 27 Skalen) berichtet. Das semantische Differential ist ein Fragenformat, das sich aus multiplen Ratingskalen zusammensetzt. Jedes der mehrstufigen Items spannt dabei eine Dimension zwischen zwei gegensätzlichen Antwortpolen, meist Adjektiven, auf. KANG und ZHANG (2010), HARRIET (2013) und DAVIES et al. (2014) nutzten als Antwortpole z. B. u. a. leise-laut (quiet-noisy), Komfort-Diskomfort (comfort-discomfort) sowie angenehm-unangenehm (pleasant-unpleasant).

Andere Autoren verwenden Aussagen, die auf mehrstufigen Likert-Skalen mit Zustimmungskern bewertet werden sollten (z. B. ALETTA & KANG 2018). Auch existieren Fragebögen, um einzelne Aspekte von Soundscapes umfassend zu erheben, z. B. die „Perceived Restorativeness Soundscape Scale“ (PRSS) von PAYNE (2013, vgl. auch PAYNE & GUASTAVINO 2018). Für eine klassische Messung der affektiven Qualität bietet sich wiederum der Einsatz der Self-Assessment-Manikin (SAM)

(BRADLEY & LANG 1994) an, die die Dimensionen Valenz, Arousal und Dominanz nonverbal erheben. Die SAM-Skalen wurden als nützlich und zeitsparend gegenüber anderen semantischen Differentialen zur Beurteilung von Soundscapes bewertet (STEVENS et al. 2016).

Insgesamt ist eine erhebliche methodische Vielfalt in der Soundscape-Forschung der letzten 20 Jahre festzustellen, wobei das semantische Differential als Fragenformat eine zunehmende methodische Präferenz genießt (ENGEL et al. 2018). Jedoch werden nach wie vor auch offene Fragen und Interviews zur Exploration spezifischer Zusammenhänge eingesetzt (ebd.).

Die Heterogenität des Vorgehens in bisherigen Untersuchungen einerseits und die Fokussierung auf sehr eng umrissene Aspekte andererseits führen wohl dazu, dass auch nach Jahren der Forschung KANG et al. (2019) vorschlagen, Soundscape-Indizes basierend auf Indikatoren oder Deskriptoren zu entwickeln, um Vergleiche zwischen Soundscapes zu ermöglichen (vgl. auch ALETTA & KANG 2018). Hierfür erarbeiteten sie zunächst ein umfangreiches Erhebungs- und Untersuchungsprotokoll, an dem sich ihre Studie im Rahmen eines European Research Council (ERC) Advanced Grant Projektes orientieren wird. Kern der objektiven Messungen ist eine Erhebung in drei Stufen (S. 2490):

- repräsentative räumliche, audiovisuelle Aufnahme vor Ort (vor der Erhebung der subjektiven Daten)
- binaurale Referenzaufnahme während der Erhebung der subjektiven Daten;
- kontinuierliche, monaurale Audio- und Umgebungsdatenerfassung während der gesamten Erhebungssitzung (sowohl während der repräsentativen als auch der Referenzaufnahmen).

Eine repräsentative räumliche Aufnahme mittels 360°-Kamera soll dann als Grundlage für die Reproduktion der audiovisuellen Aufnahmen in einer VR-Simulation unter Laborbedingungen dienen. Geplant ist, an mehr als 40 Orten in London, China und mehreren europäischen Städten möglichst heterogene auditive Eindrücke aufzunehmen. Im vorliegenden Projekt wird ein ähnliches Vorgehen vorgeschlagen, um zunächst die Grundlage für die Entwicklung eines umfassenden Fragebogens für die Bewertung der Soundscape „Verkehr“ in deren verschiedenen Ausprägungen zu erarbeiten. Die subjektiven Beschreibungsdimensionen sollen validiert und zur Korrelation mit psychoakustischen Parametern sowie zur Bewertung von Schallschutzmaßnahmen eingesetzt werden. Eine aktuelle Veröffentlichung, in der Soundscape-Deskriptoren und Modelle zur Erfassung und Messung des Deskriptors systematisch verglichen wurden, zeigt passend zum Soundscape-Indizes-Projekt, dass neben (psycho-)akustischen Faktoren auch visuelle und kontextuelle Größen berücksichtigt werden müssen (LIONELLO et al. 2020).

### **2.3.3 Lärmschutzmaßnahmen**

Durch den Einsatz geeigneter Maßnahmen sollen Menschen vor zu starkem Umgebungslärm geschützt werden. Nach WU et al. (2019) konstituieren dabei Verkehrslärm und der Lärm aus Windkraftanlagen zusammen 90 % der gesamten Lärmbelastung. Die EU-UMGEBUNGSLÄRMRICHTLINIE 2002/49/EG regelt, dass die Mitgliedsstaaten Lärmaktionspläne erstellen, in denen sie Lärminderungsmaßnahmen planen. In Deutschland sind dafür vorwiegend die Kommunen zuständig. Die Lärmaktionspläne fußen auf Lärmkarten, die regelmäßig und nach gemeinsamen

Bewertungsmethoden erstellt werden. Darüber hinaus wird die Öffentlichkeit über Umgebungslärm und seine Auswirkungen informiert.

In der SECHZEHNTE VERORDNUNG ZUR DURCHFÜHRUNG DES BUNDES-IMMISSIONSSCHUTZGESETZES (Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV 2020) werden Grenzwerte für die Lärmbelastung durch Verkehrsgeräusche definiert. Sie gilt für den Bau oder die wesentliche Änderung von öffentlichen Straßen sowie von Schienenwegen der Eisen- und Straßenbahnen (§ 1, ebd.), wobei folgende Immissionsgrenzwerte gelten (§ 2, ebd.):

- an Krankenhäusern, Schulen, Kurheimen und Altenheimen: tags 57 dB(A), nachts 47 dB(A)
- in reinen und allgemeinen Wohngebieten und Kleinsiedlungsgebieten: tags 59 dB(A), nachts 49 dB(A)
- in Kerngebieten, Dorfgebieten, Mischgebieten und urbanen Gebieten: tags 64 dB(A), nachts 54 dB(A)
- in Gewerbegebieten: tags 69 dB(A), nachts 59 dB(A)

Die WHO empfiehlt darüber hinaus gehend, die durchschnittliche Belastung durch Verkehrslärm (Straße, Schiene, Luft) auf höchstens 54 dB(A) tagsüber (6.00 – 22.00 Uhr) und 45 dB(A) nachts (22.00 – 6.00 Uhr) zu begrenzen.

#### **2.3.3.1 Klassischer Schallschutz**

Lärmschutzmaßnahmen sind im Sinne der 24. BImSchV „bauliche Verbesserungen an Umfassungsbauteilen schutzbedürftiger Räume, die die Einwirkungen durch Verkehrslärm mindern“. Aktive Maßnahmen begrenzen die Lärmbelastung an der Quelle der Emission bzw. auf dem Ausbreitungsweg. Sie sollten die erste Wahl an Maßnahmen sein (BMVI 2016). Traditionell oft genutzte aktive Schallschutzmaßnahmen lassen sich wie folgt zusammenfassen (BMVI 2016, LAND BRANDENBURG 2001):

- eine lärmindernde Linienführung (siedlungsferne Straßenführung)
- lärmindernde Straßendeckschichten
- Lärmschutzwälle und -wände
- Einschnitts- und Troglagen
- Teil- und Vollabdeckungen (Einhausung)

Passive Maßnahmen betreffen zumeist bauliche Veränderungen an Gebäuden, die die Lärmbelastung verringern (BMVI-Website). Sie kommen zum Einsatz, wenn aktive Lärmschutzmaßnahmen nicht möglich, nicht ausreichend oder zu kostenintensiv sind. Beispiele passiver Maßnahmen sind:

- Lärmschutzfenster und -türen
- Lüftungseinrichtungen in Schlafräumen
- Dämmung von (Außen-)Wänden, Dächern, Rolladenkästen
- Einbau von schallgedämmten Wandlüftern

Neben o.g. aktiven Maßnahmen, die vor allem die Verkehrsplanung betreffen, gibt es Ansätze, den Lärmschutz als ein ganzheitliches Konzept verschiedener mitwirkender Fachbereiche zu verstehen und anzugehen. Das LAND BRANDENBURG (2001)

beispielsweise bringt dafür verschiedene Fachbereiche zusammen, die für die Erstellung eines gemeinsamen Lärmschutzkonzeptes essentiell sind: Verkehrsentwicklungsplanung, Umweltplanung, Instandsetzungsplanung, Bauleitplanung und Vorhabens- und Erschließungspläne, geförderte Planung und die städtebauliche Sanierung. Sie erstellen gemeinsam geeignete Maßnahmen zur Verringerung der Lärmbelastung. Die Autoren diskutieren geeignete Schallschutzmaßnahmen des Straßen- und Schienenverkehrs sehr detailliert und geben entsprechende Umsetzungsempfehlungen. Tabelle 2.2 fasst die Maßnahmen zusammen.

<b>Maßnahmentyp</b>	<b>Beispielmaßnahmen</b>
Emissionsminderung	Einsatz lärmarmere Fahrzeuge, z. B. durch Motorkapselung, technische Maßnahmen an den Aufbauten und leisere Reifen
Trassierung	Straßen entfernt von Wohnbebauung planen (doppelter Abstand verringert Lärmbelastung um 3 – 4 dB), Straßen so planen, dass sie mit gleichmäßig langsamer Geschwindigkeit befahren werden können (Minimierung von Pegelan- oder -abstiegen durch Anfahren und Bremsen), Einsatz von Kreisverkehren statt Kreuzungen, Vermeidung von Steigungen soweit möglich, Nutzung schalltechnisch günstiger topografischer Elemente (z. B. Einschnittlagen), Bündelung von Verkehrswegen, Entlastung durch Rückbau und Verkehrsberuhigung.
Straßen- und Schienenwegeoberflächen	Verwendung eines offenporigen Asphalts (Verringerung der Lärmbelastung um bis zu 5 dB), Bau ebener Fahrbahnen
Verkehrsmenge und Verkehrsberuhigung	Verringerung der Verkehrsmenge durch Verminderung des Lkw-Verkehrs, fußgängergerechte Stadtplanung, leistungsstarkes Fahrradwegenetz, geeignet angeordnete Parkeinrichtungen, Art der Erschließung von Wohngebieten, Verkehrsverbote/-beschränkungen, enges Nebeneinander von Wohnen, Handel und Arbeiten
Fahrgeschwindigkeit und Verkehrsberuhigung	niedrigere Fahrgeschwindigkeiten, Verringerung der Motordrehzahlen, Ermöglichen einer kontinuierlichen Fahrweise durch bauliche Gestaltung der Straße, innerstädtische Verkehrsbeschränkungen
Schallabschirmungen (Schallschutzwände & -wälle, Steilwälle, Einschnitts- & Troglagen, Hochlagen, Teil- & Vollabdeckungen etc.)	ausreichende Höhe, Nähe zur Schallquelle, ausgewogenes Verhältnis von Investitionsaufwand, Platzbedarf, Unterhaltungskosten und ästhetischen Anforderungen, platzsparend, Bebauung durch lärmunempfindliche Gebäude und Gebäudeorientierung.

Tabelle 2.2 Interdisziplinäre Lärmschutzmaßnahmen des Landes Brandenburg

Ein Einsatz dieser Maßnahmen bzw. deren Kombination kann eine Lärminderung von 1 dB(A) bis hin zu 8 dB(A) bewirken (LAND BRANDENBURG 2001).

Die Immissionswerte für die tatsächliche Gesamtlärmbelastung sollten in Modellen der Schallausbreitung die Immissionswerte der einzelnen Schallquellen nicht nur addieren, wie in der EU-Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EG vorgegeben ist, sondern auch physikalische Effekte zwischen Emissions- und Immissionsort, meteorologische Einflüsse und individuelle Einwirkungen des Lärms auf den Menschen mit in die Berechnung aufnehmen (CHUDALLA et al. 2020). In diesem Sinne entwickelten POPP et al. (2021) einen Leitfaden, der ganzheitliche Entscheidungen bzgl. des Lärmschutzes, insbesondere hinsichtlich effektiver und kosteneffizienter aktiver Schutzmaßnahmen, ermöglicht. Das Verfahren ist zweistufig aufgebaut: In einem ersten Schritt wird überprüft, ob eine Kumulationssituation vorliegt und ob die weiteren Anwendungsvoraussetzungen erfüllt sind. Liegt eine Lärmkumulation vor, werden in einem zweiten Prüfschritt die Pegelverteilungen dargestellt und eine Zielbestimmung vorgenommen. Anschließend werden alle Maßnahmen nacheinander hinsichtlich ihrer Wirksamkeit untersucht: Verringern sich die Pegel bzw. wie verteilen sich die Pegel nach Umsetzung der jeweiligen Maßnahme? Sind alle Maßnahmen einzeln überprüft, wird ihre Kombination untersucht. Sind die Zielwerte erreicht, erfolgt eine abschließende Bewertung auf Basis von Effektivität und Effizienz. Sind die Zielwerte nicht erreicht, müssen weitere Maßnahmen bzw. das Ziel überprüft werden.

Alle oben genannten Schallschutzmaßnahmen zielen auf eine (physikalisch definierte) Geräuschabsenkung ab, die zwar auch zur Verminderung der Lästigkeit des Schalleindrucks oder der psychischen Beeinträchtigung durch diesen führt, die aber nicht berücksichtigt, dass die subjektive Lärmempfindung nicht nur vom (bewerteten) Schalldruckpegel abhängt. Bezüglich der Belästigung durch Straßenverkehrsgeräusche wurde eine besondere perzeptive Bedeutung spektraler Bereiche identifiziert (TORIJA & FLINDELL 2014). Die Autoren schlussfolgern daraufhin, „that it is important to understand which acoustic features of any sound are subjectively dominant when designing noise control action so that these may be addressed first.“ (ebd., S. 4). Auch RITTERSTÄDT und VOGT-SÄDLER (2014) untersuchten in einer Fallstudie die Bedeutung der Psychoakustik bezüglich der Wirkung von Verkehrsgeräuschen bei einer Deckensanierung mit offenporigem Asphalt in Neuss (RITTERSTÄDT & VOGT-SÄDLER 2014). NILSSON und BERGLUND (2006) betrachteten die Lärmbelastung vor und nach dem Bau einer Lärmschutzwand und stellten eine Diskrepanz zwischen der Prognose und der tatsächlichen Belästigung fest, die mit Hilfe des psychoakustischen Parameters Lautheit aufgeklärt werden könne (NILSSON & BERGLUND 2006, NILSSON et al. 2008). Jedoch zeigten Untersuchungen zur perzeptiven Wirkung von Lärmschutzmaßnahmen in Form von Laborexperimenten, dass eine durch eine Lärmschutzmaßnahme erzielte Pegelminderung um 10 dB nicht ausreicht, um eine Halbierung der Lautheit oder auch der Lästigkeit hervorzurufen, wie dies aufgrund der psychoakustischen Theorie zur Lautheitswahrnehmung zu erwarten wäre (KEILHACKER 2013). Für die Lautheitshalbierung ergaben sich nach KEILHACKER (2013) deutlich höhere Pegelminderungen (19 dB(A)) für die Lautheitshalbierung, für die Lästigkeitshalbierung 22 dB(A)).

Eine der weiteren lärmbeeinflussenden Faktoren ist beispielsweise der allgemeine Geräuschpegel, der den Überflug eines Flugzeugs in einer Stadt mit einem relativ hohen allgemeinen Geräuschpegel bei gleichem dB(A)-Wert weniger störend wirken lässt als beispielsweise in nächtlicher ruhiger Umgebung. Diese psychoakustische Maskierung

kann genutzt werden, um durch ausgesuchten Zusatzschall den Lärmeindruck zu mindern (THYES 2015). Mehr Schall kann also zu geringerem, subjektiv empfundenem Lärm führen. Andere „alternative“ Maßnahmen, die die spezifischen Phänomene menschlicher Lärmempfindung berücksichtigen, zielen im Gegensatz zur allgemeinen Schallreduzierung auf eine gezielte Reduzierung von Dröhn- oder Pfeifgeräuschen ab oder anderen als unangenehm empfundene Komponenten im Schall. Diese gezielten Maßnahmen zur Reduktion störender Komponenten könnten besonders effektiv und unter Umständen kostensparend sein.

### 2.3.3.2 Akustische Maskierung als Schallschutz

Neben den klassischen Schallschutzmaßnahmen werden zumindest experimentell auch neue Arten des Schallschutzes exploriert, oft durch den Einsatz natürlicher Geräusche zur akustischen Maskierung. Diese können auf zwei Arten wirken: Zum einen können die eingesetzten Maskierungsgeräusche bestimmte Frequenzen des Verkehrslärms auf physikalischer Ebene überdecken (energetische Maskierung). Alternativ ist es möglich, dass die Maskierungsgeräusche salienter als der Verkehrslärm sind, wodurch sie die Aufmerksamkeit des Hörenden auf sich ziehen (informationshaltige Maskierung). Dadurch verringert sich die wahrgenommene Lautstärke des Verkehrslärms (NILSSON et al. 2010).

Die Wirksamkeit von Wassergeräuschen zur Maskierung von unerwünschten Geräuschen ist häufig untersucht und belegt worden. LEUNG et al. (2017) beobachteten, dass die Qualität der akustischen Umgebung durch Hinzufügen von Wassergeräuschen zu Straßenverkehrsgeräuschen bei hohen Schalldruckpegeln verbessert werden kann. Dabei wurde festgestellt, dass die Fähigkeit von Bachgeräuschen, die Lärmbelästigung zu mindern, etwas stärker war als die von Brunnengeräuschen. In einem multivariaten Modell wurden zudem die von den Probanden getroffenen Kompromissentscheidungen bei der Exposition von Verkehrs- und Wassergeräuschen beschrieben. In dem Experiment von DE COENSEL et al. (2011) zeigte sich, dass Brunnen- und Vogelgeräusche die wahrgenommene Lautstärke von Autobahnen und Hauptstraßen reduzieren können, nicht jedoch von Nebenstraßen.

HONG et al. (2020) untersuchten den Einfluss der Naturgeräusche „Vogelgezwitscher“ und „Flussrauschen“ auf die urbanen Geräusche „Verkehrslärm“ und „Hydraulikbohrer“. Es zeigte sich, dass Naturgeräusche die wahrgenommene Lautstärke des Verkehrs-/Hydraulikbohrerlärms um knapp 18 % reduzieren konnte, jedoch nur bei Schalldruckpegeln bis 65 dB. Das steht im Einklang mit den Ergebnissen von ZHANG und KANG (2007), die feststellten, dass eine Maskierung mit erwünschten Geräuschen nur in einem Pegelbereich bis maximal 70 dB(A) eingesetzt werden können. Bei höheren Schalldruckpegeln würden zusätzliche Geräusche oft nur zur weiteren Erhöhung der Belästigung aufgrund der erhöhten Lautstärke außerhalb des Komfortbereiches führen (ebd.).

Der Einsatz von Naturgeräuschen scheint außerdem die Qualität der gesamten Soundscape oder aber auch einzelner Parameter wie der Angenehmheit oder der Ereignisfülle verbessern zu können (DE COENSEL et al. 2011, RÄDSTEN-EKMAN et al. 2013, HONG et al. 2020). Es sollte sichergestellt werden, dass die hinzugefügten Geräusche den Gesamtschalldruckpegel nicht so stark erhöhen, dass die Soundscape-Qualität beeinträchtigt wird (DE COENSEL et al. 2011). RÄDSTEN-EKMAN et al. (2013) konnten zeigen, dass Menschen bei Hinzunahme angenehmer Wassergeräusche wie Meeresrauschen zu Straßenlärm, diesen als angenehmer empfinden. Der Effekt zeigt sich jedoch nicht, wenn weniger angenehme Wassergeräusche wie Wasserfall- oder

Flussrauschen präsentiert werden - zum Teil kann dies die Bewertung der Geräuschlandschaft sogar verschlechtern. Daneben erhöhen angenehme Geräusche die wahrgenommene Ereignisfülle. GALBRUN (2012) beobachtete, dass das präferierte Verhältnis des Wassergeräusches zur Maskierung von Lärm bei ca. 3 dB liegt, d. h. die Lautstärke der Wassergeräusche sollten idealerweise 3 dB unterhalb der Lautstärke des Verkehrsgeräusches liegen. Auch spiele der Geräuschcharakter der Wassergeräusche eine Rolle, die eher tieffrequent mit langsamer Fließgeschwindigkeit ausgelegt werden sollten.

Zusätzlich scheinen die zeitlichen Strukturen der Maskierungs- und Umgebungsgeräusche einen Einfluss auf die Höhe der Maskierung zu haben: Dass Brunnen- und Vogelgeräusche die wahrgenommene Lautstärke an Autobahnen und Hauptstraßen reduzieren können, könnte nach DE COENSEL et al. (2011) daran liegen, dass die Zusammenstellung der Maskierungsgeräusche eine höhere Variabilität erzeugt und dadurch mehr Aufmerksamkeit auf sich und weg vom Verkehrslärm ziehen. Die Ergebnisse von HONG et al. (2020) deuten ebenso darauf hin, dass Unterschiede in der zeitlichen Struktur des maskierenden Geräusches und der Zielgeräusche Einfluss auf die Maskierung und die Gesamtqualität der Soundscape haben: Bei Geräuschen mit geringer zeitlicher Variabilität (z. B. stationäre Verkehrs- oder Lüftungsgeräusche) waren Naturgeräusche (in dem Fall Vogelgezwitscher und Flussrauschen) mit entweder hoher oder geringer zeitlicher Variabilität wirksam. Ein Naturgeräusch, das eine geringe zeitliche Variabilität aufweist, könnte jedoch besser geeignet sein, um ein nicht-stationäres Geräusch (z. B. ein Hammer- oder Bohrgeräusch) zu maskieren. Größere Unterschiede in der zeitlichen Struktur der zwei Geräusche können zudem die Gesamtqualität der Soundscape verbessern (HONG et al., 2020).

VAN RENTERGHEM (2019) untersuchte die Wirkung von sichtbarer Begrünung, die mitunter unerwünschte Geräuschquellen visuell verdeckt und schätzte dabei den Grad der möglichen Belästigungsverringerung in Form eines Pegeläquivalents auf bis zu 10 dB ein, was einer Verringerung der wahrgenommenen Lautstärke entsprechen würde. CERWEN (2017) kombinierte ein begrüntes Lärmschutzwandelement, das an einem öffentlichen Platz in Malmö installiert wurde, mit der Wiedergabe von Waldgeräuschen mit versteckten Lautsprechern. Der Autor resümiert, dass "The use of masking strategies was found to be effective at the given sound pressure level, i.e. 58 dBA." (CERWEN 2017: S. 71). Ähnlich kombinierten KANG und HAO (2013) in Sheffield den Bau einer Lärmschutzwand in Form einer Metallwand mit der Idee einer Wasserskulptur. Neben dem Schutz vor Straßenverkehrslärm durch die Wand fungieren die permanenten Fließgeräusche als zusätzliche Maskierer.

Das vorliegende Forschungsprojekt widmet sich diesem Forschungstrend, wobei der Zusammenhang zwischen spektralen Lärmimmissionspegeln, psychoakustischen Parametern und der empfundenen Qualität von Schallsignalen bzgl. der Ausprägung eines Lärmeindrucks untersucht wird. Dabei soll die Reduzierung der Lärmbelastigung durch psychoakustisch wirksame Maßnahmen geprüft und deren Anwendungspotential auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse abschließend diskutiert werden.

## **2.4 Fazit für die Studiendurchführung**

Aus den in der Literatur berichteten Beschreibungen zum methodischen Vorgehen und Befunden zur Soundscapebewertung lassen sich Grundlagen für die geplante Studiendurchführung ableiten. Kapitel 2.4 fasst diese grundlegenden Erkenntnisse zusammen und gibt einen kurzen Ausblick auf das geplante Vorgehen in der ersten

Studie des Forschungsvorhabens, die sich mit der Erhebung von Soundscape-Deskriptoren beschäftigen wird.

#### **2.4.1 Unabhängige Variablen (UV)**

##### **2.4.1.1 Unabhängige Variable 1: Soundscapes**

Um eine umfassende, reichhaltige Beschreibung der Soundscapes einerseits und eine hohe Generalisierbarkeit der Deskriptoren andererseits zu erreichen, werden in aktuellen Studien repräsentative, heterogene Straßenverkehrsszenen erhoben und zur Entwicklung von Deskriptoren herangezogen (KANG et al. 2019, ALETTA et al. 2016). Die Anzahl bewerteter Orte wirkt sich dabei auch auf die Güte der Vorhersagemodelle aus (LIONELLO et al. 2020).

In der ersten Studie werden daher zu unterschiedlichen Zeiten möglichst heterogene Soundscape-Segmente an ca. 30 repräsentativen Orten in und in der Umgebung von Berlin aufgenommen, um eine breite Auswahl an Befragungssitemen generieren und damit die Dimensionen der Klangwahrnehmung und das Konstrukt des (Dis)komforts bzw. der Lästigkeit des Höreindrucks in all seinen Facetten abbilden zu können.

Die Auswahl der Messorte erfolgt über das Geoportal des Landes Berlin und der Verkehrsinformationszentrale Berlin. Dabei werden Straßenverkehrsszenarien systematisch unter Berücksichtigung der

- Verkehrsmenge
- Verkehrszusammensetzung
- Straßenbelag
- Abstand zur Straße
- Geschwindigkeit

ausgewählt.

Im ERC Advanced Grant Projekt (KANG et al. 2019) wird die akustische Aufnahme um eine repräsentative räumliche Aufnahme mittels 360°-Kamera ergänzt, die als Grundlage für die Reproduktion der audiovisuellen Aufnahmen in einer VR-Simulation unter Laborbedingungen dient. Im Einklang mit diesem Forschungsprotokoll werden die Aufnahmen der geplanten Studie zusätzlich um 360°-Videoaufnahmen aus der gleichen Perspektive wie die Klangaufnahmen mittels Insta360 Pro2 360° (8K stereoskopisch) erweitert. Ziel ist es, eine möglichst realistische visuelle Repräsentation der Audioszenen im Hörsimulator (vgl. Bild 2.2) über VR-Brillen umzusetzen, da die präsentierte visuelle Szene ebenfalls die Bewertung von Höreindrücken beeinflusst (ALETTA & KANG 2018, LIONELLO et al. 2020). Durch die hohe Passung zwischen Audio- und visuellem Input wird damit einer möglichen Konfundierung entgegengewirkt.

##### **2.4.1.2 Unabhängige Variable 2: Hörsituation**

Wie bereits dargestellt, finden sich in der Soundscape-Literatur hinreichend Belege dafür, dass zum einen die Aktivität, der ein Mensch in einer bestimmten Hörumgebung nachgeht, sowie der soziale Kontext (allein unterwegs sein vs. sozial mit anderen interagieren), einen Einfluss auf deren Bewertung haben (BILD et al. 2018, NIELBO et al. 2013). Zum anderen werden Soundscapes auch unterschiedlich bewertet, wenn durch die Instruktionen ein bestimmtes Framing der Aktivität gesetzt wird (KRZYWICKA &

BYRKA 2020). In den geplanten Studien soll daher eine möglichst neutrale Bewertungssituation umgesetzt werden.

#### 2.4.2 Abhängige Variablen

Wie dargestellt, besteht eine große Vielfalt an Erhebungsinstrumenten für Soundscapes, wobei das semantische Differential präferiert wird (ENGEL et al. 2018). Bisher eingesetzte semantische Differentiale sind sowohl bzgl. ihres Umfangs als auch ihres Inhalts (genutzte Items/Adjektive) recht unterschiedlich und es bestehen aktuelle Forschungsbemühungen, Soundscape-Indizes zu entwickeln, was auch eine Harmonisierung von Beschreibungsdimensionen voraussetzt (KANG et al. 2019). Zudem wurden die semantischen Differentiale bisher vorwiegend für die Bewertung des Komforts und Erholungswertes von Soundscapes genutzt; nur selten wurden auch Aspekte von Verkehrsgeräuschen betrachtet. Daher fehlen aktuelle Befunde, inwieweit die bisher genutzten Befragungsinstrumente auch für die Bewertung der Lästigkeit von Verkehrsgeräuschen und dazu beitragender akustischer Faktoren geeignet sind. Im vorliegenden Forschungsvorhaben soll daher ein Erhebungsinstrument entwickelt und validiert werden, das für diesen Einsatz konzipiert wird.

Die Erhebung von Beschreibungsdimensionen für den akustischen Eindruck der Soundscapes bzgl. des (Dis)Komforts, der Lärmbelästigung und anderer subjektiver Kategorien soll im Hörsimulator mittels Repertory-Grid-Technik erfolgen. Diese Methode wird in vielen Gebieten zur Erhebung von Beschreibungsdimensionen genutzt, auch in der Akustik- und Hörforschung (WEINZIERL et al. 2018). Die Repertory-Grid-Technik wurde ursprünglich von KELLY (1955) zur Erhebung persönlicher Konstruktsysteme von Individuen im Diagnosekontext entwickelt und umfasst vier Phasen (z. B. HEMMECKE 2012). Dabei werden in der ersten Phase zunächst entweder vom Probanden oder dem Forscher Elemente ausgewählt, die anschließend in der zweiten Phase in Gruppen von je drei Elementen, Triaden, vom Probanden miteinander verglichen werden. Die Bildung von Ähnlichkeits- und Verschiedenheitsurteilen ist das wesentliche Prinzip der Konstruktsgewinnung. Die so entstehenden Beschreibungsdimensionen haben bereits den Charakter eines semantischen Differentials, das jedoch nicht zwingend Gegenpoligkeit (z. B. warm-kalt) aufweisen muss, denn dies ist im (ursprünglichen) Diagnosekontext nicht das Ziel. Im vorliegenden Projekt konstituieren die Straßenverkehrsszenen die Elemente, die im Hörversuch miteinander verglichen werden. Die Beschreibungen (Attribute) können hierbei im Triaden- oder auch im Paarvergleich abgeleitet werden. Werden Attribute und ihre Antonyme vom Probanden gebildet, müssen die entstehenden Items häufig noch zusätzlich bearbeitet werden, um eine echte Gegenpoligkeit zu erreichen und damit dem Kriterium der Eindimensionalität zu genügen, welches erst die sinnvolle Ermittlung zentraler Tendenzwerte ermöglicht (vgl. OEHME 2013). Alternativ kann auch auf die Benennung eines Gegenpols während des Vergleichs verzichtet werden. Die genannten Attribute werden dann im Nachhinein über Antonymwörterbücher zu bipolaren Adjektivpaaren ergänzt, oder es werden unipolare Attribute für die Entwicklung eines Erhebungsinstrumentes genutzt.

In der ersten Studie des Projektes wurden diese beiden Phasen, Auswahl und Vergleiche der Elemente, durchgeführt. In der zweiten Studie erfolgten dann die Bewertung der Elemente und die Analyse, d. h. die Phasen drei und vier der Repertory-Grid-Technik.

Die erste Studie hatte damit explorativen, hypothesengenerierenden Charakter. Als abhängige Variablen fungierten die generierten Ähnlichkeits- und Verschiedenheitsurteile und die daraus abgeleiteten Beschreibungsdimensionen, wobei hier sowohl die Analyse der Anzahl, aber vor allem des Inhaltes der Beschreibung erfolgte.

### 2.4.3 Umsetzung der Studien im Simulator: Schallfeldsynthese und Raumakustiksimulation

Die überwiegende Mehrheit von Studien zur Geräuschwahrnehmung stützt sich auf experimentelle Ergebnisse aus Hörversuchen im Labor, die einen integralen Bestandteil der wissenschaftlichen und industriellen Praxis im Bereich der Hörakustik bilden (DEGA 2008). Nach den Erkenntnissen aus der Soundscape-Forschung müssen jedoch wichtige Randbedingungen erfüllt werden. Eine Ermittlung technischer Parameter durch Hörversuche im Labor muss daher sowohl eine akustisch wie visuell hinreichende ökologische Validität der angebotenen Stimuli bieten und gleichzeitig realitätsnahe Kontextfaktoren variieren bzw. kontrollieren, um diese in ihren Auswirkungen auf die empfundene Lästigkeit zu analysieren bzw. die Generalisierbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Diese Anforderungen sollen in der Umsetzung der Studie im Simulator berücksichtigt werden.

Für eine Re-Synthese komplexer räumlicher Schallfelder im Labor stehen heute eine ganze Reihe von Aufnahmeverfahren durch unterschiedlich angeordnete Mikrofon-Arrays einerseits, sowie Verfahren zur Schallfeldsynthese durch horizontale oder halb-sphärische Lautsprecher-Arrays andererseits zur Verfügung (SLAVIK & WEINZIERL 2008). Hierfür wird sowohl das weltweit größte System zur Wellenfeldsynthese mit 2700 Lautsprechern genutzt, in dem 2008 die erste Live-Re-Synthese eines Konzerts aus dem Kölner Dom für ein Publikum von 700 Zuhörern realisiert wurde (ZIEGLER, 2008); als auch ein VR-Labor, in dem ein System zur Schallfeldsynthese durch Higher Order Ambisonics mit optischen Systemen (Head Mounted Displays, Bildschirme, Screens mit Rückprojektion) kombiniert ist und die freie räumliche Bewegung einer Probandengruppe von 6–8 Personen möglich ist (Bild 2.2).

Dieses Labor wurde genutzt, um Soundscapes, die an einer Auswahl von Verkehrsknotenpunkten mit verschiedenen verfügbaren Mikrofonarrays aufgezeichnet wurden, dreidimensional wiederzugeben. Hierfür kommt z. B. eine Aufnahme mittels 32-Kanal Eigenmike (vgl. MEYER & ELKON 2002; MH Acoustics oder Zylia Pro) im Higher Order Ambisonics (HOA) Format 3. Ordnung unter Aufnahme des Schalldruckpegels (NTI Audio M2230 mit Klasse 1-Messmikrofon) infrage. Durch ein Mitloggen der Schalldruckpegel während der Aufnahme kann die re-synthetisierte Soundscape auch im Pegel exakt kalibriert werden. Das Vorgehen zur Studienvorbereitung findet sich in Kapitel 3.1.

Mit der virtuellen Akustik können akustische Szenen mit statischen oder bewegten Schallquellen in Echtzeit simuliert und mit Hilfe des Higher-Order-Ambisonics-Verfahrens (HOA) über ein mehrkanaliges Lautsprecher-Array hörbar gemacht werden. Hierzu werden einzelne Schallquellen als Audio-Objekte definiert, die im dreidimensionalen Raum angeordnet und bewegt werden können. Die Position und der Bewegungspfad der einzelnen virtuellen Schallquellen können durch standardisierte Metadaten-Modelle wie dem Open Sound Control (OSC) Protokoll synchron zu visuellen Wahrnehmungselementen übertragen werden. Moderne Anwendungen, wie die Echtzeit-Raumakustiksimulationssoftware RAVEN (SCHRÖDER & VORLÄNDER 2011), verwenden einen hybriden Ansatz. Die Kombination aus Spiegelschallquellen-Methode und der stochastischen Strahlenverfolgung ermöglicht eine plausible Auralisation (BRINKMANN et al. 2019) von Schallquellen in einer virtuellen akustischen Umgebung.



Bild 2.2: Mixed Reality Design Lab von TU Berlin und UdK Berlin. Installation zur Synthese von virtuellen oder augmentierten akustischen Realitäten durch ein Higher-Order-Ambisonics-Lautsprechersystem.

### 3 Studie zur Entwicklung von Beschreibungsdimensionen

Ziel der ersten Studie im Projekt war es, Beschreibungsattribute zu erheben, die dezidiert beim Erleben von Straßenverkehrsgläuschen verbalisiert werden. Die Studie hatte folglich einen stark explorativen Charakter. Sie wurde in einem Mixed-Reality-Labor durchgeföhrt, in welchem den Versuchsteilnehmenden zuvor aufgenommene audiovisuelle Straßenverkehrsszenen präsentiert wurden. Die Teilnehmenden hatten die Aufgabe, Attribute zu nennen, die ihren jeweiligen Höreindruck möglichst gut beschreiben. Die Datenanalyse wurde dem Ziel der Untersuchung gemäß semantisch-qualitativ durchgeföhrt.

In den folgenden Kapiteln wird die Studie im Detail beschrieben, beginnend mit dem Versuchsmaterial (Kap. 3.1), dem Versuchsdesign (Kap. 3.2), der Durchführung (Kap. 3.3) sowie den Ergebnissen (Kap. 3.5). Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung und dem Ausblick auf die anschließenden Phasen des Projekts (Kap. 3.6).

#### 3.1 Versuchsmaterial

##### 3.1.1 Technisches Set-Up: Aufnahmeaufbau

Für die Aufzeichnung von hochwertigen und realistischen Straßenverkehrsszenen wurde ein technischer Aufbau gewählt, der hohe Ansprüche an Mobilität, Funktionalität und Qualität erfüllte. Dafür wurde eine dreiteilige Aufnahmezusammenstellung genutzt, die aus einer Insta360 Pro II 360° Kamera, einem Zylia ZM1 Ambisonics-Mikrofon und einem NTI XL2 Handschallpegelmessgerät bestand.

Mit einer Insta360 Pro II 360° Kamera als State-of-the-Art Model mit 6 F2.4 Fisheye-Linsen wurden sphärische monoskopische Aufnahmen mit einer Auflösung bis zu 8K (7680 x 7680 Pixel pro Einzelbild) realisiert.

Um die Ansprüche an eine möglichst realistische und immersive Aufzeichnung der Umgebungsgeräusche zu erfüllen, wurde das Zylia ZM-1 Mikrofon ausgewählt. Das Mikrofon ist mit 19 Mems Kapseln ausgestattet, die es ermöglichen, Ambisonics Aufnahmen der dritten Ordnung zu generieren. Das Mikrofon wurde für die Aufnahme an einem Stativ oberhalb der Kamera ausgerichtet und beide Geräte wurden aufeinander abgestimmt auf einer Achse ausgerichtet.

Der NTI XL2 Klasse 1 Handschallpegelmesser wurde, nachdem er ordnungsgemäß mittels eines 94 dB Referenzsignal bei 1 kHz kalibriert wurde, auf einer Achse am Stativ mit den zwei Aufnahmeggeräten angebracht, um die Schalldruckpegel mit einem kalibrierten Messgerät am Aufnahmeort aufzuzeichnen (vgl. Bild 3.1 links).

Kontrolliert und angesteuert wurde die Kamera per Farsight Controller, einer per Wifi verbundenen Fernsteuerung, die mit einem Smartphone bedient werden kann. Mit einem Lenovo Think Pad, welches per USB mit dem Mikrofon verbunden wurde, konnten mit der Digital Audio Workstation Reaper die Aufzeichnungen gesteuert werden, dabei wurde die Verstärkung des Mikrofons (Gain) auf einen eher geringen konstanten Faktor eingestellt, um zwischen den Aufnahmen keine Varianzen zu erzeugen. Da das Aufnahmeggerät digital angesteuert wurde und der Verstärkungsfaktor unverändert blieb, war keine zusätzliche Kalibrierung notwendig.

Der Aufbau der Aufnahmetechnik ist in Bild 3.1 auf der linken Seite dargestellt.

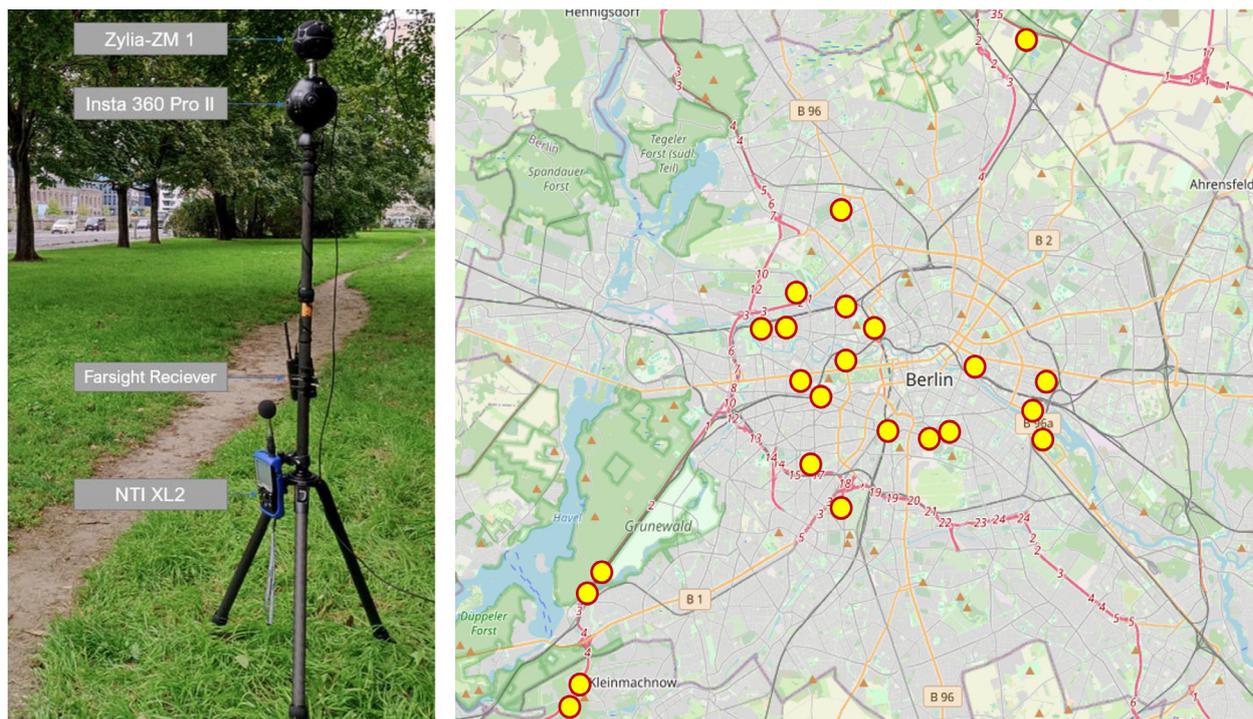


Bild 3.1 Aufnahmeaufbau (links) und Aufnahmeorte (rechts) der Straßenverkehrsszenen  
(Kartengrundlage: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA 2.0)

### 3.1.2 Aufnahme der Soundscapes

Die Aufnahmeorte in Berlin und Umgebung, die für die Erstellung des Untersuchungsmaterials herangezogen wurden (s. Bild 3.1 rechts), wurden anhand vordefinierter Kriterien ausgewählt. Ziel war es hierbei, Szenen zu erhalten, die sich möglichst divers im Klangbild unterscheiden (vgl. Bild 3.2).

Immissionspunkt, Verkehrsmenge (Daily Traffic Volume), Verkehrszusammensetzung (LKW, PKW, Motorrad), Fahrbahnoberfläche (Asphalt, Pflaster), zugelassene Geschwindigkeit (30 km/h, 50 km/h, >50 km/h) und Straßenführung (lichtsignalgeregelte Kreuzungen und Einmündungen, Kreisverkehr) waren hierbei entscheidende Unterschiedskriterien, da sie Auswirkungen auf das Verhalten des Schalls beispielsweise durch Absorption an einem Ort haben können.

Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass in einigen Aufnahmen Geräusche enthalten waren, die nicht primär durch den motorisierten Verkehr entstanden sind, um deren maskierende Eigenschaften im Kontext von Straßenverkehrsgeräuschen zu explorieren (vgl. Bild 3.2, rechts unten). Auch wurde punktuell die Tageszeit variiert (Tag, Nacht).



Bild 3.2 Beispiele für die Bandbreite an aufgenommenen Straßenverkehrssituationen

Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die bei den Aufnahmen der audio-visuellen Straßenverkehrsszenen variierten Aspekte und deren mögliche Ausprägungen. Insgesamt wurden an 39 Orten Aufzeichnungen von durchschnittlich acht Minuten Dauer erstellt. Jede Aufnahme wurde anhand der in Tabelle 3.1 aufgeführten Eigenschaften klassifiziert, um die Auswahl von Dyaden zu leiten.

Aspekt	Ausprägungen
Straßenbelag	Asphalt, Offenporiger Asphalt, lärmarmes Asphalt, Pflasterbelag
Verkehrsmenge	gering - hoch (DTV)
Verkehrszusammensetzung	Pkw, hoher Anteil von Zweirädern, hoher Anteil Lkw
Geschwindigkeit	zulässige Höchstgeschwindigkeit von 30-130 km/h
Verkehrsfluss	Anhalten und Beschleunigen, Stop&Go, fließend
Immissionspunkt	5m und größere Abstände (bis 250m)
Verkehrsrichtung	Einbahnstraße, Zweirichtungsstraße

Tabelle 3.1 Aspekte und Ausprägungen für die Aufnahme der audio-visuellen Straßenverkehrsszenen

### 3.1.3 Auswahl der Dyaden

**Vortest 1.** Die Auswahl der Dyaden erfolgte nach einem ersten Vortest mit  $N=4$  Probanden (2 weiblich, 2 männlich) und 20 aus den Aufnahmen extrahierten Straßenverkehrsszenen mit 30 Sekunden Dauer, die jeweils als Dyaden bearbeitet wurden. Es wurde geprüft, ob die Länge der Stimuli ausreichend ist, um ein Urteil zu treffen, wie leicht oder schwer es den Probanden fiel, Unterschiede festzustellen und welche sonstigen Anpassungen bei der Darstellung und Durchführung für den

Hauptversuch umgesetzt werden sollten. Die Vorversuche fanden am PC mit handelsüblichen Kopfhörern und ohne visuellen Input statt. Die Probanden dokumentierten die erlebten Attribute selbstständig in einen vorbereiteten Protokollbogen. Die Durchführungszeit war auf eine Stunde begrenzt, und es wurde ermittelt, wie viele Dyaden in dieser Zeit bearbeitet werden konnten.

Es zeigte sich, dass die Aufnahmen mit 30 Sekunden zu lang waren, wodurch die Probanden zum einen schneller ermüdeten und zum anderen eine eher geringe Zahl an Verkehrsszenen innerhalb der Studienzeit gehört wurden. Die Probanden brachen den Versuch nach 24 bis 31 Dyaden ab. Zudem waren die für die Vortests ausgewählten Soundscapes teils zu ähnlich, sodass den Probanden die Verbalisierung schwerfiel und lediglich eine geringe Anzahl an Eigenschaften protokolliert werden konnte.

**Auswahl für den Hauptversuch.** Aus den Aufnahmen wurden daher Szenen von 20 Sekunden Dauer extrahiert, die spezifische Verkehrssituationen zeigten, zum Beispiel fließender Verkehr bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 100 km/h mit überwiegendem Anteil von LKW bei einer Entfernung von 20 Metern auf offenporigen Asphalt. Auf diese Art wurde eine Sammlung von 73 verschiedenen Szenen erstellt.

Bei der Auswahl der Versuchsdyaden wurde aufgrund der Vortests darauf geachtet, dass sich diese möglichst deutlich voneinander unterscheiden. Hierfür wurden in einem nächsten Schritt alle Szenen hinsichtlich ihrer Eigenschaften miteinander verglichen. Szenen, die sich in mindestens drei der in Tabelle 1 genannten Aspekte unterschieden, wurden genutzt, um 40 Gegensatzpaare (Dyaden) zu erzeugen.

Die ausgewählten Straßenverkehrsszenen ließen sich verschiedenen Pegelkategorien zuordnen. Die Spannbreite der A-bewerteten Dauerschalldruckpegel ( $L_{Aeq}$ ) der Aufnahmen reichte von 56 dB (A) bis maximal 76 dB (A). Ein Hauptteil der Szenen konnte der mittleren Pegelkategorie von 60-64 dB (A) zugeordnet werden.

#### 3.1.4 Vorbereitung der Testumgebung

Um eine geeignete Reproduktion der Aufnahmen hinsichtlich Klangfarbe und Lautstärke in der Testumgebung gewährleisten zu können, wurde eine Reihe von Überprüfungen mit darauffolgend Modifikationen des Wiedergabesystems vorgenommen.

Ziel war es, das Wiedergabesystem dem Übertragungsverhalten des Zylia ZM-1 Mikrofons anzupassen und annähernd zu neutralisieren. Dafür war es notwendig zunächst eine Referenzmessung durchzuführen. Im Zuge dessen wurde Dauerschalldruckpegel eines statistischen Rauschsignals (White Noise), das nur von einem Lautsprecher ausgegeben wurde, mit dem Klasse 1 Schallpegelmessgerät NTI XL 2 mit hoher Zeitauflösung in Terzbändern gemessen. Das gleiche Signal wurde darauffolgend mit dem Zylia ZM-1 Mikrofon an gleicher Stelle positioniert aufgezeichnet. Diese Aufnahme wurde dann wiederum über den Upmixer Panoramix für die Wiedergabe über das Higher Order Ambisonics (HOA) Array dekodiert und abgespielt. Dabei wurde am Ort des Sweet Spots wieder frequenzspezifisch (in Terzbändern) der Dauerschalldruckpegel gemessen. Auf Basis dieser Messung konnte ein frequenzspezifischer Bandpassfilter erstellt werden, der die Differenzen im Terzbandspektrum zur Referenzmessung ausglich. Die korrekte Einstellung für den mittleren Schalldruckpegel am Empfängerort wurde ebenfalls durch den Vergleich zweier Messungen realisiert. Diesmal wurde zunächst eine Feldaufnahme über das mit Filtern versehene HOA-System abgespielt. Am Sweet Spot wurde der Dauerschalldruckpegel mit dem NTI XL2 aufgezeichnet. Die Differenz zur Messung der Feldaufnahme ergab den Verstärkungsfaktor, mit dem das System angepasst werden musste.

### 3.1.5 Postproduktion der Aufnahmen

Von großer Wichtigkeit war es, die Aufnahmen für den Hörversuch so zu präparieren, dass sie den Probandinnen ohne Komplikationen vorgespielt werden konnten.

Dafür wurden zunächst sphärische 360° Grad Videos mit Hilfe des Insta360 Stitching Programmes aus den sechs Teilaufnahmen jeder Linse generiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Überlappungswinkel zwischen den Bildern per Stitching Range Angle korrekt eingestellt waren. Die 19-Kanal-Audiodaten des Zylia ZM-1 wurden mit der Linux-basierten Anwendung Panoramix für das Ambisonics System höherer Ordnung entsprechend für die Wiedergabe über die 23 Lautsprecher unter Berücksichtigung der Verstärkung (Gain) des Mikrofons verarbeitet. Die darüber erzeugten Audiosignale wurden als 23 kanalige wav-Dateien durch eine Weiterleitung des Signales (Routing) zur Digital Audio Workstation „Reaper“ unter Berücksichtigung der dort stattfindenden frequenzabhängigen Modifikationen (Bandpassfilter aus Kalibrierung) abgemischt. Diese wurden dann auf einen Windows Rechner kopiert, um sie mit dem Videomaterial in Adobe Premiere zu vereinen. Die Synchronisierung der beiden Komponenten Bild und Ton erfolgte über das vor jeder Aufnahme durchgeführte Handsignal. In diesem wurde zudem der 0° Winkel in der Horizontalachse markiert, was eine Überprüfung der sphärischen Ausrichtung von Video und Ton bei der Wiedergabe ermöglichte. Weitere Modifikationen wie der Schnitt, Anpassung von Kontrast und Farbe wurden ebenfalls in Adobe Premiere durchgeführt.

In dieser Anwendung war es ferner durch die Verwendung des „Adobe Immersive Environment“ und der Integration zu Steam VR möglich, die Stimuli den Probandinnen in voller Auflösung zu präsentieren.

## 3.2 Versuchsdesign

Als unabhängige Variable fungierten die 40 zuvor ausgewählten Dyaden, die den Probanden in jeweils randomisierter Reihenfolge präsentiert wurden.

Die Erfassung der Wahrnehmungsqualitäten (abhängige Variable) erfolgte per Zuruf, also verbal von den Probanden an die Versuchsleitung. Die Probanden wurden instruiert, pro Dyade bis zu fünf Attribute für jede der beiden Verkehrsszenen zu benennen und, so ihnen möglich, ebenfalls bis zu fünf Attribute, die deren auditiven Unterschiede beschrieben.

Als Kontrollvariable wurden die Vertrautheit mit einer VR-Brille oder VR-Umgebung sowie die individuelle Lärmempfindlichkeit erhoben. Erstere wurde durch eine einfache Ja-Nein-Abfrage zur Erfahrung mit VR-Brille oder VR-Umgebung ermittelt, mit der Möglichkeit selbige auch in freier Form zu beschreiben. Um die individuelle Lärmempfindlichkeit zu erheben, bearbeiteten die Teilnehmenden den Kurzfragebogen zur Erfassung der Lärmempfindlichkeit (LEF-K) von ZIMMER und ELLERMEIER (1998). Dieser erfasst die individuelle Lärmempfindlichkeit mittels neun unterschiedlich gepolter Items (fünf positiv, vier negativ) auf einer vierstufigen Likert-Skala (stimmt genau, stimmt eher, stimmt eher nicht, stimmt gar nicht). Je höher der summierte Wert aller Antworten, desto höher die Lärmempfindlichkeit (vgl. Kapitel 3.4).

Die demografischen Daten der Teilnehmenden wurden durch einen weiteren Fragebogen erfasst (Alter, Geschlecht, berufliche Ausbildung und aktuelle berufliche Tätigkeit). Alle Fragebögen wurden in Papierform vorgelegt.

**Vortest 2.** Zur Prüfung der Methodik und des Ablaufes wurden mit dem geplanten Set-Up (vgl. Kap. 2.4) weitere Vortests mit  $N = 6$  Personen (3 weiblich, 3 männlich)

durchgeführt. Zum einen zeigte sich hierbei, dass durch die Notwendigkeit einer seriellen Präsentation der audio-visuellen Verkehrsszenen bereits bei der Präsentation der jeweils ersten Verkehrsszene der Höreindruck verbalisiert wurde. Zum anderen war es für die Probanden generell schwierig konkrete Unterschiede zu benennen, wohingegen eine Beschreibung der einzelnen Höreindrücke problemlos gelang.

Auf Basis dieser Beobachtung wurde von dem zuvor geplanten Vorgehen nach KELLY (1955) abgewichen. Bei der von ihm entwickelten Repertory Grid Technik ist die Bildung von Ähnlichkeits- und Verschiedenheitsurteilen das wesentliche Prinzip der Konstruktwinnung. Hierbei werden Begriffe (sog. Konstrukte) verglichen, die für den Probanden bedeutsam sind. In anderen Einsatzgebieten wird das Verfahren ebenfalls mit visuellen Stimuli genutzt (z. B. bei der Erfassung des Nutzererlebens, HAWLEY 2007). Da der primäre Zweck der Studie darin bestand, eine möglichst große Bandbreite an Attributen zu ermitteln, wurde ein vollständiger Dyadenvergleich daher nicht erzwungen. Die Verarbeitung der Attribute zu Fragebogenitems wurde nachgelagert in Vorbereitung der zweiten Studie durchgeführt.

### **3.3 Versuchsdurchführung**

Die Versuche wurden im Mixed Reality Design Lab der TU Berlin und UdK Berlin durchgeführt. Das Labor verfügt über eine audio-visuelle Anlage mit Sweetspot mit folgender technischer Ausstattung: 3D-Audio (21.2-Kanal Ambisonics) und einer 3D-Video-VR-Brille (Varjo VR-3 OLED 1920 x 1920 px per eye, 115° FoV). Mit Sweet Spot wird derjenige Ort innerhalb eines Lautsprechersettings beschrieben, an dem die Immersion (der 3D Effekt der Klangwiedergabe) am größten ist.

Die Steuerung der Stimuli sowie die Betreuung des Laborequipments oblag der Technikleitung (s. Bild 3.3, links), während die Probandenansprache durch die Versuchsleitung erfolgte. Die Trennung der Technikleitung von der Versuchsleitung optimierte dabei die Datenerhebung, da sich die Versuchsleitung ausschließlich auf die Kommunikation mit der Versuchsperson fokussieren konnte.

Nach der Aufklärung und Dokumentation der zur Einhaltung der Hygienemaßnahmen notwendigen Informationen (Impfstatus, Maskenpflicht, Hygienemaßnahmen bei der Nutzung der VR-Brille) wurden die Probanden verbal zum Versuchsablauf und zu ihrer Aufgabe durch die Versuchsleitung instruiert. Die standardisierten Instruktionen lagen der jeweiligen Versuchsleitung schriftlich vor. Dann wurden die Probanden gebeten den Fragebogen zur Demographie auszufüllen.

Anschließend wurden die Teilnehmenden im Sweetspot platziert. Als Teil des Hygienekonzeptes erhielten sie eine Schutzeinlage für die VR-Brille und die Technikleitung half ihnen beim Aufsetzen und Handling der zuvor desinfizierten Brille.



Bild 3.3 Versuchsdurchführung im Sweetspot des Mixed Reality Design Lab: Technikleitung (links), Proband im Sweet Sport (rechts)

Die randomisierten Dyaden wurden dreidimensional audio-visuell präsentiert, wobei zunächst die jeweils erste Verkehrsszene einer Dyade abgespielt wurde. Daraufhin folgte eine weiße Blende von 3 Sekunden Dauer und anschließend die zweite Szene. Die Probanden wurden bei jeder Dyade nach Attributen, also Adjektiven bzw. Eigenschaftswörtern gefragt, die ihren individuellen Höreindruck am besten beschreiben. Dabei wurden sie gebeten bis zu fünf Attribute zu jeder Verkehrsszene und zu den erlebten Unterschieden beim Vergleich der beiden Verkehrsszenen zu nennen. Die genannten Attribute wurden durch die Versuchsleitung in einer vorbereiteten Datenmaske dokumentiert.

Eine Trainingssequenz, bestehend aus drei Test-Dyaden, diente dem Kennenlernen der Versuchsumgebung, dem Adaptieren in die VR-Welt und dem Kennenlernen der Methodik. Die erste Test-Dyade wurde als zwei separate Verkehrsszenen nacheinander präsentiert, und es wurde zuerst einmal das Verbalisieren des Höreindrucks mittels Adjektiven realisiert. Danach wurden die beiden folgenden Test-Dyaden als Paar, also lediglich mit der trennenden Blende, abgespielt.

Die Test-Dyaden waren für alle Probanden gleich. Die 40 Dyaden der eigentlichen Datenerhebung wurden mit mindestens einer Pause (nach 20 Dyaden) und weiteren Pausen, je nach individueller Notwendigkeit für die Probanden, präsentiert. Während der Durchführung wurden die Probanden, wenn angebracht, durch die Versuchsleitung motiviert, ihre Höreindrücke zu verbalisieren und Eigenschaftswörter zu verwenden.

Zum Abschluss des Versuchs wurden die Teilnehmenden gebeten, den LEF-K-Fragebogen auszufüllen, bevor ihnen eine Aufwandsentschädigung von 20 € ausgezahlt wurde. Nach der Verabschiedung der Teilnehmenden wurden sämtliche Flächen, die zur

Bearbeitung der Fragebögen genutzt wurden, sowie das Versuchsequipment desinfiziert und für den nächsten Versuchsdurchgang vorbereitet.

Ein Versuchsdurchgang dauerte insgesamt circa 60-90 Minuten. In Bild 3.4 ist der Versuchsablauf grafisch zusammengefasst.



Bild 3.4 Grafische Darstellung des Versuchsablaufes

### 3.4 Stichprobe

Die Probandenakquise erfolgte über die Datenbanken der Technischen Universität Berlin und HFC Human-Factors-Consult GmbH. Bei der Akquise wurde auch eine annähernd ausgewogene Geschlechterverteilung geachtet, sowie eine annähernd ausgewogene Altersverteilung. Für letztere wurden im Vorfeld drei Altersgruppen gebildet.

An den Versuchen nahmen  $N = 22$  Personen ( $n = 9$  weiblich,  $n = 13$  männlich) im Alter zwischen 22 und 64 Jahren ( $M = 38.6$ ,  $SD = 13.4$ ) teil. Die Altersverteilung der Probanden umfasste  $n = 10$  für die Gruppe von 20-34 Jahren,  $n = 7$  für die Gruppe von 35-49 Jahren und  $n = 5$  für die Gruppe von 50-65 Jahren.

Ein Großteil der Teilnehmenden ( $n = 14$ ) hatte keine Spezialisierung in psychoakustischen Fachgebieten. Acht Teilnehmende waren Personen mit domänenspezifischem Hintergrund, v.a. Studierende und Mitarbeitende der Audiokommunikation und -technologie. Die Hälfte aller Teilnehmenden ( $n = 11$ ) verfügte bereits über Erfahrungen mit einer VR-Brille oder VR-Umgebungen.

Die individuelle Lärmempfindlichkeit der Probanden wurde über den Kurzfragebogen zur Lärmempfindlichkeit (LEF-K) von ZIMMER und ELLERMEIER (1998) erhoben. Für die Teilnehmenden wurden LEF-K-Gesamtwerte zwischen 6 und 26 Punkten ( $M = 13.64$ ,  $SD = 4.5$ ) ermittelt, was dem zu erwartenden durchschnittlichen Lärmempfindlichkeitswert entspricht. Bild 3.5 zeigt die Verteilung der Lärmempfindlichkeit über die Stichprobe. Je höher der LEF-K Score dabei ausfiel, umso lärmempfindlicher bewerteten sich die Personen. Die Verteilung von Lärmempfindlichkeitswerten innerhalb

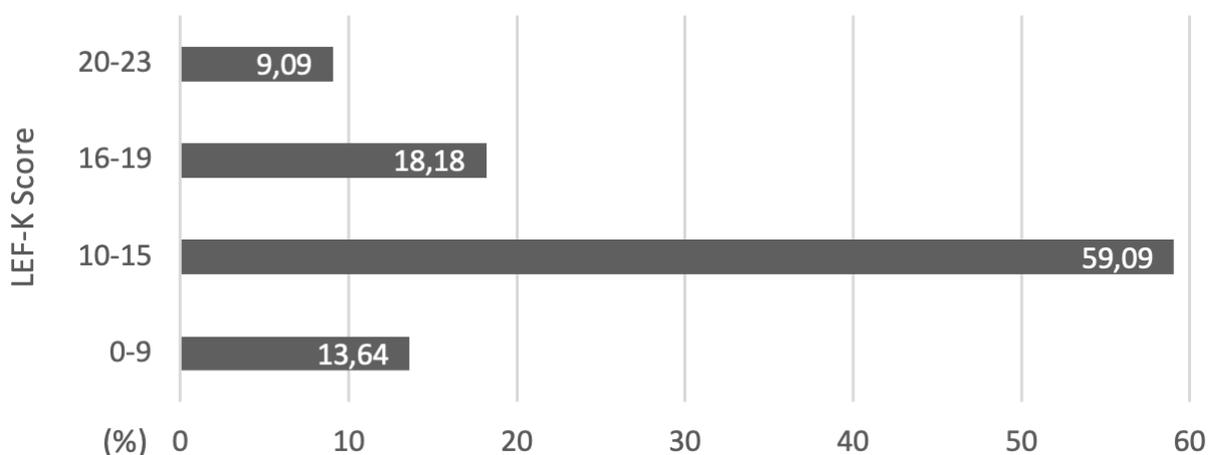


Bild 3.5 Prozentuale Verteilung der LEF-K-Gesamtwerte für die Stichprobe (N=22)

der Stichprobe entspricht dabei üblichen Verteilungen (vgl. HEINONEN-GUZEJEV 2009).

### 3.5 Ergebnisse

Die Datenanalyse erfolgte semantisch-qualitativ. Zunächst wurden die Rohdaten um Beschreibungen bereinigt, die sich primär auf die visuellen Eindrücke bezogen, oder Wortgruppen umfassten, ohne konkrete Attribute zu benennen (s. Kapitel 3.5.1). Im Anschluss wurden die Daten nach in der Literatur berichteten Beschreibungsdimensionen klassifiziert (s. Kapitel 3.5.2).

#### 3.5.1 Datenbereinigung

Insgesamt wurden durch die Teilnehmenden 4626 Attribute und Adjektivumschreibungen für den individuellen Höreindruck, sowie weitere umschreibende Wortgruppen für den audio-visuellen Eindruck genannt.

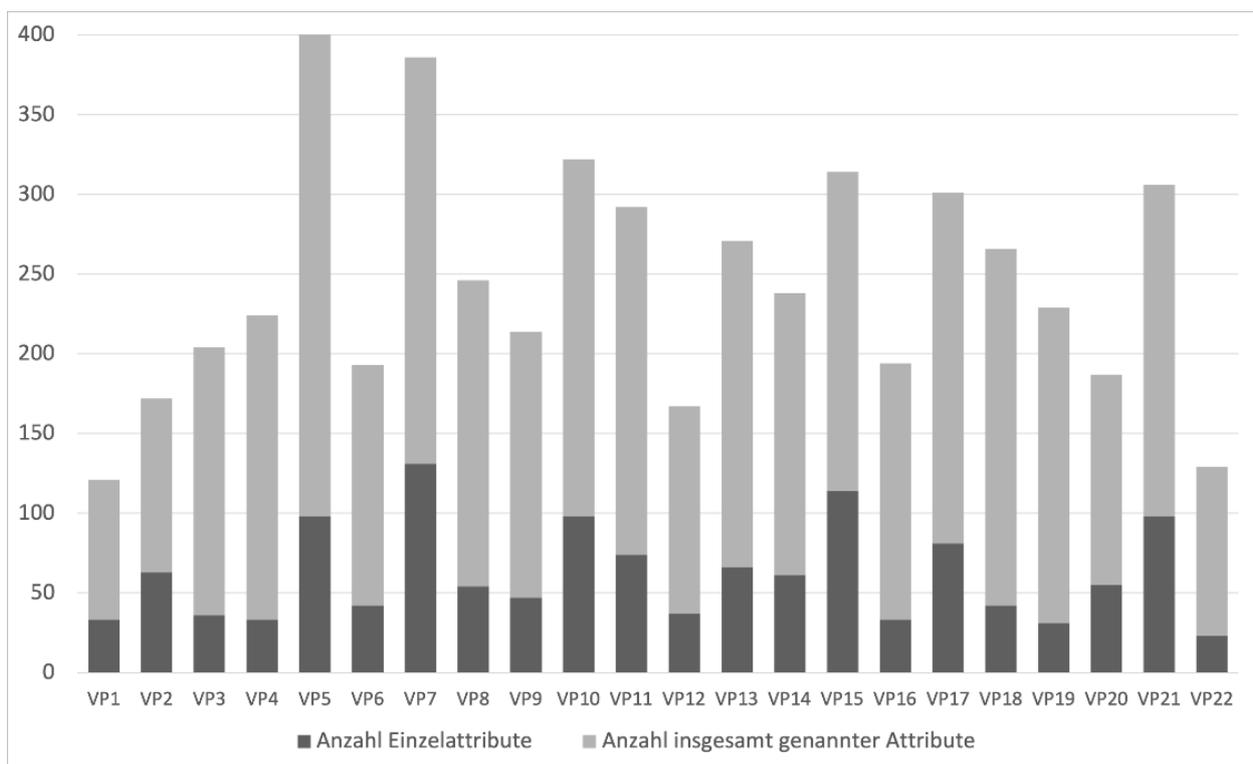


Bild 3.6 Anteil der Einzelattribute an insgesamt genannten Attributen pro Versuchsperson

Während des Versuchs wurden durch jede/n der Teilnehmenden zwischen 88 und 310 Attribute ( $M = 183.36$ ,  $SD = 50.86$ ) genannt (Bild 3.6). Dabei handelte es sich bei durchschnittlich 33.32 % der genannten Worte um Einzelattribute im Sinne von individuell gewählten Worten ( $M = 61.36$ ,  $SD = 29.63$ ), während es sich bei dem anderen Anteil um Worte handelte, die auch von anderen Teilnehmenden genannt wurden (interindividuelle Übereinstimmung). Bild 3.6 zeigt den Anteil der Einzelattribute an genannten Attributen pro Versuchsperson.

Der Datensatz wurde um alle Umschreibungen bereinigt, die nicht unmittelbar Attributen und Beschreibungen zum Höreindruck zugeordnet werden konnten. Nach der Bereinigung umfasste der Datensatz für die weitere Analyse 4044 Attribute und Adjektivumschreibungen, wobei inter- und intra-individuell teils viele Mehrfachnennungen zu verzeichnen waren. Bereinigt um diese Mehrfachnennungen, gingen 742 individuelle Adjektive und Adjektivumschreibungen in die weitere Analyse ein.

Die 13 am häufigsten verbalisierten Adjektive sind in Bild 3.7 abgebildet. Sie wurden von mindestens der Hälfte der Stichprobe genannt.

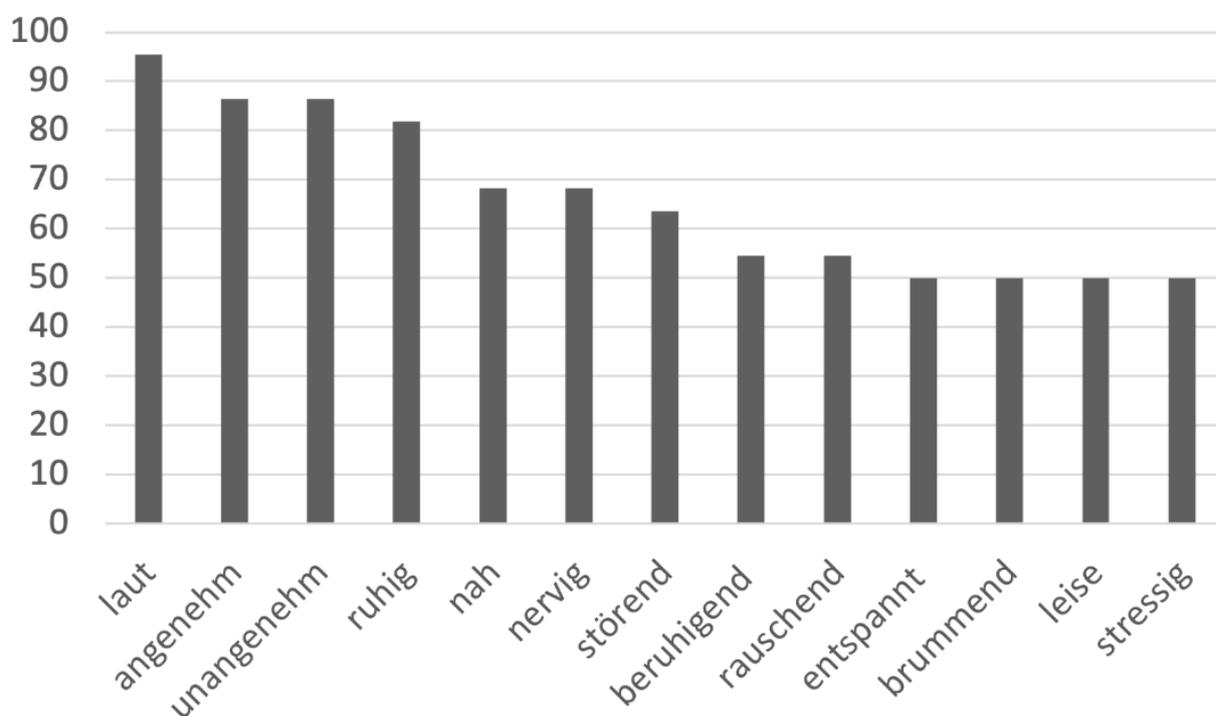


Bild 3.7 Anteil der Attributnennungen in %, häufigste Adjektive

### 3.5.2 Kategorisierung nach Beschreibungsdimensionen

Um die hohe Anzahl ähnlicher Attribute zu clustern, wurden diese anhand semantischer Überlegungen, theoretischer Plausibilität und Verständlichkeitsbetrachtungen einschlägigen Beschreibungsdimensionen zugeordnet.

Dabei wurde zunächst auf bereits aus der Literatur bekannte Kategorien (s. Tabelle 3.2, vgl. Kap. 2) zurückgegriffen. Zu diesen zählen zum einen emotionsbezogene Kategorien wie die Basisemotionen und die aus dem dimensional Emotionsmodell bekannten Dimensionen Valenz, Aktivierung und Dominanz. Zum anderen umfassen bekannte Dimensionen auch spezifische geräusch- und ereignisbezogene Kategorien wie Lautstärke, Ereignisfülle oder Vertrautheit.

#### 3.5.2.1 Bekannte Soundscape-Kategorien

Der Kategorie der Basisemotionen können emotionale Zustände wie Freude, Ärger, Wut und Trauer zugeordnet werden. Zu beispielhaften Attributen zählen hier Eigenschaften wie „friedlich“, „aggressiv“ oder „bedrohlich“. Zur Beschreibung der genannten Attribute eignen sich ebenso die aus dem Affektmodell bekannten Dimensionen der Valenz, Aktivierung und Dominanz (ANDRINGA & VAN DEN BOSCH 2013). Der Kategorie Valenz lassen sich Begriffe zuordnen, die sich mit Präferenz, Ablehnung, Akzeptanz oder Bevorzugung befassen. Beispielhafte Attribute für diese Kategorie sind „angenehm“, „akzeptabel“, „nervig“ und „zumutbar“. Zu Beschreibungen innerhalb der Kategorie Aktivierung zählen beispielsweise „aktivierend“, „monoton“, „hektisch“, während sich die Dimension Dominanz auf die in einer Situation erlebte Kontrolle bezieht. Beschreibende Adjektive hierfür sind zum Beispiel „bedrohlich“, „hilflos“, „stark“.

Die ISO/TS 12913-3 (2019) adressiert die Dimensionen des Affektmodells teils ebenfalls in einem Merkmalsraum mit vier Quadranten, wobei die Quadranten I und II ereignisreiche, dynamische, abwechslungsreiche Umgebungen beschreiben, die sich im Grad der Angenehmheit unterscheiden („chaotisch“, „hektisch“ vs. „lebendig“, „aufregend“). Die Quadranten III und IV beziehen sich auf die wahrgenommene Ereignisarmut, unterscheiden sich jedoch ebenfalls im Grad der Valenz („langweilig“, „trotlos“ vs. „erholsam“, „ruhig“) (vgl. FIEBIG 2021). Wie beschrieben, ist neben den Dimensionen Aktivierung und Valenz damit auch die Ereignisfülle (engl. eventfulness) abgebildet, eine bereits aus der Soundscape-Theorie bekannte Kategorie, die die "neutrale", unbewertete Anzahl an Ereignissen thematisiert. Beispiele hierfür sind „detailreich“, „lückenhaft“ oder „durchgängig“. Der Itempool der Norm ist auch in Deutsch verfügbar (ebd.).

Der Aspekt der Vertrautheit adressiert Begriffe, die sich auf eine Bekanntheit oder Unbekanntheit der Situation beziehen. Attributbeispiele hierfür sind „normal“, „familiär“ oder „merkwürdig“. Die Begrifflichkeiten der Kategorie Lautstärke lassen sich unmittelbar auf die (sensorische) Lautstärkeempfindung beziehen. Beispiele hierfür sind „laut“ und „leise“, aber auch Komparationen wie „megalaut“.

Kategorie	Quelle	Beispielhafte Attribute aus der vorliegenden Studie
Basis-emotionen	SUDARSONO et al., 2019	friedlich, aggressiv, bedrohlich, unheimlich
Valenz	AXELSSON et al., 2010; YU et al., 2016; ISO/TS 12913-3, 2019, TARLAO et al., 2019	angenehm, akzeptabel, nervig, zumutbar
Aktivierung	BJÖRK, 1985; ANDRINGA & VAN DEN BOSCH, 2013	aktivierend, monoton, hektisch, lebhaft
Dominanz	CHOI et al., 2015	dominant, bedrohlich, beeindruckt
Ereignisfülle	AXELSSON et al., 2010; CAIN et al., 2013; TARLAO et al., 2019, ISO/TS 12913-3, 2019	detailreich, lückenhaft, durchgängig, ereignisarm
Lautstärke	YU et al., 2016	laut, leise, megalaut
Vertrautheit	AXELSSON et al., 2010; ZHANG AND KANG, 2020	normal, familiär, merkwürdig, irritierend

Tabelle 3.2 Kategorien aus der Literatur

### 3.5.2.2 Kategorien aus der Forschung zur Hörwahrnehmung

Neben den o. g. Kategorien aus der Soundscape-Forschung wurden ebenfalls Dimensionen betrachtet, die in der Hörforschung (z. B. LINDAU et al., 2014) häufiger Anwendung finden bzw. dort abgeleitet wurden. Eine hohe Anzahl an Attributen adressiert daher weitere Aspekte, die nicht durch die o. g. Kategorien beschrieben werden. Hierzu zählen Dimensionen wie Zeitstruktur, Geräuschcharakter, Klarheit, Raum, audio-visuelle Parameter und Vordergrund/Hintergrund, die ebenfalls häufiger

durch die Versuchspersonen mittels verschiedener Attribute thematisiert wurden (s. Tabelle 3.3).

Kategorie	Beispielhafte Attribute aus der vorliegenden Studie
Klarheit	verschwommen, transparent, klar, gedämpft
Raum	offen, geschlossen, umhüllend, einhüllend
Zeitstruktur	regelmäßig, zyklisch, fließend, vereinzelt
Geräuschcharakter	hell, schrill, bassig, dröhnend
audio-visuell	industriell, sommerlich, städtisch
Vordergrund/ Hintergrund	vordergründig, hintergründig, unaufdringlich, präsent

Tabelle 3.3 Weitere beobachtete Kategorien neben den etablierten Kategorien aus Tabelle 2

Attribute der Dimension Klarheit beschreiben den Gesamteindruck der "Erfassbarkeit" der Umgebung. Beispielhafte Attribute sind „verschwommen“, „transparent“ oder „klar“. Die Kategorie Raum beinhaltet dagegen Begrifflichkeiten, die eine räumliche, umhüllende oder richtungsbezogene Komponente enthalten, wie beispielsweise „offen“, „geschlossen“ oder „umhüllend“.

Zu audio-visuellen Parametern werden Begrifflichkeiten gezählt, die durch visuelle Aspekte bedingt werden. Beispiele hierfür sind „industriell“, „sommerlich“ oder „städtisch“. Der Aspekt des Vordergrundes/ Hintergrundes beschreibt gemäß der Figur-Grund-Theorie alles, was sich auf die Trennung von Vordergrund und Hintergrund bezieht. Beispiele dafür sind „vordergründig“, „hintergründig“, „unaufdringlich“.

In die Kategorie Zeitstruktur können Attribute zugeordnet werden, die sich auf zeitliche Variationen oder Konstanz beziehen. Beispielhafte Begriffe sind „regelmäßig“, „zyklisch“ und „vereinzelt“.

Der Geräuschcharakter von Soundscapes wird durch Begriffe beschrieben, die auf die Klangfarbe oder andere akustische Eigenschaften eingehen (Bass, Tonalität oder Rauigkeit). Der Geräuschcharakter ist also ein geeigneter Oberbegriff sehr unterschiedlicher auditiver Empfindungen. Beispiele hierfür sind „hell“, „schrill“ und „bassig“.

### 3.5.2.3 Kategorisierung der Attribute

Zur Kategorisierung der Attribute wurden auch die noch vorhandenen Adjektivumschreibungen entfernt, da diese nicht sinnvoll zu interpretieren waren. Hierzu gehören z.B. „man kann ausschalten“, „man konnte sich dem nicht entziehen“ oder „Geräuschquelle suchend“. Die Kategorisierung der verbliebenen 3686 Attributnennungen, die sich aus insgesamt 654 Einzelattributen zusammensetzten, erfolgte durch drei Beurteilende (ein Psychoakustiker, zwei Psychologinnen), die diese unabhängig voneinander den o. g. 13 Kategorien zuordneten. Eine Zuweisung erfolgte dann, wenn ein Attribut von mindestens zwei der drei Beurteilenden der gleichen Kategorie zugewiesen wurde.

Wie bereits an den Attribut-Beispielen in Tabelle 3.2 und Tabelle 3.3 ersichtlich wird, lassen sich einige Attribute mehreren Kategorien zuordnen. Im Beurteilungsprozess wurden jedoch lediglich zwei Attribute mehr als einer Kategorie zugeordnet: „nicht differenzierbar/differenziert“ wurde den Kategorien Vordergrund/Hintergrund sowie

Klarheit zugewiesen, „potenziert“ wurde den Kategorien Lautstärke und Ereignisfülle zugewiesen. Die Adjektive „kompensierend“, „rasant“, „schnell“, „verkrampt“ und „zäh“ wurden aus der Analyse ausgeschlossen, da sie sich nicht sinnvoll zuordnen ließen. Der Ausschluss der Attribute erfolgte im Konsens der drei Beurteilenden.

Ebenfalls nicht trennscharf ließen sich Beschreibungen, die Emotionen betreffen, abbilden. Hierbei war es nicht möglich, Emotionsattribute entweder den Basisemotionen oder den Dimensionen Valenz, Aktivierung und Dominanz zuzuordnen. Da sich sämtliche in den Basisemotionen enthaltenen Kategorien in das Koordinatensystem des dimensional affektmodells einordnen lassen, wurde dieses für die Klassifizierung genutzt (z.B. LICHTENSTEIN et al. 2008).

Die Häufigkeit der Nennung eines Attributes aus der jeweiligen Kategorie ist in Tabelle 3.4 dargestellt.

Kategorie	Anzahl Nennungen insgesamt	Anteil Gesamtnennungen [%]
Valenz	945	23.37
Geräuschcharakter	696	17.21
Lautstärke	562	13.9
Aktivierung	444	10.98
Zeitstruktur	298	7.37
Vordergrund/Hintergrund	290	7.17
Dominanz	205	5.07
Raum	181	4.48
Vertrautheit	134	3.31
Ereignisfülle	134	3.31
Audio-visuell	117	2.89
Klarheit	41	1.01

Tabelle 3.4 Anteil der Attributnennungen in den Kategorien

#### 3.5.2.4 Kategorisierungsergebnisse

Im Folgenden wird das Zuordnungsergebnis der drei Beurteilenden für die 12 verbleibenden Kategorien vorgestellt. Für die Visualisierung wurden sogenannte Wortwolken verwendet. Jede Wortwolke enthält die 15 häufigsten Attribute, die der jeweiligen Kategorie zugeordnet wurden. Die Größe des jeweiligen Attributes entspricht annäherungsweise der relativen Häufigkeit innerhalb der Kategorie: Je größer das Attribut dargestellt ist, umso häufiger wurde es durch die Probanden genannt.

Ein Großteil der genannten Attribute entstammt den Kategorien Valenz, Geräuschcharakter und Lautstärke. Der Anteil aller genannten Worte innerhalb dieser drei Kategorien lag bei 54.48 %.

Bild 3.8 zeigt in drei Wortwolken die 15 Attribute, die in diesen Kategorien jeweils am häufigsten genannt wurden.



Bild 3.8 Häufigste Attribute aus den Kategorien Valenz (oben), Geräuschcharakter (links) und Lautstärke (rechts)

Das Attribut „laut“ der Kategorie Lautstärke wurde mit 382 Nennungen insgesamt am häufigsten genannt. Aus der Kategorie Valenz waren die Worte „angenehm“ (220 Nennungen) und „unangenehm“ (160 Nennungen) die häufigsten Begriffe. Auch die Attribute „störend“ (89 Nennungen) und „nervig“ (69 Nennungen) traten sehr häufig auf. Attribute der Kategorie Valenz wurden insgesamt in 23.37 % aller Fälle genannt.

Aus der Kategorie Geräuschcharakter wurden die Begriffe „rauschend“ (87 Nennungen), „gedämpft“ (51 Nennungen) und „scharf“ (43 Nennungen) am häufigsten genannt. Der Anteil aller Nennungen aus der Kategorie Geräuschcharakter betrug 17.21 %.

Die Kategorie Geräuschcharakter fungierte bei der Clusterung der gesammelten Begriffe als Sammelbehälter für Hörphänomene, die unmittelbar mit dem auditiven Eindruck zusammenhängen, der von spezifischen akustischen Eigenschaften ausgelöst wird. Hier erscheint eine weitere Unterteilung in Subkategorien angemessen, um die Vielfalt an Attributen weiter auf semantische Einheiten herunterzubrechen.

Insgesamt fällt auf, dass ca. die Hälfte aller der Kategorie Geräuschcharakter zugeordneten Begriffe mit dem spektralen Schwerpunkt bzw. mit der *Klangfarbe* zusammenhängen. Hier werden häufig Begriffe, wie „scharf“, „hell“, „dumpf“, „tief“, „hoch“, „schrill“ oder „hochfrequent“ genannt. In der Psychoakustik wird für die auditive Empfindung, die sich unmittelbar auf den spektralen Schwerpunkt eines Geräusches ohne Berücksichtigung der spektralen Feinstruktur bezieht, der Parameter *Schärfe* (DIN 45692:2009-04) vorgeschlagen. Ferner werden vielfach Begriffe verwendet, die sich auf die wahrgenommene *Bandbreite* (z. B. „schmalbandig“, „breitbandig“) oder auf typische *Störgeräusche* („dröhnend“, „brummend“, „quietschend“, „klappernd“, „knatternd“, „polternd“, „ratternd“, „wummernd“) beziehen (vgl. FVV 2001). Insgesamt entfallen rund 20 % aller Begriffe aus der Kategorie Geräuschcharakter auf Störgeräuschphänomene. Zusätzlich wurden sporadisch Begriffe genannt, die weiteren auditiven Basisempfindungsgrößen zuzuordnen sind, wie *Tonhaltigkeit*, *Rauigkeit* und



Der Kategorie Klarheit wurden mit insgesamt 41 Nennungen die wenigsten aller genannten Attribute zugewiesen. Attribute dieser Kategorie waren z. B. „deutlich“ (13 Nennungen) und „unmittelbar“ (10 Nennungen). Bild 3.11 zeigt die 15 am häufigsten genannten Attribute der Kategorien Ereignisfülle, audio-visuell und Klarheit.



Bild 3.10 Häufigste Attribute aus den Kategorien Zeitstruktur (o. links), Dominanz (o. rechts), Raum (u. links) und Vertrautheit (u. rechts)



Bild 3.11 Häufigste Attribute aus den Kategorien Ereignisfülle (o. links), audio-visuell (o. rechts) und Klarheit (u. mittig)

Einige der genannten Attribute bildeten bereits Gegensatzpaare, wie z. B. „angenehm“ und „unangenehm“ der Kategorie Valenz, „hoch“ und „tief“ der Kategorie Geräuschcharakter oder „ruhig“ und „unruhig“ der Kategorie Aktivierung. Bei anderen Kategorien erschien die Bildung eines Gegenpols jedoch erschwert, wie für „mittellaut“ der Kategorie Lautstärke, „wellenförmig“ der Kategorie Zeitstruktur oder auch „scharf“ aus der Sammelkategorie Geräuschcharakter. Hier stellte sich die Frage, ob die Skalen des zu entwickelnden Fragebogens zwingend bipolar zu gestalten sind oder ob Skalen für einige wichtige Attribute (z. B. für Unterkategorien des Geräuschcharakters) auch unipolar eingesetzt werden könnten, wie beispielsweise in der ISO/TS 15666.

Zudem gab es in manchen Kategorien eine Vielzahl semantisch sehr ähnlicher Attribute, wie „großstädtisch“, „städtisch“ und „stadtgefühlig“ der Kategorie audio-visuell. Hier mussten Erwägungen der Verständlichkeit solcher Attribute sowie der Repräsentativität für ihre jeweilige Kategorie einbezogen werden. Die schlussendliche Auswahl der Fragebogenitems, die sich sowohl an der Häufigkeit der Nennungen als auch an inhaltlichen und methodischen Kriterien orientierte, erfolgte diskursiv durch die Forschungspartner. Dabei wurden 59 unipolare Items ausgewählt, die im folgenden Kapitel in Tabelle 4.1. aufgeführt sind.

## 4 Studie zur Modellbildung

Ziel der zweiten Teilstudie im Projekt war es zum einen, die 59 ausgewählten Beschreibungsattribute methodisch zu erproben und ihre Anzahl bei möglichst gleichbleibender Aussagekraft zu reduzieren. Zum anderen sollte exploriert werden, welche Zusammenhänge zwischen diesen Attributen und psychoakustischen Parametern bestehen, und ob sich letztere damit zur Bewertung von Lärmsituationen und zur verbesserten Vorhersage der Wirksamkeit von Lärmschutzmaßnahmen eignen könnten. Die Studie wurde erneut im Mixed-Reality-Labor durchgeführt, in welchem den Versuchspersonen Straßenverkehrsszenen akustisch präsentiert wurden. Die Versuchspersonen hatten die Aufgabe, ihren Höreindruck anhand der 59 Attribute zu bewerten.

In den folgenden Kapiteln wird die Studie im Detail beschrieben, beginnend mit dem Versuchsmaterial (Kapitel 4.1), dem Versuchsdesign (4.2), der Durchführung (4.3), der Stichprobe (4.4), sowie den Ergebnissen (Kapitel 4.5). Kapitel 4 schließt mit der Exploration von psychoakustischen Prädiktionsmodellen auf Basis von Audioinhaltsanalysen (Kapitel 4.6).

### 4.1 Versuchsmaterial

#### 4.1.1 Technisches Set-Up: Aufnahmeaufbau

Für diesen Teil des Forschungsvorhabens wurde ein Auszug des Audiomaterials genutzt, das für die erste Teilstudie angefertigt worden war und im Kapitel 3 ausführlich erläutert wurde. Die Auswahl und Bearbeitung der Stimuli werden im folgenden Abschnitt beschrieben. Im Gegensatz zur ersten Teilstudie wurden die Straßenverkehrsszenen in Teilstudie 2 ausschließlich akustisch dargeboten.

Ziel war die Wiedergabe der Straßenverkehrsszenen in Ambisonics dritter Ordnung. Hierfür war es notwendig, die mit dem 19-Kapselmikrofon aufgezeichneten Audioaufnahmen (vgl. Kap. 3.1.2) mit einer Converter-Software in das B-Format (16-Kanal-Standard) zu überführen. Die Signale wurden dann mittels eines geeigneten Decoders auf eine Vielzahl von Lautsprechern verteilt, um an einer spezifischen Hörposition ein 3D-Schallfeld zu erzeugen.

#### 4.1.2 Auswahl der Stimuli

Bei der Auswahl der Aufnahmeorte wurden bereits Faktoren berücksichtigt, die das Klangbild der Szenen beeinflussen könnten. Charakterisierend waren vor allem Verkehrsmenge, Verkehrsart (PWK, LKW, Motorrad), Fahrbahnoberfläche, Immissionspunkt, erlaubte Höchstgeschwindigkeit und die Straßenführung. Aufgrund der resultierenden Diversität der Audioinhalte konnten nun Szenen erstellt werden, die sich untereinander hinreichend unterschieden.

Bei der Auswahl der Straßenverkehrsszenen für Teilstudie 2 wurde darauf geachtet, dass jedes der o. g. Unterscheidungsmerkmale in mindestens zwei Szenen repräsentiert war. Zusätzlich wurden am Aufnahmeort gemessene physikalische Parameter, wie der Schalldruckpegel, bei der Szenenauswahl berücksichtigt.

Insgesamt wurden 32 Szenen vorbereitet, die sich in verschiedenen Aspekten des Klangbilds sowie des Lautstärkepegels (min. 58 dB(A) – max. 79 dB(A)) unterschieden.

Die Dauer jeder Szene wurde auf 30 Sekunden gekürzt, um einerseits zu hohe Varianzen innerhalb einer jeweiligen Szene zu vermeiden, den Teilnehmenden andererseits aber auch genügend Zeit zu geben, das Klangbild wirken zu lassen.

#### 4.1.3 Wiedergabe der Stimuli

Der Hörversuch fand wieder in einem Higher Order Ambisonics (HOA) Array statt, in dem an einer spezifischen Hörposition 3D-Schallfelder erzeugt werden können, die einer Auflösung von Ambisonics-Aufnahmen der dritten Ordnung entsprechen. Die frequenzabhängigen Schalldruckpegel der dekodierten Aufnahmen am Ort der Wiedergabe wurden mit denen am Ort der Aufnahme verglichen und notwendige Anpassungen vorgenommen (vgl. Kapitel 3.1.4).

Da in diesem Versuch Daten von bis zu vier Personen gleichzeitig erhoben werden sollten, wurden Stühle rund um den besten Hörort äquidistant zueinander positioniert (Bild 4.1). Dabei wurde darauf geachtet, dass sich die Ohren der Versuchspersonen möglichst auf Lautsprecherhöhe befanden.

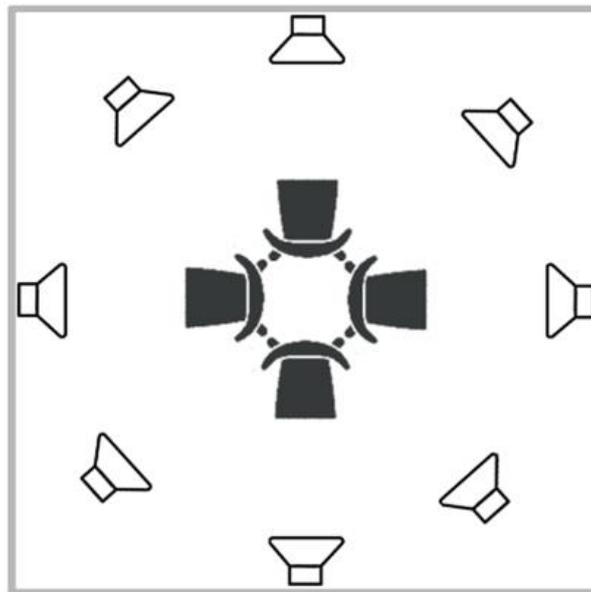


Bild 4.1 Schematische Darstellung der Hörsituation. Vier Sitzplätze äquidistant um 90° verschoben Rund um den Sweet-Spot des Übertragungssystems

#### 4.1.4 Vortest

Die Auswahl der Szenen und die Erprobung der für den Versuch erstellten Bewertungsmaske erfolgte durch einen Vortest mit  $N = 4$  Personen (2 weiblich, 2 männlich). Dabei wurde auch die Versuchsdauer anhand der benötigten Zeit zur Bewertung aller Items pro präsentierter Straßenverkehrsszene ermittelt. Die Vortests ergaben außerdem, dass die zunächst auf der linken Seite vom Schieberegler präsentierten Itembezeichnungen bei der Interpretation und Bewertung zu Fehlern führten. Die Items waren durch die linksseitige Ausrichtung der Itemausprägung 0 des Schiebereglers am nächsten, was in vielen Fällen dazu führte, dass dadurch bei einer starken Itemausprägung (numerischer Wert 100) die schwächste Bewertung (numerischer Wert 0) gegeben wurde. Daher wurde für die Studie eine Anordnung der Items auf der rechten Seite des Schiebereglers gewählt (s. Bild 4.2).

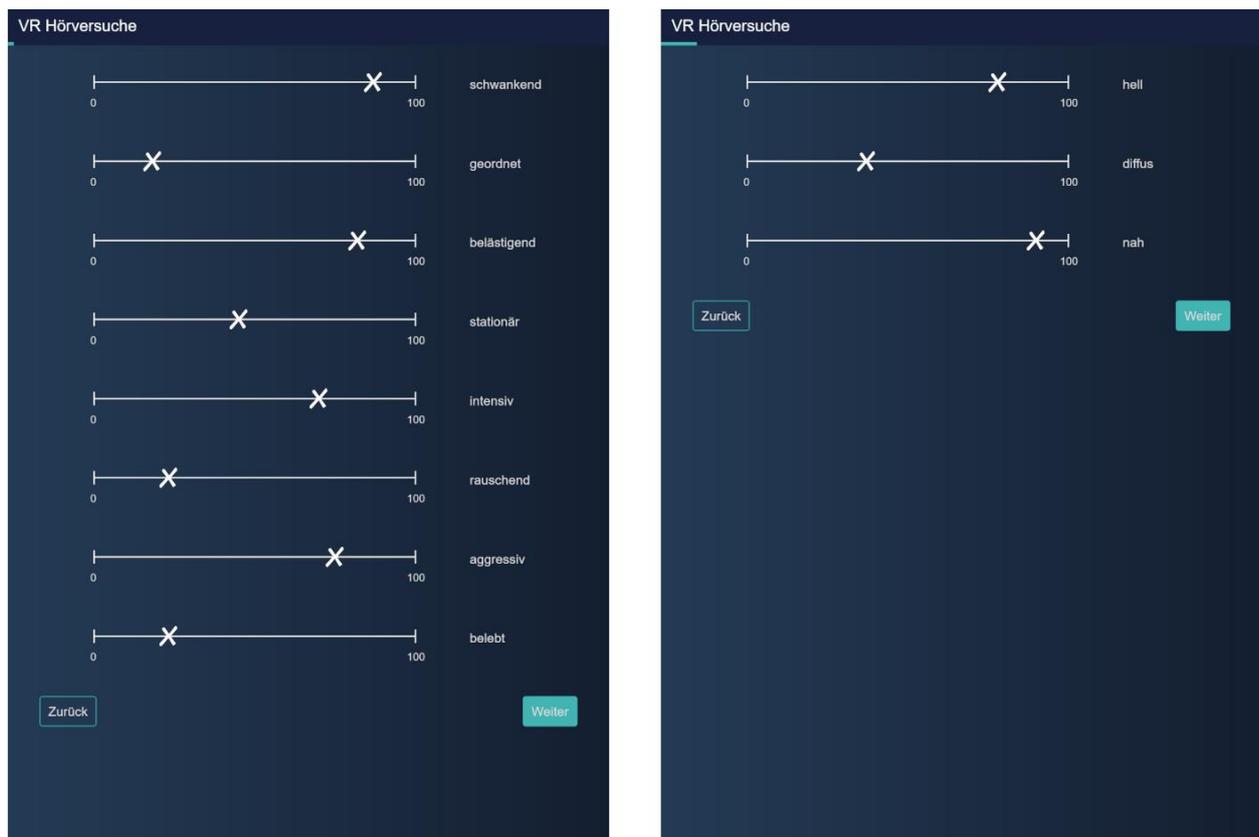


Bild 4.2 Finale Bewertungsansicht: Anordnung der Items auf der rechten Seite des Schiebereglers

## 4.2 Versuchsdesign

Als unabhängige Variable fungierten die zuvor ausgewählten Verkehrsszenen (vgl. Kap. 4.1.2), die den Versuchspersonen in randomisierter Reihenfolge präsentiert wurden. Zur Erfassung der Item-Bewertung wurde mit Hilfe von Tablets (4 x Surface Pro mit Win 10 Pro x64, Firefox) ein webbasiertes Bewertungsformular mit allen Items zur Bewertung der Attribute angezeigt (s. Bild 4.2)

Die Bewertung erfolgte auf einer quasi stufenlosen Skala mit einem Wertebereich von 0-100. Die Items entstammten gemäß der zuvor durchgeführten Teilstudie verschiedenen emotionsbezogenen Kategorien wie VALENZ, AKTIVIERUNG und DOMINANZ und spezifischen geräusch- und ereignisbezogenen Kategorien wie beispielsweise LAUTSTÄRKE, EREIGNISFÜLLE oder VERTRAUTHEIT. Weiterhin wurden Items aus Kategorien der Hörforschung wie RAUM, ZEITSTRUKTUR und GERÄUSCHCHARAKTER genutzt. Die Items der Kategorie GERÄUSCHCHARAKTER wurden in die Unterkategorien „Klangfarbe“, „Störgeräusch“, „Psychoakustische Eigenschaft“ und „Bandbreite“ differenziert (vgl. Kapitel 3.5.2.4). Tabelle 4.1 zeigt eine Auflistung aller 59 genutzten Items mit ihrer Einordnung in ihre jeweilige Kategorie.

<b>Kategorie</b>	<b>Item</b>	
AKTIVIERUNG	ablenkend, aktivierend, alarmierend, belebt, beruhigend, monoton, ruhig	
VALENZ	angenehm, anstrengend, belästigend, erholsam, lästig, störend	
DOMINANZ	aggressiv, aufdringlich, bedrohlich, dominant	
EREIGNISFÜLLE	chaotisch, detailreich, ereignisreich, hektisch, lebhaft	
ZEITSTRUKTUR	abnehmend, aufsteigend, durchgehend, dynamisch, fließend, geordnet, gleichmäßig, rhythmisch	
RAUM	direkt, diffus, stationär, umhüllend	
VORDERGRUND/ HINTERGRUND	auffällig, nah, verschwommen, vordergründig	
VERTRAUTHEIT	vertraut	
LAUTSTÄRKE	geräuschvoll, intensiv, lärmend, laut	
GERÄUSCH- CHARAKTER	Klangfarbe	dumpf, dünn, hell, scharf, tief, zischend
	Störgeräusch	brummend, dröhnend, heulend, pfeifend, quietschend, wummernd
	Psychoakustische Eigenschaft	rau, schwankend, tonhaltig
	Bandbreite	rauschend

Tabelle 4.1 Kategorisierung aller genutzten Items

Die demografischen Daten wurden analog zu Vorgängerstudie über ein separates Formular in Paper-Pencil-Form erfasst. Zur Erfassung der individuellen Lärmempfindlichkeit diente erneut der Kurzfragebogen LEF-K von ZIMMER und ELLERMEIER (1998).

Für jeden der 40 geplanten Versuchsblöcke wurde im Vorfeld eine zufällige Stichprobe von je 15 Stimuli aus der Gesamtheit der 32 Stimuli (vgl. Kap. 4.1.2) gezogen, um durch Messwiederholungen die Anzahl der benötigten Versuchspersonen zu reduzieren und dabei gleichzeitig die Versuchsdauer pro Person zumutbar zu halten. Es wurde darauf geachtet, dass jede Szene von der gleichen Anzahl an Versuchspersonen bewertet wurde. Praktisch war das nicht ohne weiteres umsetzbar, da die Versuchspersonen sich nach terminlichen Vorlieben selbst den Blöcken zuordnen konnten und es dadurch zu ungleichen Gruppengrößen je Block kam. Dies schlug sich nach ca. 2/3 des Studienzeitraums in einer Unausgewogenheit in der Verteilung der präsentierten Stimuli nieder. Durch eine manuelle Anpassung der Szenenauswahl wurde dem so

entgegengewirkt, dass (unter Vermeidung von Doppelbewertungen) schließlich sämtliche Szenen annähernd gleich häufig bewertet wurden (vgl. Kap. 4.5.1).

### 4.3 Versuchsdurchführung

Analog zur ersten Teilstudie oblag die Steuerung der Stimuluspräsentation sowie die Betreuung des Laborequipments der Technikleitung, die Gesprächsführung erfolgte durch die Versuchsleitung. Diese Trennung stellte erneut sicher, dass sowohl die Kommunikation mit der Versuchsperson als auch die technische Prozedur stets kontrolliert und über alle Durchläufe gleichbleibend ablief.

Nach der Aufklärung und Dokumentation der zur Einhaltung der Hygienemaßnahmen notwendigen Informationen (Maskenpflicht, Hygienemaßnahmen bei der Nutzung der Tablets) wurden die Teilnehmenden verbal zum Versuchsablauf und zu ihrer Aufgabe instruiert. Die Versuchsleiter waren im Vorfeld geschult worden, die standardisierten Instruktionen lagen zudem schriftlich vor.

Nach dem Ausfüllen des demografischen Fragebogens wurde als Teil der Instruktion eine Liste ausgegeben, die in alphabetischer Reihenfolge alle 59 zur Bewertung genutzten Items enthielt (vgl. Tabelle 4.1, Spalte „Item“). Die Versuchspersonen hatten damit vor dem Versuch die Möglichkeit, die Items kennenzulernen und Fragen zu stellen. So wurde sichergestellt, dass den Versuchspersonen die Bedeutungen der Items verständlich war.

Nachdem die Teilnehmenden platziert worden waren, folgte ein Training mit einer Straßenverkehrsszene, die während der Vorversuche aufgrund ihrer Eigenschaften ausgewählt wurde: Sie war in ihrem Geräuschcharakter weitgehend homogen und nach Hörerleben weder zu laut noch zu leise.

Nach einem ersten Anhören wurden die Versuchspersonen gebeten, die Testszene anhand der 59 Items zu bewerten. Währenddessen wurde die Szene mehrfach wiederholt abgespielt. Nach dem Trainingsdurchlauf konnten Fragen gestellt werden, bevor der eigentliche Versuch begann. Jede Versuchsperson hatte nun 15 zuvor zufällig ausgewählte Verkehrsszenen zu bewerten, wobei nach 7 eine kurze Pause erfolgte. Abschließend wurden die Teilnehmenden gebeten, den Fragebogen zur Lärmempfindlichkeit auszufüllen. Ein Versuchsdurchgang dauerte circa 90 Minuten. In Bild 4.3 ist der Versuchsablauf grafisch zusammengefasst.



Bild 4.3 Grafische Darstellung des Versuchsablaufes

## 4.4 Stichprobe

An den Versuchen nahmen  $N = 78$  Personen ( $n = 30$  weiblich,  $n = 48$  männlich) im Alter von 21 bis 85 Jahren ( $M = 39,5$ ,  $SD = 19,4$ ) teil.

Die individuelle Lärmempfindlichkeit der Personen wurde über den Kurzfragebogen zur Lärmempfindlichkeit (LEF-K) von ZIMMER und ELLERMEIER (1998) erhoben. Für die Versuchspersonen wurden LEF-K-Gesamtwerte zwischen 4 und 23 Punkten ( $M = 13,95$ ,  $SD = 4,25$ ) ermittelt, was dem zu erwartenden durchschnittlichen Lärmempfindlichkeitswert entspricht. Bild 4.4 zeigt die Verteilung der LEF-K Scores über die Stichprobe. Je höher der LEF-K Score dabei ausfiel, umso lärmempfindlicher bewerteten sich die Personen. Die Verteilung von Lärmempfindlichkeitswerten innerhalb der Stichprobe entspricht dabei üblichen Verteilungen (vgl. HEINONEN-GUZEJEV 2009). Der Großteil der Versuchspersonen (88,5 %) verfügte nach eigenen Angaben nicht über Akustikfachwissen.

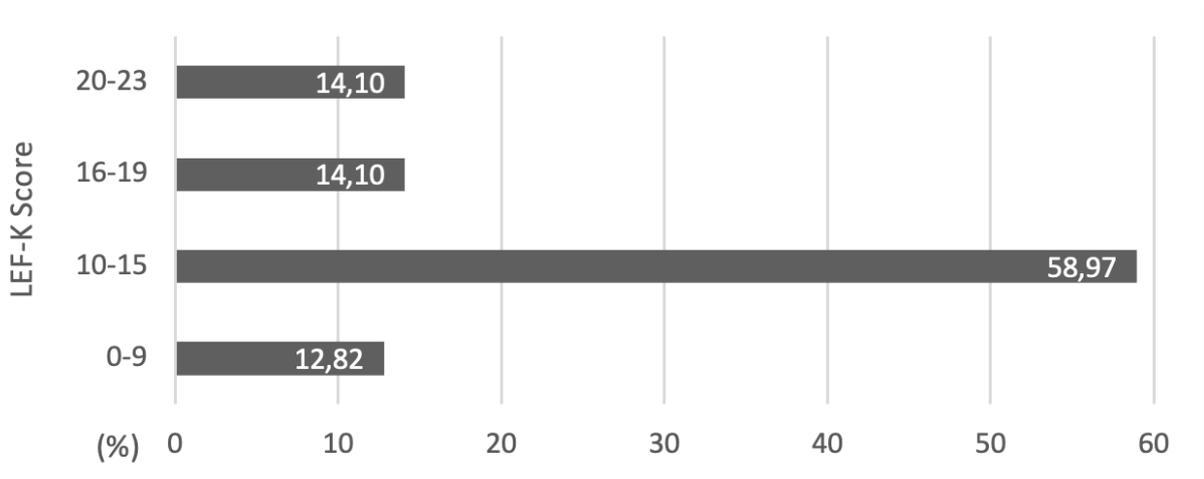


Bild 4.4 Prozentuale Verteilung der LEF-K-Gesamtwerte für die Stichprobe (N=78)

## 4.5 Ergebnisse

### 4.5.1 Datenaufbereitung

Von den untersuchten 78 Personen mussten zwei Datensätze aufgrund von starken Unregelmäßigkeiten bei der Durchführung verworfen werden. Somit ergab sich eine finale Stichprobe von  $N = 76$  die sich auf 31 Versuchsblöcke verteilte. Die Häufigkeiten der präsentierten Stimuli waren trotz der erwähnten praktischen Probleme dank ergriffener Gegenmaßnahmen (vgl. Kap. 4.2) annähernd gleichmäßig und ohne statistisch signifikante Systematik über sämtliche der insgesamt 1140 Trials verteilt ( $\chi^2 = 5974$ ,  $p < 0,001$ ). Die Häufigkeitsverteilung der Stimuli ist in Bild 4.5 dargestellt.

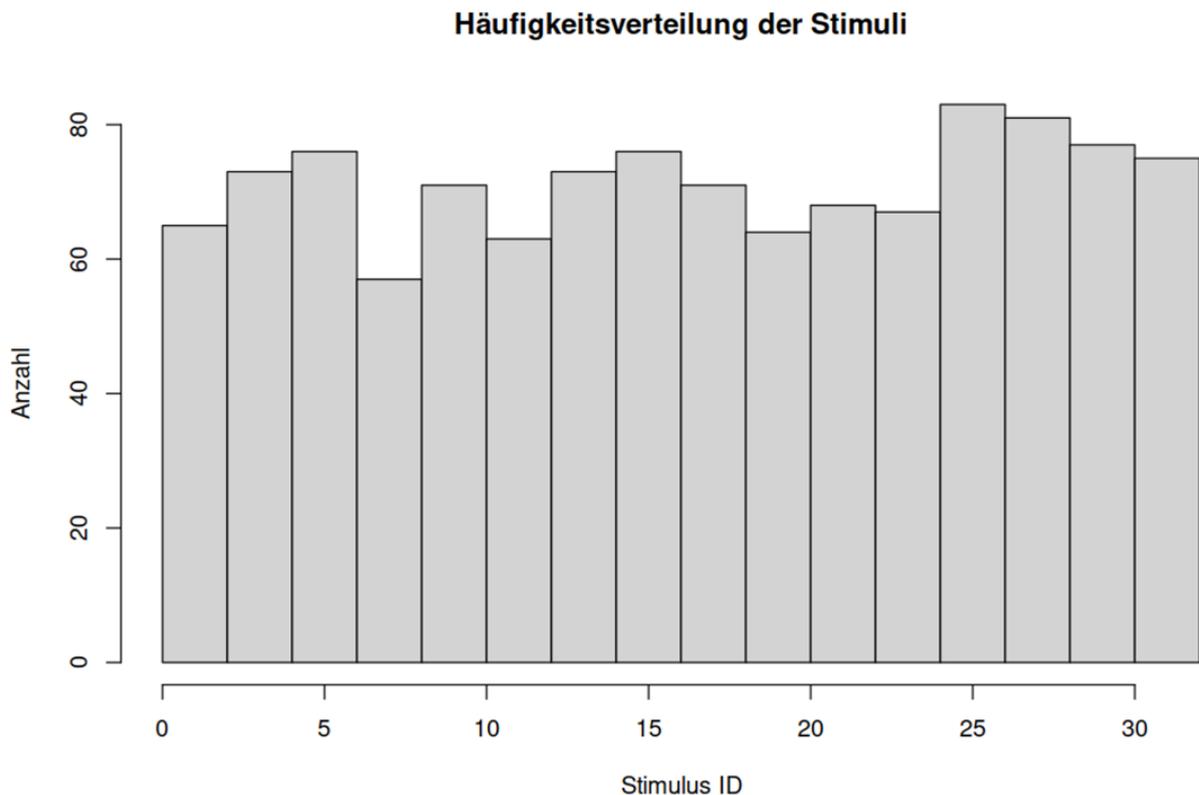


Bild 4.5 Häufigkeitsverteilung der Stimuli

#### 4.5.2 Kurzbeschreibung der Analysemethode

Sämtliche Analyseschritte wurden in R 4.2.1 (IHAKA & GENTLEMAN, 1996) unter Zuhilfenahme der Bibliotheken psych (REVELLE, 2018), lavaan (ROSSEEL, 2012) und semTools (JORGENSEN et al., 2016) in der integrierten Umgebung R-Studio 2022.02.3 durchgeführt.

Die Analyse, deren Ziel eine systematische Reduzierung der Itemanzahl im Fragebogen war, lässt sich grob in einen strukturentdeckenden Teil und einen darauffolgenden hypothesenprüfenden Teil gliedern. Der Zweck des strukturentdeckenden Teils bestand darin, anhand der Stichprobe Hypothesen bezüglich der Ähnlichkeiten und Unterschiede der 59 Items im Fragebogen aufzustellen, um diese dann im zweiten Teil inferenzstatistisch, d.h. auf ihren Wahrheitsgehalt in Bezug auf eine angenommene Grundgesamtheit hin zu überprüfen.

#### 4.5.3 Strukturentdeckender Teil

Dem strukturentdeckenden Teil gehen zwei Annahmen voraus: 1.) Die 59 Items des Fragebogens sind geeignet, um eine Zielvariable (in diesem Fall das Erleben von Straßenverkehrsgeräuschen) in Gänze zu erfassen. 2.) Die im Fragebogen enthaltenen Items sind nicht völlig unterschiedlich, sondern ähneln sich zum Teil. Wenn sich eine Menge von Items stark ähnelt, d.h. wenn sie bei einem identischen Stimulus ähnliche Antworten produzieren, kann daher davon ausgegangen werden, dass diesen Items ein gemeinsames Merkmal der Zielvariable zugrunde liegt (je nach Kontext „latente Variable“ bzw. „Dimension“ bzw. „Faktor“ genannt). Sind all diese latenten Variablen bekannt, können zum einen genauere inhaltliche Aussagen über die Zielvariable gemacht und zum

anderen ökonomischere und präzisere Erhebungsinstrumente entwickelt werden, da nur diese Items abgefragt werden müssen, die in hohem Anteil Auskunft über die Ausprägung der latenten Variablen geben.

Um die Zahl der zugrundeliegenden Dimensionen im Datensatz der erhobenen Stichprobe bestimmen zu können, wurde zunächst eine initiale Explorative Faktorenanalyse (EFA) durchgeführt. Das Verfahren der EFA errechnet anhand der Kovarianzmatrix aller Items deren Zugehörigkeiten zu jedem einzelnen aus einer angenommenen Anzahl von Faktoren. Zunächst wurde keine Annahme über eine Anzahl von Faktoren getroffen, d.h. theoretisch hätte jedes Item einen einzelnen Faktor darstellen können, die initiale Anzahl der Faktoren betrug somit 59. Da die EFA mathematisch eine Projektion eines  $p$ -dimensionalen Vektorraums ( $p$  = Items) auf einen  $q$ -dimensionalen Unterraum ( $q$  = Faktoren) darstellt, ergibt sich für jeden Faktor ein Eigenwert, der angibt, wie viel der in den Daten enthaltenen Varianz durch den jeweiligen Faktor erklärt werden kann. Sämtliche Eigenwerte der initialen EFA wurden in einem Screeplot (s. Bild 4.6) abgetragen, um dann anhand des Scree-Kriteriums (sichtbare Knickstelle im Plot der Eigenwerte) eine geeignete Faktorenzahl zu bestimmen. Dies ergab zunächst mögliche Lösungen mit 5, 7 bzw. 8 Faktoren, die auch hinsichtlich der Prüfung auf ein weiteres Kriterium (Horns Parallelanalyse, HORN 1965, rote Linie im Screeplot) bestand hatten.

### Screeplot der Parallelanalyse

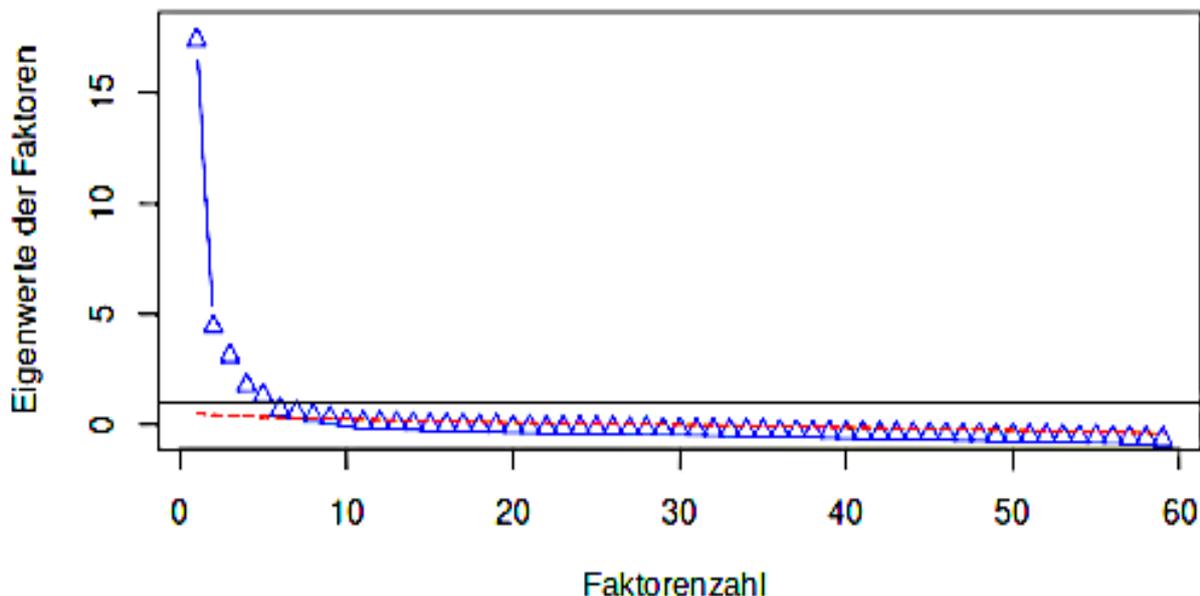


Bild 4.6 Parallel Analysis Scree Plots

Im nächsten Schritt wurde daher für jede der drei Annahmen, 5, 7 und 8 mögliche Faktoren, je eine weitere EFA durchgeführt, wobei zur Faktorenrotation das schiefe, d.h. keine Unabhängigkeit der Faktoren implizierende oblimin Verfahren und zur Parameterschätzung der gegen Verletzung der Normalität und Unabhängigkeit der Daten robuste Maximum-Likelihood-Schätzer gewählt wurde. Neben der Anpassungsgüte, die für alle drei Lösungen gut ausfiel (Tucker-Lewis Index 5-Faktor = 0,864, 7-Faktor = 0,91, 8-Faktor = 0,933), wurden für die weiteren Schritte die drei resultierenden

Ladungsmatrizen genauer betrachtet, in denen als Ladungen bezeichnete Wert zwischen -1 und 1 Auskunft über die Stärke und Richtung der Zugehörigkeit sämtlicher Items zu sämtlichen Faktoren gaben. Augenmerk der Begutachtung wurde einerseits auf unerwünschte Kreuzladungen (Ladung > |0,5| auf mehr als einen Faktor) und ausreichende Itemzahlen pro Faktor (mindestens 3 Items mit Ladung > |0,3| auf einem Faktor) gelegt, da diese Kennwerte Auskunft über die Trennschärfe und Aussagekraft des Modells geben. Andererseits wurden die Ladungsmatrizen von Fachexperten des Projektteams auf die inhaltliche Konsistenz und Deutbarkeit der Faktoren bzw. der zugehörigen Items untersucht. Während die 8-Faktoren-Lösung einen sowohl inhaltlich schwer interpretierbaren wie auch schwach beladenden letzten Faktor enthielt, zeigte die 5-Faktoren-Lösung zwar durchweg hohe Ladungsindizes, ließ jedoch aus Expertensicht inhaltliche Trennschärfe vermissen. Die 7-Faktoren-Lösung bot sowohl eine gute Interpretierbarkeit als auch ausreichend hohe und trennscharfe Ladungsindizes, sie wurde daher als Kandidat für den weiteren Teil der Analyse ausgewählt. Die Ladungsmatrizen finden sich in Gänze in Anhang II.

#### 4.5.4 Hypothesenprüfender Teil

Ziel des zweiten Analyseteils war es, zu überprüfen, ob und wie gut sich die Varianz im Datensatz durch eine reduzierte Menge der Items, nämlich nur durch jene, die stark auf die jeweiligen Faktoren laden, erklären lässt. Dahinter verbergen sich zwei Hypothesen. Die erste Hypothese ist, dass ein im Vergleich zum originalen wesentlich sparsamerer Fragebogen das Zielmerkmal (Erleben von Straßenlärm) annähernd gleichwertig erfassen kann. Die zweite Hypothese ist implizit mit der ersten verbunden und besagt, dass die zuvor extrahierten Faktoren geeignet sind, um die (Ko)varianz in den Daten zu strukturieren und sie damit auch inhaltlich valide erklären zu können. Die im hypothesenprüfenden Teil angewendeten Verfahren waren die konfirmatorische Faktorenanalyse (CFA) und die Prüfung der Konstruktreliabilität (CR). Für die CFA wurden zunächst sämtliche Items mit zu geringen Ladungen (< |0,3|) und substantiellen Kreuzladungen (>|0,5| auf mehr als einem Faktor) entfernt und die verbleibenden Items jeweils einem Faktor zugeordnet, um ein erstes Messmodell zu erhalten. Dieses Messmodell wurde anschließend mit dem robusten Maximum-Likelihood-Schätzer (MLR) und unter der durch die Messwiederholung verletzten lokalen Unabhängigkeit der Daten notwendigen Korrektur des Standardfehlers (sandwich-estimator) auf die Daten der Stichprobe angepasst und der Comparative Fit Index (CFI) berechnet. Anschließend wurden auf Basis der Modification-Indizes einzelne Items aus dem Modell entfernt. Dieses Vorgehen wurde unter Berücksichtigung des CFI wiederholt, bis pro Faktor drei Items verblieben. Der CFI des finalen Modells lag bei einem sehr guten Wert von 0,951. In einem letzten Schritt wurde die Konstruktreliabilität nach RAYKOV (2001) als eine weniger fehleranfällige Alternative zum Cronbachschen Alpha berechnet, was für alle Faktoren exzellente Werte ergab (0,80, 0,80, 0,89, 0,79, 0,77, 0,81, 0,75). Die finale Faktorenstruktur und Itemauswahl für den Fragebogen zum Erleben von Straßenverkehrsgeräuschen ist in Tabelle 4.2 dargestellt, wobei die Nomenklatur als ein für weitere Abstimmungen offenes Arbeitsergebnis zu verstehen ist.

<b>Faktor</b>	<b>Item</b>	<b>Ladung (EFA)</b>	<b>Parameterschätzung (CFA)</b>
VALENZ	angenehm	0,853	1,000
	beruhigend	0,764	0,952
	erholsam	0,767	0,849
DYNAMIK	ereignisreich	0,708	1,000

Faktor	Item	Ladung (EFA)	Parameterschätzung (CFA)
RISKANZ	lebhaft	0,684	0,714
	detailreich	0,645	0,802
	bedrohlich	0,819	1,000
	alarmierend	0,804	0,970
SCHWERE	aggressiv	0,677	1,000
	brummend	0,828	1,000
	wummernd	0,742	1,068
SCHÄRFE	dumpf	0,649	0,669
	pfeifend	0,726	1,00
	quietschend	0,677	0,939
NÄHE	heulend	0,631	0,997
	direkt	0,525	1,000
	nah	0,513	0,996
KONSISTENZ	dominant	0,379	1,124
	gleichmäßig	0,664	1,000
	monoton	0,609	0,988
	fließend	0,586	0,496

Tabelle 4.2 Faktorenstruktur und Itemauswahl für den Fragebogen zum Erleben von Straßenlärm

#### 4.5.5 Bewertungsunterschiede zwischen Laien und Experten

Neun der am Versuch teilnehmenden Personen gaben an, in einem klaren fachlichen Bezug zum Thema ausgebildet oder tätig zu sein. Um zu untersuchen, ob und inwiefern sich diese Experten in ihren Wahrnehmungsurteilen von der weiteren Stichprobe unterschieden, und um somit Aussagen über die Allgemeingültigkeit der entwickelten Faktorenstruktur bzw. des Messmodells machen zu können, wurden die Mittelwertunterschiede zwischen Experten- und Laienbewertungen für jedes Item mittels t-Test und Effektstärkenberechnung auf statistische Signifikanz und Bedeutsamkeit geprüft. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 4.3. Dabei offenbarten sich mittlere bis starke ( $d > 0,5$ ), signifikante ( $p < 0,05$ ) Unterschiede für zwei Items (hell, scharf). Da beide Items nicht im finalen Messmodell enthalten sind, ist keine weitere Betrachtung notwendig. Ferner finden sich jedoch schwache ( $0,5 > d > 0,2$ ) signifikante Unterschiede für 23 Items, von denen neun Bestandteil des finalen Messmodells sind (pfeifend, wummernd, beruhigend, detailreich, heulend, angenehm, alarmierend, erholsam, quietschend). Dabei ist zu bemerken, dass 1.) sich sämtliche Items der Faktoren VALENZ und SCHÄRFE darunter finden und 2.) die Mittelwertunterschiede bei allen Items in die gleiche Richtung (Expertenwerte höher) ausfallen. Aufgrund der sehr kleinen Untergruppe der Stichprobe können bzw. sollten zu diesen Befunden keine statistischen Parameter geschätzt werden, die in der praktischen Anwendung des Fragebogens zum Tragen kommen könnten. Ein besonderes Augenmerk bei der Interpretation der betreffenden Faktoren scheint jedoch bis auf weiteres angebracht, insbesondere dann, wenn Populationen mit hohem Expertenanteil untersucht werden sollen.

Variable	MW Laien	MW Experten	p-Wert	Cohens-d
hell	35,57	57,18	0	0,811
scharf	36,52	51,16	0	0,509

<b>Variable</b>	<b>MW Laien</b>	<b>MW Experten</b>	<b>p-Wert</b>	<b>Cohens-d</b>
dünn	22,92	32,82	0	0,444
diffus	42,68	53,54	0	0,409
zischend	37,1	47,94	0	0,371
pfeifend	25,12	34,12	0	0,349
umhüllend	51,39	60,83	0	0,344
tonhaltig	47,72	37,5	0	0,341
vertraut	53,77	63,25	0	0,328
schwankend	43,78	52,39	0,001	0,304
rhythmisch	27,41	34,4	0,003	0,29
dynamisch	50,35	57,96	0,003	0,273
aktivierend	35,38	42,62	0,003	0,269
wummernd	42,07	50,13	0,001	0,268
verschwommen	38,88	45,79	0,002	0,258
beruhigend	20,48	26,41	0,004	0,256
detaillreich	47,94	55,04	0,004	0,255
stationär	37,16	44,11	0,005	0,248
heulend	25,2	31,33	0,01	0,236
angenehm	22,53	27,97	0,011	0,229
tief	40,66	46,62	0,008	0,222
alarmierend	32,06	37,95	0,025	0,208
erholsam	17,17	21,44	0,023	0,2
rau	42,18	47,64	0,023	0,2
quietschend	24,15	29,19	0,031	0,199
ereignisreich	48,55	53,99	0,028	0,189
auffällig	51,85	56,7	0,033	0,166

<b>Variable</b>	<b>MW Laien</b>	<b>MW Experten</b>	<b>p-Wert</b>	<b>Cohens-d</b>
chaotisch	41,18	45,86	0,046	0,164
belästigend	59,43	63,99	0,038	0,159
aggressiv	42,63	47,3	0,067	0,152
bedrohlich	37,03	41,49	0,091	0,147
aufsteigend	40,82	36,36	0,11	0,144
nah	63,8	60,13	0,142	0,136
ruhig	22,4	25,58	0,112	0,131
rauschend	62,86	66,14	0,118	0,13
brummend	48,12	51,63	0,138	0,121
monoton	41,71	45,31	0,178	0,118
dominant	53,42	56,73	0,166	0,114
geordnet	36,6	39,58	0,188	0,114
lebhaft	55,1	57,97	0,213	0,106
aufdringlich	55,6	58,39	0,227	0,095
ablenkend	53,43	55,93	0,288	0,087
geräuschvoll	66,07	64,23	0,4	0,072
dröhnend	51,62	49,7	0,418	0,067
anstrengend	58,63	60,5	0,427	0,065
vordergründig	59,08	57,4	0,497	0,06
gleichmäßig	46,93	48,67	0,476	0,059
lärmend	63,02	64,59	0,454	0,058
störend	61,81	63,36	0,488	0,054
lästig	60,83	62,01	0,607	0,041
belebt	58,52	59,22	0,759	0,026
fließend	58,51	59,16	0,765	0,025

Variable	MW Laien	MW Experten	p-Wert	Cohens-d
durchgehend	62,31	62,99	0,785	0,024
hektisch	45,27	44,68	0,817	0,02
direkt	55,05	55,39	0,888	0,012
intensiv	57,6	57,33	0,906	0,01
laut	63,03	62,85	0,932	0,007
abnehmend	26,58	26,41	0,942	0,006
dumpf	42,95	42,82	0,956	0,005

Tabelle 4.3 Mittelwertunterschiede zwischen Experten- und Laienbewertungen

## 4.6 Prädiktionsmodelle auf Basis von Audioinhaltsanalysen

Ein weites Ziel des zweiten Studienteils war es, das generierte Modell zur Beschreibung von Straßenverkehrsgeräuschen durch ein Set von psychoakustischen Parametern und weiteren, sogenannten Audio Features abzubilden (vgl. Kapitel 2.2). Dies diente dem Zweck, zukünftig Vorhersagen über die Qualität von Soundscapes mit Anteilen von Straßenverkehrsgeräuschen ohne die Beteiligung von Versuchspersonen vornehmen zu können. Durch die Vorhersage der ermittelten Dimensionen auf Basis von instrumentellen Größen ließe sich dann die Wirkung von Straßenverkehrsgeräuschen auch ohne Befragung mehrdimensional vorhersagen.

### 4.6.1 Extraktion von Audio Features

Dafür wurden die präsentierten Stimuli (vgl. Kapitel 4.1.2) einer statistisch-technischen Audioinhaltsanalyse unterzogen. Unter Anwendung diverser Toolboxes, eine Auswahl dieser ist Anhang I zu entnehmen, wurde ein Set an akustischen Indikatoren samt verschiedener statistischer Kennwerte generiert. Der dadurch entstandene Datensatz wurde mit akustischen Messungen am Ort des Hörversuches ergänzt (vgl. Tabelle 4.4). Die Kennwerte stellen zeitliche Veränderungen und statistische Eigenschaften einer Signalsequenz dar, die einerseits mit einem Schallpegelmessgerät erzeugt und andererseits durch die blockweise Berechnung von Audio Features ermittelt wurden. Neben dem arithmetischen Mittelwert (Mean), dem Median (P50) und dem Minimal- und Maximalwert (Min, Max) sind das 5. und das 95. Perzentil (P5, P95) angegeben. Anhand der Perzentilwerte kann eingeordnet werden, inwiefern gewisse Merkmalsausprägungen hintergründig (P5) oder vordergründig (P95) auftreten. Durch eine Differenz von Perzentilwerten kann eine dynamische Veränderung in einer Messreihe angegeben werden (ALETTA et al., 2016).

Weitere Informationen über die Beschaffenheit der Häufigkeitsverteilung einer Wertereihe geben die statistischen Momente Schiefe (Skewness) und die Wölbung (Kurtosis) an. Anhand der Schiefe können zum Beispiel spektrale Schwerpunkte interpretiert werden (LERCH, 2012). Befindet sich der Wert unter 0 handelt es sich um eine linkschiefe, über 0 um eine rechtsschiefe Verteilung und bei 0 ist die Verteilung

normalverteilt. Durch Angabe der Wölbung kann interpretiert werden, ob zum Beispiel einzelne Frequenzen im Spektrum herausstechen (LERCH, 2012).

	<b>Akustische Messdaten</b>	<b>Essentia</b>	<b>Timbral Models</b>	<b>Audio Toolbox</b>	<b>Sound- ecology</b>	<b>Kombinierte Größen</b>
Anzahl der Features	15	365	12	28	6	19
Aggregierte Größen	EQ, Max, Min, P95, P50, P5	Max, Min, Kurt, Stdev, Mean, P50	Mean, P10, P50, P95	Mean, P5, P50, P95	Mean	P95-P5

Tabelle 4.4 Sammlung gemessener und berechneter akustischer Indikatoren

Um ein statistisches Modell anhand des generierten Datensatzes für jeden Faktor zu erstellen, wurden Verfahren des maschinellen Lernens angewendet. Dabei wurden zunächst Algorithmen trainiert, um eine Auswahl von akustischen Indikatoren zu treffen (Feature Selektion), die schließlich in einer linearen Gleichung kombiniert wurden, damit anhand derer eine abhängiger Variable, mit der sich die perzeptiven Sachverhalte umschreiben ließen, berechnet werden konnten.

Herausforderungen bei der Konstruktion der Modelle entstanden durch die vergleichsweise geringe Größe des Datensatzes, die große Anzahl an Features und die gemischte Datenstruktur, da nicht jede Versuchsperson alle vorhandenen Stimuli bewertet hatte. Durch den Bewertungsumstand war es mit gängigen maschinellen Lernverfahren erschwert, das individuelle Antwortverhalten in Form eines gemischten Modelles zu behandeln. Daher wurden die Faktorenwerte in Abhängigkeit vom Stimulus über alle Versuchspersonen gemittelt.

Um trotz des dadurch zusätzlich verkleinerten Datensatzes robuste Regressionsmodelle zu erstellen, wurden verschachtelte Stratifizierungs- und Validierungsmethoden angewendet (vgl. VARBALAS et al. 2019). Stratifizierung bezeichnet im Kontext von maschinellem Lernen die Art und Weise, wie die Datenstruktur unterteilt wird, damit die darin enthaltenen Gesetzmäßigkeiten von der Maschine bzw. dem Algorithmus erlernt werden können. In der Regel wird dabei der Datensatz in zwei Teile getrennt, einem größeren (circa 3/4), um den Algorithmus zu trainieren und eine kleineren (circa 1/4), um ihn hinsichtlich seiner Vorhersagequalität zu testen. Wie die Datenpunkte zugeteilt werden, erfolgt in der Regel zufällig.

Das Problem bei kleinere Datensätzen ist dabei, dass die randomisierte Ziehung der Datenpunkte dazu führen kann, dass gewisse Werte in Test- oder Trainingsatz über- oder unterrepräsentiert sind. Das führt dazu, dass das Lernen und Schätzen der Prädiktionsqualität erschwert und verfälscht sein kann. Um trotz dessen maschinelles

Lernen von guter Qualität durchführen zu können, wird in VARBALAS et al. 2019 eine mehrfache Unterteilung der Datenstruktur auf zwei Ebenen vorgeschlagen. Demnach wird an verschiedenen Typen der Unterteilung der Daten wiederholt getestet und trainiert. Das Ergebnis ist eine Vielzahl an Modellen, in denen manchmal zu gut und manchmal zu schlecht gelernt und prädiziert wird. Die tatsächliche Prädiktionsqualität des finalen Gesamtmodells kann dann über eine Mittelwertbildung aller einzelnen Untermodelle angegeben werden.

Als maschinelle Lernverfahren zur Feature Selektion wurden zunächst zwei Verfahren (LASSO und Ridge) miteinander kombiniert (vgl. HASTIE, QIAN & TAY 2023). Die Verfahren haben unterschiedliche Vor- und Nachteile, die im Zuge einer Validierung gegeneinander abgewogen wurden. Es wurde schließlich LASSO als Standard-Verfahren ausgewählt. Ein Vorteil des Verfahrens LASSO ist, dass eine große Anzahl an Features hinsichtlich ihrer Vorhersagequalitäten für eine Ergebnisvariable überprüft werden kann. So konnten effektiv genau die Features ausgewählt werden, die für die bestmöglichen Modelle zur Vorhersage der perceptiven Faktoren notwendig waren.

#### 4.6.2 Lineare Vorhersagemodelle

Es konnte zu jedem Faktor ein Modell erstellt werden, wobei sich Vorhersagegüte und Komplexität teilweise stark unterschieden. Gütekriterien der Modelle sind das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  und das Abweichungsmaß  $RMSE$ , die als Mittelwerte über alle Modelle angegeben sind (s. Tabelle 4.5).

Einige Faktoren ließen sich bereits durch die Berechnung von zwei Prädiktoren vorhersagen, während andere bis zu sechs Prädiktoren beinhalten. Die Koeffizienten der einzelnen linearen Modellgleichungen wurden standardisiert und eignen sich somit für einen Direktvergleich.

Die höchste Prädiktionsqualität konnte bei dem Faktor DYNAMIK erzielt werden ( $R^2 = 0,54$ ,  $RMSE = 0,211$ ). Gleichzeitig handelt es sich dabei um das Modell mit der geringsten Komplexität. Lediglich zwei Prädiktoren sind zur hinreichenden Erklärung der Varianzen notwendig. In der Gleichung dominiert das 95. Perzentil des C-bewerteten Schalldruckpegels, gefolgt vom Feature zur Klangfarbe *Timbral Booming*, womit eher tieffrequente Anteile im Signal beschrieben werden.

Eine sehr gute Vorhersagequalität ( $R^2 = 0,44$ ,  $RMSE = 0,212$ ) weist auch das Modell zur RISIKANZ auf. In der Modellgleichung befinden sich das 5. Perzentil des A-bewerteten Schalldruckpegels, das MIR-Feature *Spectral Contrast*, womit beschrieben wird, ob ein Spektrum kontrastreich ist (kleinere Werte stehen für eher rauschhafte Signale) und der Medianwert der psychoakustischen Rauigkeit. Mit drei Indikatoren handelt es sich hierbei, um ein weniger komplexes Modell. Dass der Schalldruckpegel in dieser Gleichung eine dominante Rolle übernimmt, ist plausibel.

Ebenfalls eine gute Varianzerklärung liefert das Modell für den Faktor SCHÄRFE ( $R^2 = 0,41$ ,  $RMSE = 0,180$ ). Das simplere Modell beinhaltet zwei akustische Indikatoren: den A-bewerteten Schalldruckpegel im 5. Perzentil und den Median der psychoakustischen *Schärfe* nach der Berechnungsvorschrift von Bismarck. Die Zusammensetzung dieser Komponenten ist plausibel, da der spektrale Charakter dieses Faktors durch die Schärfe unterstrichen wird. Dass ein Zusammenhang mit der

Gesamtlautheit des Signals existiert, stimmt ebenfalls mit Erkenntnissen aus der Literatur überein (vgl. AURES 1985).

Das Modell zur KONSISTENZ beinhaltet zwei Prädiktoren und besitzt eine gute Vorhersagequalität ( $R^2 = 0,53$ ,  $RMSE = 0,207$ ). Das wichtigste Feature ist hierbei die Schiefe der spektralen Verteilung gemessen auf der ERB-Skala (*Erb Skew*). Der positive Koeffizient verdeutlicht hierbei eine rechtsschiefe Verteilung der Frequenzanteile, eine relative Dominanz tiefer Frequenzen trägt also zu einem maßgeblichen Anteil bei der Vorhersage des Faktors bei. Außerdem erhält die psychoakustische *Lautheit* in diesem Modell einen negativen Koeffizienten.

Für den Faktor VALENZ konnte ebenfalls ein gutes Modell erstellt werden ( $R^2 = 0,46$ ,  $RMSE = 0,157$ ). Es beinhaltet Energiegrößen, die sich auf das Gesamtsignal, sowie auf einzelne Frequenzbänder beziehen. Der wichtigste akustische Indikator war in diesem Fall die dynamische Veränderung des A-bewerteten Schalldruckpegels (LA95-5). Negative Anteile am Modell hat der C-bewertete Schalldruckpegel. Der dritte Indikator für VALENZ ist das Klangfarben-Feature *Warmth*. Dieses High-Level-Feature aus *Timbral Models* bringt die wahrgenommene Wärme des Gehörten zum Ausdruck.

Das Modell für den Faktor NÄHE, mit einer angemessenen Qualität von  $R^2 = 0,39$ ,  $RSME = 0,251$ , ist mit lediglich zwei akustischen Indikatoren wenig komplex. Darin enthalten ist das 7. Barkband (Mittenfrequenz von 700 Hz) und der A-bewertete Schalldruckpegel im 95. Perzentil. Innerhalb des 7. Barkbandes befinden sich häufig wesentliche Anteile von Geräuschen, die von motorisierten Fahrzeugen ausgehen.

Ein weniger gutes, jedoch befriedigendes Modell ( $R^2 = 0,23$ ,  $RSME = 0,222$ ), konnte zu dem Faktor SCHWERE erstellt werden. In der Regressionsgleichung erhält der Prädiktor *Schwankungsstärke* den höchsten positiven Koeffizienten, gefolgt vom tieffrequenten Indikator *LCLA*, der durch die Differenzbildung vom  $L_{Aeq}$  und  $L_{Ceq}$  berechnet wird (vgl. TA Lärm). Darüber hinaus ist das Feature *Spectral Centroid* (Frequenzschwerpunkt) mit geringer Ausprägung Teil des Modells. Zudem enthalten ist die *akustische Diversität* aus der Bioakustik, bei der einzelne Frequenzgruppen per Shannon-Index miteinander verglichen werden. Mit der schwächsten Ausprägung ist das dynamische Feature LA95-5 Teil der Regressionsgleichung. Die Komplexität des Modells ist mit fünf Indikatoren höher als bei anderen Faktoren.

Faktor	Modell	Prädiktoren	Koeffizient ( $\beta$ )	Avg. $R^2$	Avg. RMSE
SCHÄRFE	S2	LA5	0,42	0,41	0,180
		Sharp Bism %50	0,25		
DYNAMIK	DY2	LC95	0,65	0,54	0,211
		T. Booming	0,26		
KONSISTENZ	K2	Erb Skew	0,64	0,53	0,207
		Loud 532.1	-0,56		
VALENZ	V3	LA95-5	0,30	0,46	0,157
		LC5	-0,44		
		T.Warmth	0,07		
NÄHE	N2	Barkband 7	-0,44	0,39	0,251
		(mean)	0,41		
		LA95			
SCHWERE	D3	Fluc (mean)	0,34	0,22	0,222
		LCLA	0,32		
		Cetroid %10	-0,54		
		Acoustic Div	0,58		
		LA95-5	-0,17		
RISKANZ	R2	LA5	0,53	0,44	0,212
		Spec Contrast	-0,23		
		Roughness %50	-0,024		

Tabelle 4.5 Lineare Modelle generiert mit LASSO und Nested Resampling.

Hinweis: Angegeben sind Modellbezeichnung und Variablen, die zur Vorhersage eines Faktors in einer linearen Gleichung mit standardisierten Koeffizienten versehen werden.

In Tabelle 4.6 sind zusätzlich Modelle abgebildet, die für das Item „lästig“ aus dem Fragebogen erstellt wurden. Beide Modelle sind von guter Prädiktionsqualität mit Bestimmtheitswerten von  $R^2_{LL1} = 0,31$  und  $R^2_{LL2} = 0,57$ . Das mit lediglich zwei Items weniger komplexe Modell LL1 weist jedoch einen geringeren RMSE auf, was generell für eine robustere Vorhersagequalität spricht. Bei beiden Modellen ist die Lästigkeit abhängig von der Gesamtenergie des Signals (Schalldruckpegel) und von klangfarbentypischen Features. Modell LL1 ist eine Kombination aus C-bewerteten Schalldruckpegel und der psychoakustischen *Schärfe* und bestätigt die Annahme, dass das Lästigkeitsempfinden im Zusammenhang mit einem hohen spektralen Schwerpunkt steht (GUIDATI 2008). Modell LL2 besteht aus drei Indikatoren: der C-bewertete Schalldruckpegel im 5. Perzentil, der 3. Mel-frequency-cepstral-coefficients (MFCC) und der spektralen Schiefe. MFCCs sind Features, die hauptsächlich bei der Sprach- und Musikererkennung verwendet werden. Die unteren Koeffizienten (1-5) verdeutlichen tonale/harmonische Signalanteile. Aus einigen Studien geht hervor, dass sich mit MFCCs Wohlklang quantifizieren lässt (FAN, 2016; LUNDÉN, 2016). Im Fall von urbanen Soundscapes, die von Straßenverkehrsgläuschen dominiert werden, könnte das 3. MFCC die Präsenz von Geräuschen erfassen, die nicht dem motorisierten Verkehr zuzuordnen sind. Auffällig in LL2 ist, dass spektrale Features im Gegensatz zum Schalldruckpegel eine übergeordnete Rolle spielen.

<b>Faktor</b>	<b>Modell</b>	<b>Prädiktoren</b>	<b>Koeffizient (<math>\beta</math>)</b>	<b>Avg. <math>R^2</math></b>	<b>Avg. RMSE</b>
lästig	LL1	LC5	0,42	0,32	0,811
		Sharp DIN 45692 %50	0,22		
lästig	LL2	LC5	0,57	0,57	0,867
		MFCC 3	-0,38		
		Spectral Skew	-0,48		

Tabelle 4.6 Lineare Modelle für die Prädiktion des Items 'lästig' generiert mit LASSO und Nested Re-sampling

## 5 Studie zur Prüfung von Lärmschutzmaßnahmen

Im dritten Studienteil wurde zur Prüfung konventioneller und alternativer Lärmschutzmaßnahmen unter Berücksichtigung psychoakustischer Parameter ein Experiment mit augmentierten visuellen Straßenverkehrsszenen durchgeführt. Hierfür wurde eine Auswahl der bisher in den Vorgängerstudien verwendeten Stimuli inklusive auditiv und visuell nachträglich hinzugefügter Lärmschutzmaßnahmen umgesetzt. Es wurde geprüft, ob die Lärmschutzmaßnahmen Straßenbelag, Lärmschutzwand und Brunnengeräusche statistisch bedeutsam auf die in Studienteil 2 herausgearbeiteten Beschreibungsdimensionen, sowie den Eindruck der Lästigkeit wirken (Experimental-/Kontrollbedingung). Probanden bewerteten hierfür den erlebten Höreindruck im Within-Design mittels des in Studienteil 2 konsolidierten Befragungsinstrumentes sowie eines zusätzlichen Items zur Lästigkeit des Höreindrucks.

In den folgenden Kapiteln wird der dritte Studienteil im Detail beschrieben, beginnend mit dem Versuchsmaterial (Kapitel 5.1), dem Versuchsdesign (Kapitel 5.2), der Durchführung (Kapitel 5.3), der Stichprobe (Kapitel 5.4), sowie den Ergebnissen (Kapitel 5.5). Kapitel 5 schließt mit der Erprobung der psychoakustischen Prädiktionsmodelle (Kapitel 5.6).

### 5.1 Versuchsmaterial

#### 5.1.1 Auswahl der Stimuli

Grundlage des hier beschriebenen Studienteils waren Stimuli, bei welchen ausgewählte Schallschutzmaßnahmen virtuell integriert wurden, um deren Wirksamkeit mit Hilfe des entwickelten Fragebogens zu überprüfen. Hierfür wurden jeweils in zweifacher Ausführung Schallschutzwände, Brunnen und lärmreduzierende Fahrbahnbeläge eingefügt.

Aus dem Pool bestehend aus 32 audio-visuellen Szenen der Vorgängerstudien, mit einer Dauer von je 30 Sekunden, wurden 4 Samples ausgewählt, bei welchen sich zum einen visuelle sowie auditive Attribute ausreichend unterschieden und in denen sich zum anderen nach mehrfacher Sichtprüfung virtuelle Modifikationen plausibel integrieren ließen. Die Auswahl fiel schließlich auf die in Tabelle 5.1 und Bild 5.1 dargestellten Straßenverkehrsszenen.

Stimulus	Ort	Abstand zur Straße	Typ	$L_{Aeq}$ in dB
1	Brücke	5 m	Baseline	70,6
2	Brücke	5 m	Fahrbahnbelag A	69,9
3	Brücke	5 m	Fahrbahnbelag B	68,9
4	Autobahn	5 m	Baseline	76,1
5	Autobahn	5 m	Schallschutzwand 3 m	66,6
6	Autobahn	5 m	Schallschutzwand 1,5 m	72,8
7	Autobahn	5 m	Pegel -3dB	73,2
8	Ampelkreuzung	5 m	Baseline	63,9
9	Ampelkreuzung	5 m	Brunnen A	64,7
10	Ampelkreuzung	5 m	Brunnen B	64,8
11	Kreisel	20 m	Baseline	59,7
12	Kreisel	20 m	Fahrbahnbelag A	59,1
13	Kreisel	20 m	Fahrbahnbelag B	58,2
14	Kreisel	20 m	Schallschutzwand 1,5 m	56,6
15	Kreisel	20 m	Schallschutzwand 3 m	53,1
16	Kreisel	20 m	Brunnen A	61,4
17	Kreisel	20 m	Brunnen B	61,6

Tabelle 5.1 Eigenschaften der verwendeten Stimuli



Bild 5.1 Aufnahmeorte Brücke, Kreisel, Ampelkreuzung und Autobahn (v. links oben nach rechts unten)

Die erste der ausgewählten Straßenverkehrsszenen befand sich an einer Autobahn. In dieser Szene sollten Schallschutzwände hinzugefügt werden. Bei der zweiten Straßenverkehrsszene wurden an einer Ampelkreuzung Brunnen als maskierende Maßnahme hinzugefügt. Eine dritte Szene war eine Brücke, auf der Fahrhahnoberflächen modifiziert wurden und die vierte Szene bestand aus einem Kreisel, bei dem schließlich alle drei Maßnahmen integriert wurden. Zusätzlich wurde bei Stimulus 7 der

Gesamtpegel um 3 dB reduziert, um die Reliabilität der Antworten der jeweiligen Versuchspersonen bewerten zu können.

### 5.1.2 Räumliche Filterung und Modifikation des Audiomaterials

Die genannten Maßnahmen zur Reduktion der Schallemission wurden auditiv mittels eines räumlichen Filterungsverfahrens, in dem Teile des Schallfeldes gedämpft oder verstärkt wurden, simuliert. Zu diesem Zweck wurden die qualitativ hochwertigen Feldaufnahmen (vgl. Kap. 3.1) so verändert, dass die richtungsbezogene Wirkung der jeweiligen Schallschutzmaßnahme zu hören ist.

#### 5.1.2.1 Schallschutzwand und lärmarmere Asphalt

Um die Wirkung einer virtuellen Schallschutzwand für die dafür ausgewählten konkreten Szenen zu ermitteln, wurde ein Online-Tool (*Barriercalculator* von noisetools.net) verwendet, mit dem ein mathematisches Modell erstellt werden kann, in dem die Schallausbreitung von einem Sender zu einem Empfänger unterbrochen von einer virtuellen Wand dargestellt ist. Dafür werden Parameter wie Abstand der Wand zur Quelle, Position des Empfängers, Grad der Bodenreflexion und die jeweiligen Höhen der Objekte definiert, damit eine passende grafische Darstellung erzeugt werden kann (s. Bild 5.2). Anhand des Modells lässt sich die frequenzabhängige Pegeldämpfung der Schallschutzmaßnahme in Form eines Oktavspektrums am Empfängerort ableiten. Diese gibt an, in welchem Frequenzbereich gewisse Anteile des Schallfeldes gefiltert werden müssen, damit der Eindruck entsteht, dass eine Schallschutzwand in der Szene enthalten ist.

Diese Information ist vor allem hilfreich, um einen FIR-Filter (Finite Impulse Response Filter = Filter Impulsantwort endlicher Länge) zu erstellen. Der FIR-Filter wird angewendet, um die auditive Auswirkung der virtuellen Wand umzusetzen. Insgesamt wurden jeweils zwei Filter für zwei Straßenverkehrsszenen konstruiert, bei denen jeweils die Höhe der Wand verändert wurde (1,5 m und 3 m). Bei den beiden Straßenverkehrsszenen unterschied sich außerdem der Abstand zur Schallquelle (5 m und 20 m, vgl. Tabelle 5.1).

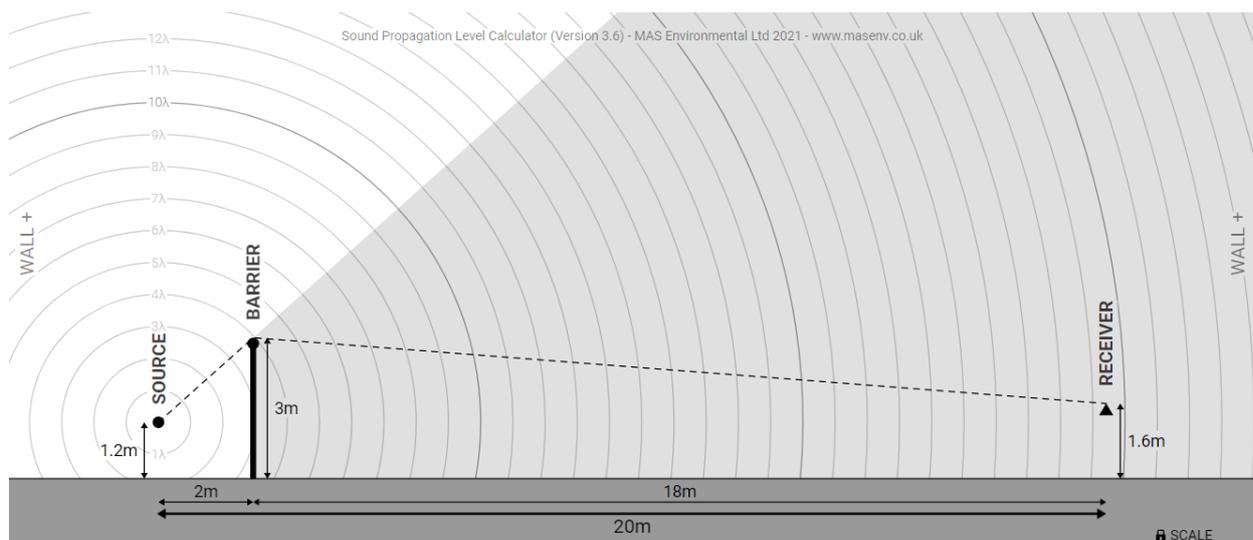


Bild 5.2 Wirkung einer Schallschutzwand im mathematischen Modell

Als Grundlage zur auditiven Simulation der Asphaltmodifikationen dienten ebenfalls Oktavbandspektren, die durch die Differenzbildung eines 50 km/h Referenzmaßes (AB

0/11) und Messungen der Frequenzspektren lärmarmen Deckschichten erzeugt wurden (SM0/11 und DA 0/8, HÄNISCH & HEIDEBRUNN 2020). Diese wurden verwendet, um passende FIR-Filter wie im zuvor genannten Verfahren zu konstruieren.

Um zu erreichen, dass nur räumliche Schallfeldanteile gefiltert werden, die von den Lärmschutzmaßnahmen betroffen sind, wurde das aufgezeichnete Schallfeld mit einer sogenannten Plane-Wave-Decomposition in seine räumlichen Bestandteile zerlegt. Die dabei entstehenden ebenen Wellen werden als Beams (Strahlen) bezeichnet. Im Anschluss an diesen Schritt wurden diejenigen Strahlen, die die simulierte Wand/den simulierten Asphalt schneiden, mit den zugehörigen Filtern frequenzabhängig gedämpft. Die umliegenden Beams wurden ebenfalls prozentual absteigend gefiltert, um die Ausbreitung der zu filternden Schallquelle umzusetzen. Danach wurde das Schallfeld unter Anwendung einer Spherical-Harmonics-Transformation wieder zusammengesetzt. So entstand wieder das Ambisonics Signal mit den gefilterten Segmenten, das beliebig decodiert werden konnte, um es auf jedem beliebigen Lautsprechersystem abspielen zu können.

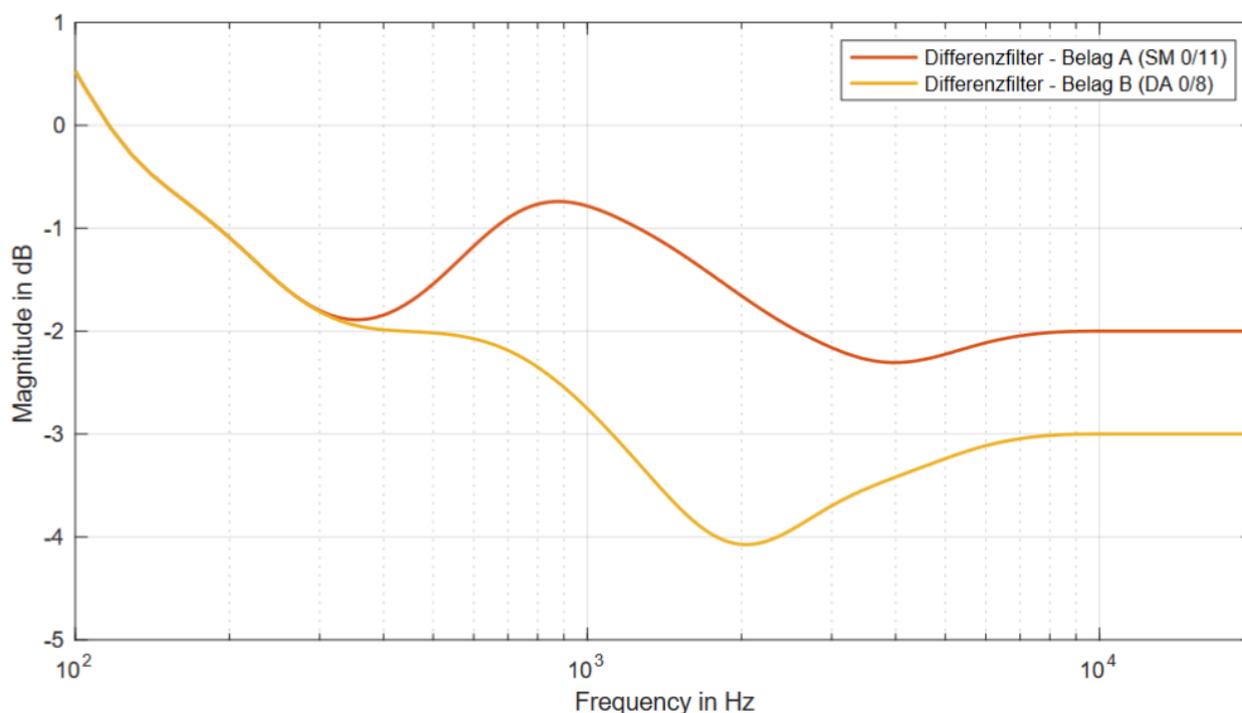


Bild 5.3 Zur Simulation der Auswirkung verschiedener Deckschichten verwendete Differenzfilter für Belag A und Belag B. Als Referenzbelag wurde hier die in [Heft V 333] enthaltene Deckschicht Asphaltbeton AB 0/11 verwendet

### 5.1.2.2 Brunnen

Für die Simulation der Brunnengeräusche wurde eine Stichprobe von Stereoaufnahmen im Geräuschcharakter sehr unterschiedlichen Brunnen ausgewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Signale sich in Bezug auf verschiedene zeitliche und frequenzspezifische Parameter unterscheiden. Die Aufnahmen stammen von zwei Brunnen im Volkspark Friedrichshain in Berlin, die sich aufgrund ihres Designs akustisch hinsichtlich der psychoakustischen Schärfe unterscheiden. Der erste Brunnen, der als

"Märchenbrunnen" bekannt ist, verfügt über mehrere Fontänen mit unterschiedlichen Höhen und Breiten. Der zweite Brunnen, der sich in unmittelbarer Nähe befindet und als "Rundbrunnen/Delphinbrunnen" bezeichnet wird, besitzt lediglich eine Fontäne mit einer Höhe von etwa zwei Metern.

Um die akustische Augmentation der Brunnen durchzuführen, wurden die Stereoaufnahmen mit dem IEM-Stereo-Encoder entsprechend im Raum positioniert und in Ambisonics-Dateien dritter Ordnung konvertiert. Die Transformation bewirkt eine Anpassung der Laufzeiten und Pegel, sodass ein räumlicher Eindruck hinsichtlich der hinzuzufügenden Schallquelle entsteht. Anschließend wurde das dadurch erzeugte Signal zu den Originalaufnahmen addiert. Zur Veranschaulichung der dadurch herbeigeführten Veränderungen des Gesamtsignals sind auf Bild 5.4 jeweils die gemittelten Spektren aller Kanäle der erzeugten Stimuli dargestellt.

Die Schallpegel der angepassten Brunnengeräusche wurden per Hörkontrolle im Lautsprecherarray auf einen im Hinblick auf den virtuellen Abstand plausiblen Wert eingestellt. Sie betragen für Brunnen A (Märchenbrunnen) 59 dB  $L_{Aeq}$  und für Brunnen B (Rundbrunnen) 58 dB  $L_{Aeq}$ .

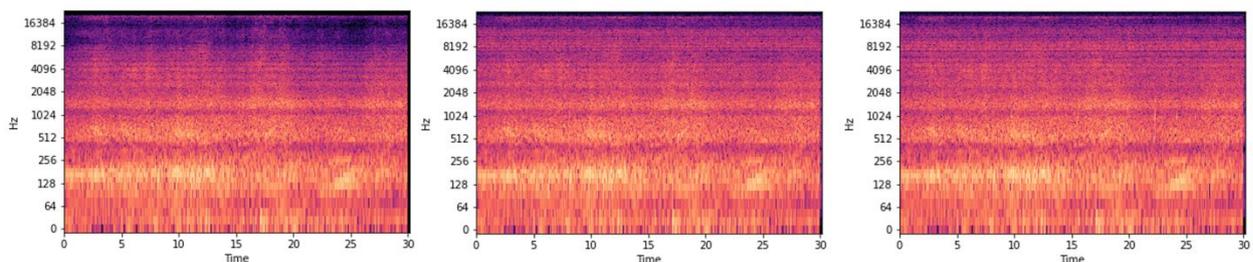


Bild 5.4 Darstellung Frequenzspektrum des Gesamtsignals in Hertz über die Dauer des Signals in s, Originalaufnahme, Brunnenvariation A und B (von links nach rechts)

Bild 5.4 zeigt die Originalaufnahme, die Szenen mit Brunnenvariation A und mit Variation B. Es ist zu erkennen, dass durch die Addition der Wassergeräusche vor allem hochfrequente Energieanteile dem Gesamtsignal hinzugefügt wurden.

<b>Szene</b>	<b>Bedingung</b>	<b>LAeq</b>	<b>LA95p</b>	<b>LA5p</b>	<b>LA95-5</b>	<b>Lautheit 532.1</b>	<b>Schärfe DIN 45692</b>	<b>Schwankungsstärke</b>	<b>Rauigkeit</b>	<b>Spectral Centroid (Median)</b>	<b>Booming</b>
Brücke	Baseline	71	72	69	2,3	22	1,15	0,021	0,13	1391	24,3
Brücke	Belag A	70	71	69	1,9	21	1,14	0,021	0,13	1385	24,5
Brücke	Belag B	69	70	68	1,6	20	1,14	0,021	0,13	1372	25,1
Autobahn	Baseline	77	78	76	2,2	30	1,20	0,023	0,13	1516	24,6
Autobahn	Wand 3 m	68	69	67	2,4	17	1,10	0,021	0,10	1327	28,2
Autobahn	Wand 1,5 m	74	75	73	2,3	24	1,17	0,022	0,12	1452	25,3
Autobahn	Baseline - 3 dB	74	76	73	2,3	25	1,20	0,022	0,12	1516	24,6
Ampel- kreuzung	Baseline	63	64	60	3,8	16	1,11	0,018	0,08	1314	32,3
Ampel- kreuzung	Brunnen A	64	65	62	2,5	18	1,52	0,014	0,11	2695	29,5
Ampel- kreuzung	Brunnen B	64	65	62	2,9	17	1,48	0,012	0,09	2614	29,1
Kreisel	Baseline	60	61	60	0,9	12	1,04	0,020	0,10	1178	32,1
Kreisel	Belag A	59	60	59	1,0	11	1,04	0,020	0,10	1172	32,5
Kreisel	Belag B	58	59	58	1,0	11	1,02	0,020	0,10	1141	33,1
Kreisel	Wand 3 m	57	57	57	0,9	10	0,99	0,011	0,10	1074	33,1
Kreisel	Wand 1,5 m	54	54	53	0,9	8	0,94	0,011	0,09	991	34,5
Kreisel	Brunnen A	62	62	61	0,6	15	1,65	0,100	0,10	3195	27,3
Kreisel	Brunnen B	62	62	62	0,6	14	1,58	0,092	0,10	3035	26,7

Tabelle 5.2 Beschreibung der akustischen Maßnahmen anhand ausgewählter Kenngrößen

Tabelle 5.2 zeigt die Auswirkungen der umgesetzten simulierten Lärminderungsmaßnahmen auf wesentliche (psycho-)akustische Kenngrößen. Neben üblichen Schalldruckpegelindikatoren (Mittelungspegel, Perzentschalldruckpegel) sind etablierte psychoakustische Parameter (Lautheit, Schärfe, Schwankungsstärke, Rauigkeit) aufgeführt. Zusätzlich sind noch die Kenngrößen Spectral Centroid, wodurch der spektrale Schwerpunkt charakterisiert wird, und der Index zur Beschreibung des Phänomens „Booming“, wodurch der Anteil tieffrequenter Komponenten zum Gesamtsignal quantifiziert wird, aufgelistet. Höhere Werte zeigen eine höhere Boominess (Brummigkeit) an.

### 5.1.3 Umsetzung der visuellen Augmentation

Um die akustischen Modifikationen in der Nutzerstudie auch visuell zu unterstützen, wurden die Lärmschutzmaßnahmen in die aufgezeichneten Videos der Szene integriert.

Hierzu wurden sowohl zwei Variationen eines Brunnens als auch einer Schallschutzwand in der 3D-Software Blender modelliert und animiert. Diese Modelle wurden dann mit entsprechender Videoschnittsoftware in die vorliegenden 360°-Video-Aufnahmen der Szenen platziert, sodass die Geräuschkulisse mit dem gezeigten Bildmaterial übereinstimmte. Jede Szene wurde auf insgesamt drei großen Monitoren dargestellt, die als Fenster in die 360°-Aufnahme fungierten. Hierfür mussten in einem letzten Schritt die passenden Bildausschnitte aus dem Rundumblick exportiert werden. In Bild 5.5 sind exemplarisch für die Straßenverkehrsszene Kreisel drei unterschiedliche Situationen dargestellt: ohne Lärmschutz, ein Brunnen, eine niedrige Schallschutzwand.



Bild 5.5 Beispielhafte Videomanipulation in der Straßenverkehrsszene Kreisel

#### 5.1.4 Wiedergabe der audio-visuellen Stimuli

Um ein möglichst immersives Erlebnis für die Bewertung der Stimuli zu bieten, wurde das audio-visuelle Material mit einem 21.2 Lautsprecherarray und drei Monitoren mit hoher Auflösung abgespielt. Zur fehlerfreien Reproduktion des Audiomaterials auf dem ausgewählten System, wurden die modifizierten Ambisonicsfiles gemäß der Lautsprecheranordnung des Abspielsystems (mit Panoramix) decodiert.

Für das synchrone Abspielen von Video- und Audiodaten während des Hörversuchs wurde ein für diesen Zweck entsprechendes Programm mit Max/MSP erstellt. Dabei handelt es sich um eine modular aufgebaute, objektbasierte Programmiersprache, die vor allem Anwendung in der Videokunstszene findet. Die Max/MSP-Module wurden so

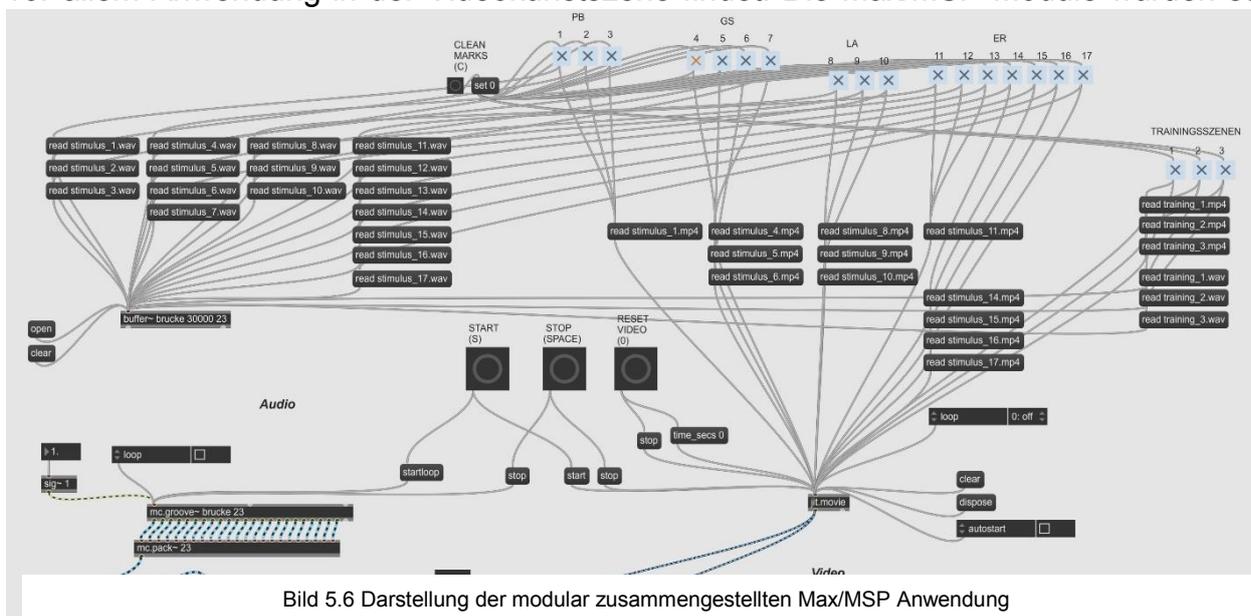


Bild 5.6 Darstellung der modular zusammengesetzten Max/MSP Anwendung

kombiniert, dass auf Knopfdruck zunächst eine Videoprojektionsfläche erzeugt wurde, welche der Größe von drei Monitoren mit den Seitenverhältnissen (1920x1080  $\cong$  5760x1080) entsprach. Schließlich wurden die im Zwischenspeicher (Buffer) befindlichen Audiofiles als Mehrkanal-Objekte und die in das Jitter-Objekt geladenen Bildaufnahmen per Tastatureingabe abgespielt (s. Bild 5.6).

### 5.1.5 Vortest

Die Auswahl der Szenen und die Erprobung der für den Versuch erstellten Bewertungsmaske erfolgte durch einen Vortest mit  $N = 6$  Personen (2 weiblich, 4 männlich). Dabei wurde auch die Versuchsdauer anhand der benötigten Zeit zur Bewertung aller Items pro präsentierter Straßenverkehrsszene ermittelt und die Anzahl und Ausrichtung der Bildschirme zur visuellen Präsentation der Szenen festgelegt.

## 5.2 Versuchsdesign

Als unabhängige Variable fungierten die zuvor ausgewählten 17 Straßenverkehrsszenen (vgl. Kap. 5.1.1), die den Versuchspersonen in randomisierter Reihenfolge präsentiert wurden. Die Item-Bewertung wurde mit Hilfe eines webbasierten Bewertungsformulars durchgeführt, welches auf einem Tablet (Surface Pro mit Win 10 Pro x64, Firefox) angezeigt wurde (s. Bild 5.7).

The image shows two side-by-side screenshots of a rating scale interface titled "Hörversuche". Each screen displays 17 horizontal scales from 0 to 100, with an 'X' marker indicating a rating. The left screen lists the following items: beruhigend, direkt, detailreich, fließend, alarmierend, erholsam, aggressiv, dominant. The right screen lists: angenehm, ereignisreich, brummend, bedrohlich, nah, pfeifend, quietschend, heulend. Both screens have "Zurück" and "Weiter" buttons at the bottom.

Bild 5.7 Bewertungsmaske mit einer Auswahl der zu bewertenden Items

Die Bewertung erfolgte auf einer quasi stufenlosen Skala mit einem Wertebereich von 0-100. Die Items entstammten, basierend auf den zuvor durchgeführten Teilstudien, den Bewertungsdimensionen VALENZ, DYNAMIK, RISKANZ, SCHWERE, SCHÄRFE und KONSISTENZ. Die Auswahl der sieben Kategorien erfolgte anhand der zuvor durchgeführten Faktorenanalyse und bot sowohl eine gute Interpretierbarkeit, als auch eine hohe Trennschärfe (vgl. Kap. 4.5.3). Tabelle 5.3 zeigt eine Auflistung aller 22 genutzten Items mit ihrer Einordnung in ihre jeweilige Kategorie. Zusätzlich wurde das Attribut „lästig“ in die Befragung aufgenommen, um ein direktes Urteil für die Lästigkeit des jeweiligen Höreindrucks zu erheben.

Jede Versuchsperson erlebte und bewertete alle Straßenverkehrsszenen (Within-Subjects-Design).

<b>Faktor</b>	<b>Item</b>
VALENZ	angenehm beruhigend erholsam
DYNAMIK	ereignisreich lebhaft detailreich
RISKANZ	bedrohlich alarmierend aggressiv
SCHWERE	brummend wummernd dumpf
SCHÄRFE	pfeifend quietschend heulend
NÄHE	direkt nah dominant
KONSISTENZ	gleichmäßig monoton fließend

Tabelle 5.3 Einordnung der genutzten Items in 7 Kategorien

Die demografischen Daten wurden analog zu den Vorgängerstudien über ein separates Formular in Paper-Pencil-Form erfasst. Zur Erfassung der individuellen Lärmempfindlichkeit diente erneut der Kurzfragebogen LEF-K von ZIMMER und ELLERMEIER (1998).

### 5.3 Versuchsdurchführung

Die visuelle Präsentation der Stimuli wurde auf Basis der Vorversuche auf drei Monitoren umgesetzt (vgl. Kap. 5.1.4).



Bild 5.8 Versuchsaufbau im Mixed Reality Design Lab der TU Berlin

Bild 5.8 zeigt die Anordnung der drei Monitore. Analog zu den Vorgängerstudien oblag die Steuerung der Stimuluspräsentation sowie die Betreuung des Laborequipments der Technikleitung, die Gesprächsführung erfolgte durch die Versuchsleitung. Nach dem Ausfüllen des demografischen Fragebogens wurde als Teil der Instruktion eine Liste ausgegeben, die in alphabetischer Reihenfolge alle 22 zur Bewertung genutzten Items enthielt (vgl. Tabelle 5.3, Spalte „Item“). Die Versuchspersonen hatten damit vor dem Versuch die Möglichkeit, die Items kennenzulernen und Fragen zu stellen. So wurde sichergestellt, dass den Versuchspersonen die Bedeutungen der Items verständlich war.

Nachdem die Teilnehmenden platziert worden waren, folgte ein Training mit drei dafür vorbereiteten Straßenverkehrsszenen, die während der Vorversuche aufgrund ihrer (möglichst heterogenen) audio-visuellen Eigenschaften ausgewählt wurden.

Nach einem ersten Anhören ohne Bewertung wurden die Versuchspersonen gebeten, die Testszene anhand der 22 Items zu bewerten. Währenddessen wurde die Szene mehrfach wiederholt abgespielt. Die Versuchspersonen wurden ausdrücklich instruiert, lediglich den Höreindruck zu bewerten und das Bildmaterial als reine Unterstützung zum besseren Verständnis der Szene zu betrachten. Nach den Trainingsdurchläufen konnten Fragen gestellt werden, bevor der eigentliche Versuch begann. Nach 9 Szenen erfolgte eine kurze Pause. Abschließend wurden die Teilnehmenden gebeten, den Fragebogen zur Lärmempfindlichkeit auszufüllen. Ein Versuchsdurchgang dauerte circa 90 Minuten. In Bild 5.9 ist der Versuchsablauf grafisch zusammengefasst.



Bild 5.9 Grafische Darstellung des Versuchsablaufes

## 5.4 Stichprobe

An den Versuchen nahmen insgesamt  $N = 40$  Personen ( $n = 11$  weiblich,  $n = 29$  männlich) im Alter von 22 bis 55 Jahren teil ( $M = 31,88$ ,  $SD = 9,25$ ) teil. Etwas mehr als die Hälfte der Versuchspersonen (57,5 %) verfügte nach eigenen Angaben nicht über Akustikfachwissen. Für die Datenanalyse musste ein Datensatz aufgrund von Unregelmäßigkeiten im Versuchsdurchlauf ausgeschlossen werden, womit sich eine finale Stichprobe von  $N = 39$  Personen ergibt.

Die individuelle Lärmempfindlichkeit der Personen wurde über den Kurzfragebogen zur Lärmempfindlichkeit (LEF-K) von ZIMMER und ELLERMEIER (1998) erhoben. Für die Versuchspersonen wurden LEF-K-Gesamtwerte zwischen 4 und 23 Punkten ( $M = 14,36$ ,  $SD = 3,66$ ) ermittelt, was dem zu erwartenden durchschnittlichen Lärmempfindlichkeitswert entspricht. Bild 5.10 zeigt die Verteilung der LEF-K-Scores über die Stichprobe. Je höher der LEF-K Score dabei ausfiel, umso lärmempfindlicher bewerteten sich die Personen. Die Verteilung von Lärmempfindlichkeitswerten innerhalb der Stichprobe entspricht dabei üblichen Verteilungen (vgl. HEINONEN-GUZEJEV 2009).

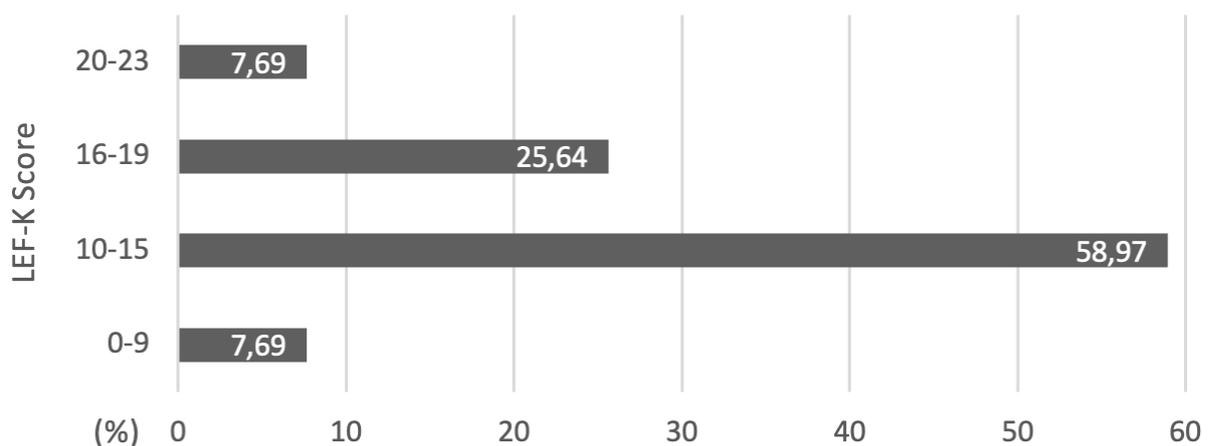


Bild 5.10 Prozentuale Verteilung der LEF-K-Gesamtwerte für die Stichprobe (N=39)

## 5.5 Ergebnisse

Das Ziel der im Folgenden dargestellten Analyse war es, beurteilen zu können, wie sich die getesteten Lärmschutzmaßnahmen auf die Qualität des Lärmempfindens auswirken. Die Analyse gliedert sich dazu in vier Teile analog zu den vier getesteten Straßenverkehrsszenen. Für einen vergleichenden Überblick werden zunächst die Bewertungen der präsentierten Straßenverkehrsszenen dargestellt, wobei alle Versuchspersonen jede der Versuchsbedingungen (Lärmschutzmaßnahmen) erlebten. Darauffolgend werden hintereinander die drei Szenen untersucht, in denen jeweils eine Maßnahme in zwei Ausprägungen gegen die Kontrollbedingung (Straßenverkehrsszene ohne Lärmschutzmaßnahme) getestet wurde. In diesem zweiten Teil wird die Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen im Detail verglichen.

Die Zielvariablen für alle nachfolgend dargestellten Untersuchungen liefert der zuvor entwickelte Fragebogen, aus Gründen der Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit jedoch nicht mit seinen 21 einzelnen Items, sondern aggregiert zu den sieben Beurteilungsdimensionen (Faktoren), die in dem vorangegangenen Studienteil 2 herausgearbeitet wurden. Zusätzlich zu diesen Faktoren wird das einzelne, keinem Faktor zugehörige Item „lästig“ untersucht, da es inhaltlich aussagekräftig ist und das Ausmaß der empfundenen Lästigkeit des Geräuscherlebnisses misst.

Die verwendeten Verfahren werden sich in den Analysen der vier Straßenverkehrsszenen wiederholen. Für eine bessere Lesbarkeit der Ergebnisse erfolgt die Beschreibung dieser Verfahren daher vorweg.

**1. Visuelle Analyse:** Für einen ersten Eindruck dient jeweils eine grafische Darstellung der Daten. Dazu wurden für jede Lärmschutzmaßnahme die Mittelwerte auf allen acht Zielvariablen berechnet und anschließend in ein geeignetes, skaliertes Polarkoordinatensystem eingetragen. Das Ergebnis ist ein intuitiv lesbares Spinnen- oder Radardiagramm.

**2. Systematische Varianz finden:** Im zweiten Schritt wurde für jede Szene eine MANOVA durchgeführt, die Auskunft darüber gibt, welche Zielvariablen (VALENZ, DOMINANZ, etc.) in den einzelnen getesteten Szenen in Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen statistisch bedeutsam variieren. Häufig, aber nicht immer, entspricht das den Stellen im Radardiagramm, an denen die einzelnen Werte einer Messgröße besonders weit auseinanderliegen. Alle Zielvariablen mit einer statistisch bedeutsamen Varianz werden im folgenden Schritt weiter analysiert.

**3. Varianzquellen analysieren:** Im dritten Schritt wurde jede der zuvor ausgewählten Zielvariablen daraufhin untersucht, welche der Lärmschutzmaßnahmen die systematische Varianz verursacht und in welchem Ausmaß. Im Radardiagramm entspräche das in etwa den Abständen der einzelnen Punkte einer Zielvariablen zueinander bzw. zur Kontrollbedingung. Um diese Abstände zu quantifizieren und zu testen, wurden sämtliche Bedingungen paarweise miteinander verglichen.

Für das eingangs benannte Ziel der Analyse ist nur das Ergebnis dieses dritten Schritts bedeutsam. Schritte 1 und 2 werden lediglich aus Gründen der Transparenz und Nachvollziehbarkeit ausgeführt.

### 5.5.1 Maßnahmen im Vergleich

Um einen Vergleich sämtlicher getesteter Lärmschutzmaßnahmen herzustellen, dient die Straßenverkehrsszene „Kreisel“. Die Versuchspersonen hörten diese Szene acht Mal, nämlich zweimal ohne (Baseline 1 & 2)<sup>1</sup>, und sechsmal mit jeweils einer der verschiedenen Versuchsbedingungen (Wand 3 m, Wand 1,5 m, Brunnen A, Brunnen B, Belag A, Belag B).

Ein erster Blick auf die Mittelwerte (Bild 5.11) zeigt, dass sich die verschiedenen Lärmschutzmaßnahmen in unterschiedlichen Formen auf den Höreindruck auszuwirken scheinen, dass der Einfluss jedoch bei einigen Messgrößen (bspw. NÄHE) wesentlich größer auszufallen scheint als bei anderen (bspw. SCHWERE).

#### Kreisel

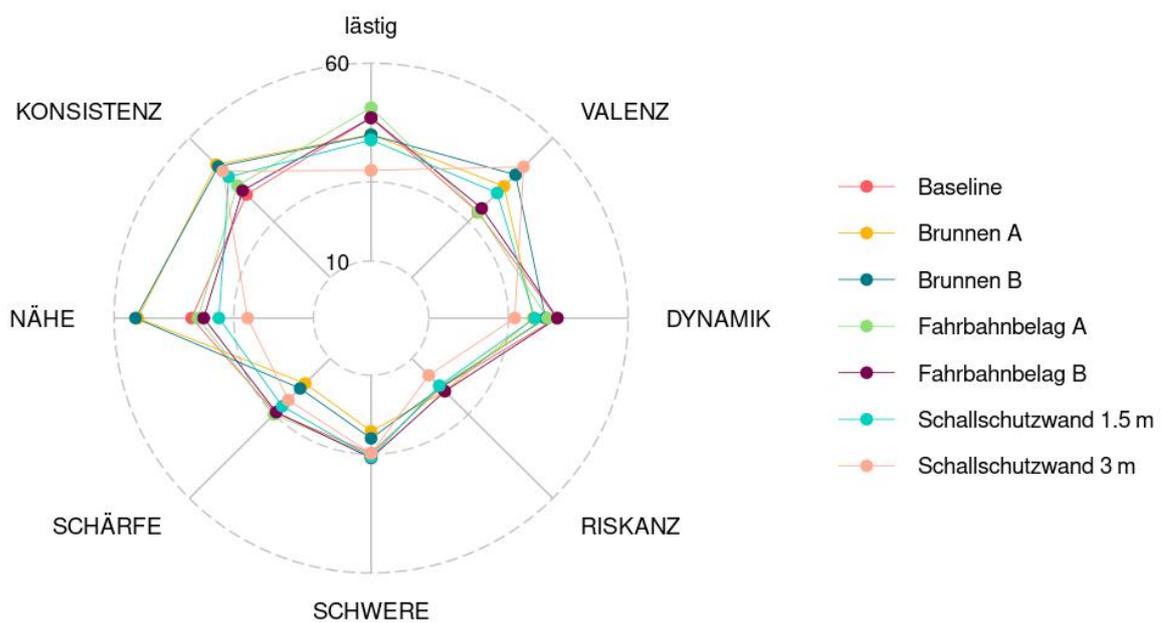


Bild 5.11 Mittelwerte aller Versuchsbedingungen der Szene „Kreisel“ auf den einzelnen Zielvariablen

Hinweis: Der Wertebereich ist für die bessere Ablesbarkeit von Unterschieden auf 10 bis 60 beschnitten. Besonders gut sichtbar ist die größere wahrgenommene NÄHE in den beiden Brunnen-Bedingungen sowie die geringen Unterschiede in der wahrgenommenen SCHWERE.

Die Ergebnisse der MANOVA bestätigen diesen Eindruck (s. Tabelle 5.4). Für alle Messgrößen, außer DÜNSTERNIS, weichen die Mittelwerte statistisch bedeutsam voneinander ab (für DYNAMIK und SCHÄRFE  $p = 0,001$ , für alle weiteren  $p < 0,001$ ). Bei der darauffolgenden Analyse der 147 Paarvergleiche (es werden die Einflüsse aller sieben Versuchsbedingungen auf die vorausgewählten Messgrößen miteinander verglichen) wurden 44 Ergebnisse statistisch signifikant. Darunter befinden sich jedoch neben Vergleichen mit der Kontrollbedingung auch Vergleiche der Lärmschutzmaßnahmen untereinander. Da diese später detailliert betrachtet werden, und aus Gründen der Übersichtlichkeit, werden in Tabelle 3 nur die 14 Fälle dargestellt, in denen eine Maßnahme im Vergleich zur Baseline einen Effekt hatte. Die vorletzte Spalte der Tabelle beinhaltet die Größe des statistischen Effekts (Cohen's d). Diese Zahl gibt an, wie viele Standardabweichungen die beiden Mittelwerte des Vergleichs

<sup>1</sup>Baseline 2 wird unter Kap. 5.5.5 „Qualität des entwickelten Untersuchungsinstruments“ betrachtet.

auseinanderliegen. Für die leichte Einordnung wird der Effekt in der letzten Spalte zusätzlich einer der drei konventionellen Klassen „groß“, „moderat“ oder „klein“ zugeordnet (s.a. LENHARD & LENHARD, 2016). Für die Wirkrichtung gilt grundsätzlich „Kontrollbedingung minus Testbedingung“. Eine negative Effektgröße bedeutet also, dass der Wert in der Kontrollbedingung niedriger lag als in der Testbedingung.

Zielvariable	Vergleichsbed.	Testbed.	Sig.- Level	Effekst.	Effektgr.
lästig	Baseline	Schallschutzwand 3 m	****	0,856	groß
VALENZ	Baseline	Schallschutzwand 3 m	****	-0,953	groß
KONSISTENZ	Baseline	Brunnen A	***	-0,829	groß
VALENZ	Baseline	Brunnen B	*	-0,553	moderat
VALENZ	Baseline	Schallschutzwand 1,5 m	*	-0,537	moderat
DYNAMIK	Baseline	Schallschutzwand 3 m	**	0,682	moderat
SCHÄRFE	Baseline	Brunnen A	***	0,767	moderat
SCHÄRFE	Baseline	Brunnen B	**	0,698	moderat
NÄHE	Baseline	Brunnen A	*	-0,563	moderat
NÄHE	Baseline	Brunnen B	**	-0,649	moderat
NÄHE	Baseline	Schallschutzwand 3 m	***	0,797	moderat
KONSISTENZ	Baseline	Brunnen B	**	-0,717	moderat
KONSISTENZ	Baseline	Schallschutzwand 1,5 m	**	-0,631	moderat
KONSISTENZ	Baseline	Schallschutzwand 3 m	**	-0,693	moderat

Tabelle 5.4 Statistisch signifikante Unterschiede zwischen Baseline und Testbedingungen

Erwartungsgemäß zeigt sich anhand dieser Tabelle, dass Wand A (3 m) einen großen, reduzierenden Effekt auf die Lästigkeit hat. Der zweite starke Effekt wird durch den Brunnen A auf das Maß KONSISTENZ verzeichnet. Der Brunnen führte also im Vergleich zur Kontrollbedingung zur einem als deutlich fließenderes und gleichmäßiger wahrgenommenes Geräusch – eine Erkenntnis, die intuitiv nachvollziehbar ist. Gleiches gilt für den dritten großen Effekt, dass Wand A zu einem angenehmeren Erleben der Straßenverkehrsszene führte. Auch die weiteren der moderaten Effekte zeigen sich mit einer erwartbaren und plausiblen Wirkrichtung, mit einem interessanten Aspekt: Beide Brunnen führten zu einer Erhöhung der empfundenen NÄHE und einer Reduzierung der empfundenen SCHÄRFE, die gesamte Szene wurde hier also im Vergleich zur Kontrollbedingung direkter, dominanter sowie weniger pfeifend oder heulend wahrgenommen. Das gibt Grund zur Annahme, dass sich die erwarteten Maskierungseffekte durch das Geräusch des plätschernden Wassers eingestellt haben. Für Brunnen B führt dies sogar zu einer leicht positiveren VALENZ.

Ferner tauchen die unterschiedlichen Fahrbahnbeläge nicht der Tabelle 5.4 auf, da sie keine statistisch signifikant wahrnehmbaren Unterschiede hervorriefen. Im nächsten Analyseteil wird zunächst dieser Befund näher betrachtet, bevor die detaillierten Einflüsse der Brunnen und Lärmschutzwände Beachtung finden.

### 5.5.2 Belagsvarianten

Anhand der Straßenverkehrsszene „Brücke“ wurde die Wirksamkeit der beiden Belagsvarianten überprüft. Auch hier soll zunächst eine visuelle Darstellung zu einem ersten Eindruck verhelfen (Bild 5.12). Es wird auf Anhieb augenfällig, wie dicht die einzelnen Mittelwerte beieinanderliegen. Die sich aufdrängende Vermutung, dass die verschiedenen Versuchsbedingungen nicht zu statistisch signifikanten Unterschieden führten, wird durch die MANOVA bestätigt (p-Werte zwischen 0,686 und 0,962). Weitergehende Analysen erscheinen in Anbetracht dieses Ergebnisses nicht sinnvoll.

#### Brücke

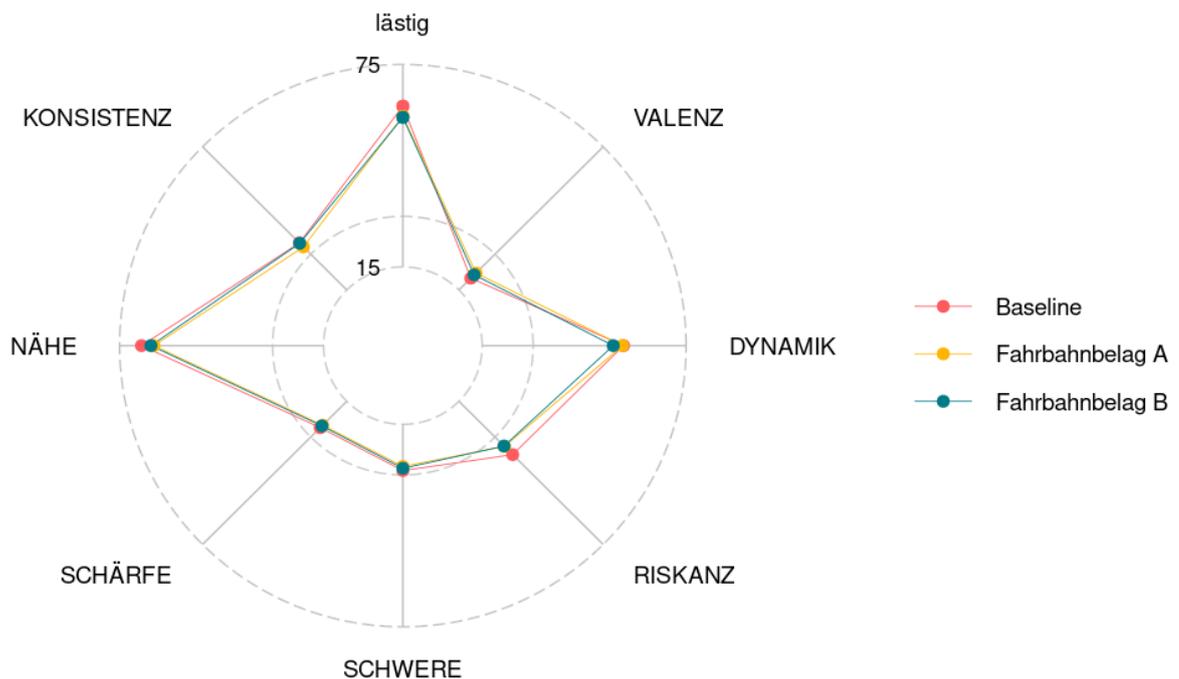


Bild 5.12 Mittelwerte aller Versuchsbedingungen der Szene „Brücke“ auf den einzelnen Zielvariablen

Hinweis: Der Wertebereich ist für die bessere Ablesbarkeit von Unterschieden auf 15 bis 75 beschnitten. Anhand der Grafik ist erkennbar, dass die Belagsvarianten in der Studie keine wahrnehmbaren Unterschiede hervorriefen.

Die Unterschiede zwischen den Straßenbelagsvarianten basierten auf Differenzbetrachtungen zwischen den Deckschichten Asphaltbeton 0/11 (AB 0/11), Splittmastixasphalt 0/11 (SM 0/11) und Drainasphalt 0/8 (DA 0/8) (HÄNISCH & HEIDEBRUNN 2020). Die Differenzen sind als verhältnismäßig klein zu betrachten, da weder im Schalldruckpegel/Lautheit noch in der Veränderung des Spektrums wesentliche Unterschiede erzeugt wurden. Die Tatsache, dass im Mittel nahezu deckungsgleiche Bewertungen über die verschiedenen Dimensionen ermittelt wurden, spricht zum einen für aus Wahrnehmungssicht vernachlässigbare akustische Veränderungen und gleichzeitig zum anderen für ein reliables Messinstrument.

### 5.5.3 Brunnenvarianten

Anhand der Straßenverkehrsszene „Ampelkreuzung“ wurde die Wirksamkeit der beiden Brunnen überprüft. Die visuelle Darstellung zeigt hier für die Zielvariablen VALENZ, SCHWERE und KONSISTENZ sichtbar gestreute Mittelwerte, wobei die Unterschiede zur Baseline stets größer wirken als die Unterschiede zwischen den beiden Brunnenvarianten (Bild 5.13).

#### Ampelkreuzung

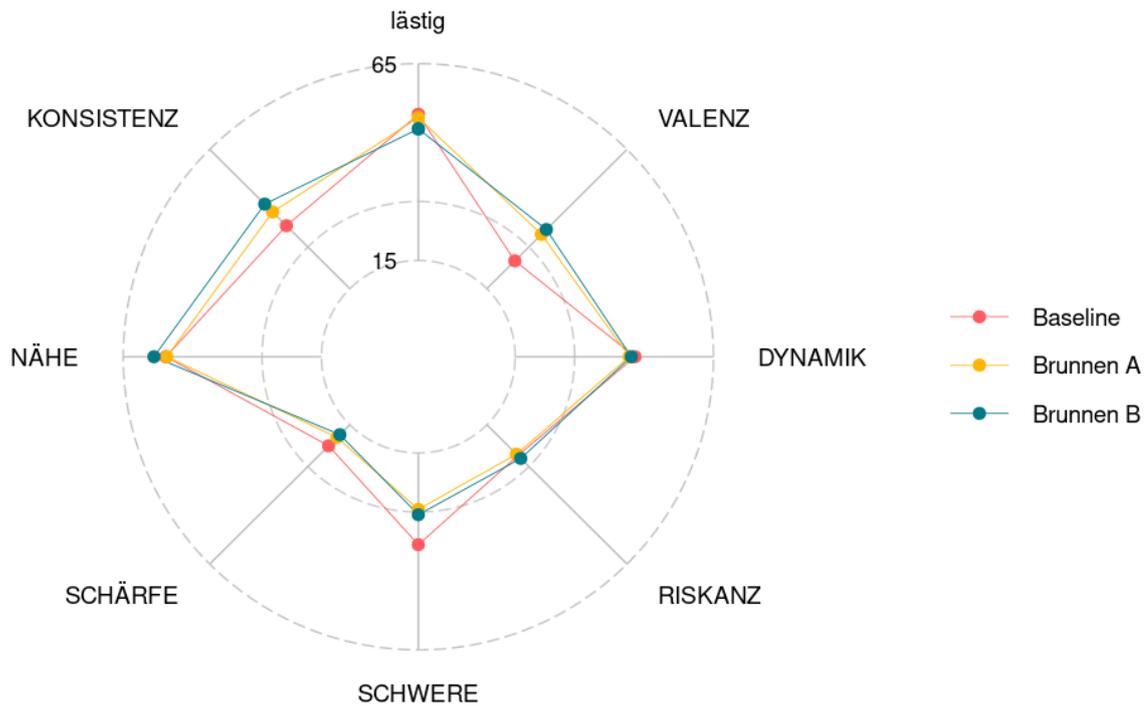


Bild 5.13 Mittelwerte aller Versuchsbedingungen der Szene „Ampelkreuzung“ auf den einzelnen Zielvariablen

Hinweis: Der Wertebereich ist für die bessere Ablesbarkeit von Unterschieden auf 15 bis 65 beschnitten. Besonders der etwa gleichgroße Zugewinn an VALENZ durch die beiden Brunnenvarianten wird hier anschaulich.

Die Ergebnisse der MANOVA zeigen jedoch, dass nur die Unterschiede für VALENZ ( $p = 0,02$ ), SCHWERE ( $p = 0,02$ ) und KONSISTENZ ( $p = 0,02$ ) signifikant sind<sup>2</sup>. Das bedeutet zunächst, dass sich die Brunnen in der getesteten Szene recht selektiv auf die akustische Wahrnehmungsqualität auswirken. Der nächste Analyseschritt offenbart, wie aus Tabelle 5.5 ersichtlich wird, dass beide Brunnen einen ungefähr gleichartigen, schwachen Effekt auf die VALENZ hatten (die Straßenverkehrsszene wurde mit Brunnen als angenehmer empfunden). Auch im Einfluss auf die anderen beiden Zielvariablen unterschieden sich die Brunnen nicht bzw. kaum voneinander, beide führten zu einer moderat verringert empfundenen SCHWERE und einer leicht bis moderat erhöht wahrgenommenen KONSISTENZ.

<sup>2</sup> Die augenscheinliche Varianz der Mittelwerte in der Zielvariablen Schärfe wird sozusagen von der Varianz der Werte zwischen den einzelnen Versuchspersonen überdeckt.

Zielvariable	Vergleichsbed.	Testbeding.	Sig.-Level	Effekst.	Effektgr.
SCHWERE	Baseline	Brunnen A	***	0,656	moderat
SCHWERE	Baseline	Brunnen B	**	0,508	moderat
KONSISTENZ	Baseline	Brunnen B	***	-0,661	moderat
KONSISTENZ	Baseline	Brunnen A	*	-0,464	klein
VALENZ	Baseline	Brunnen B	*	-0,424	klein
VALENZ	Baseline	Brunnen A	*	-0,412	klein

Tabelle 5.5 Statistisch signifikante Unterschiede zwischen Baseline und Testbedingungen  
(Sign.-Level entsprechen \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,001$ , \*\*\*  $p < 0,001$ )

#### 5.5.4 Schallschutzwände

Anhand der Straßenverkehrsszene „Autobahn“ wurde die Wirksamkeit der beiden verschieden hohen Lärmschutzwände überprüft. Die grafische Darstellung zeigt hier gut differenzierbare Mittelwerte auf allen Zielvariablen außer KONSISTENZ und SCHWERE (Bild 5.14). Das Ergebnis der MANOVA bestätigt signifikante Mittelwertvarianzen nur für VALENZ ( $p = 0,006$ ), DYNAMIK ( $p = 0,02$ ), RISKANZ ( $p < 0,001$ ), NÄHE ( $p < 0,001$ ) und lästig ( $p < 0,001$ ).

#### Autobahn

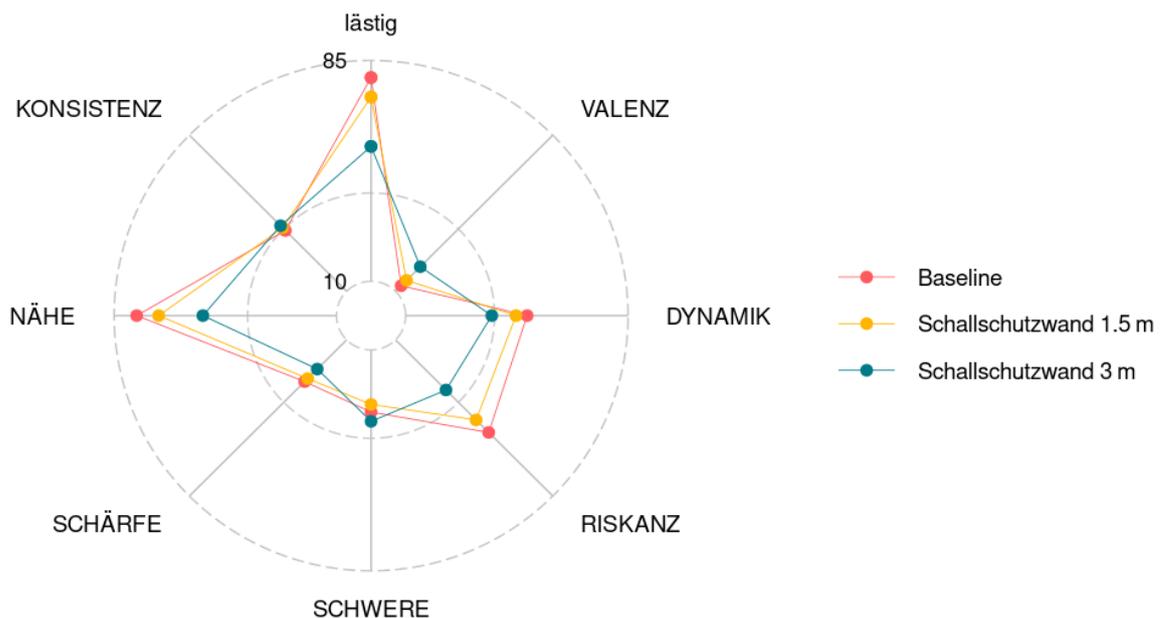


Bild 5.14 Mittelwerte der Versuchsbedingungen der Szene „Autobahn“ auf den einzelnen Zielvariablen

Hinweis: Der Wertebereich ist für die bessere Ablesbarkeit von Unterschieden auf 10 bis 85 beschnitten. Die starke Wirkung der Schallschutzwände auf vielen Skalen wird hier ohne weiteres erkennbar.

Die detaillierte Analyse der Effekte zeigt im Wesentlichen erwartbare, bzw. nachvollziehbare Ergebnisse (s. Tabelle 5.6). In Abhängigkeit von der Höhe der Schallschutzwand wird das Verkehrsgeräusch weniger lästig, angenehmer, weniger bedrohlich und weniger direkt wahrgenommen. Lediglich der Einfluss auf die wahrgenommene DYNAMIK, also ob das Geräusch als ereignisreich, lebhaft oder detailreich empfunden wird, ist nicht offensichtlich. Es könnte sich dabei um ein Artefakt der visuellen Eindrücke handeln – schließlich wurden die vorbeifahrenden Autos durch die Wand auch optisch verborgen und führten so zu der Empfindung einer weniger belebten Szene. Es kann aber auch die Folge des geringeren Schalldruckpegels sein, der zu einer weniger intensiven Empfindung von Dynamik geführt hat. Für eine inhaltliche Klärung wären weitere Experimente notwendig, der Effekt ist jedoch aufgrund seiner Stärke nicht als ein statistisches Artefakt einzuordnen, sondern als profunde Erkenntnis zu werten.

Zielvariable	Vergleichsbed.	Testbed.	Sig.- Level	Effekst.	Effektgr.
lästig	Baseline	Schallschutzwand 3 m	****	0,997	groß
lästig	Schallschutzwand 1,5 m	Schallschutzwand 3 m	****	0,860	groß
DYNAMIK	Baseline	Schallschutzwand 3 m	****	0,823	groß
RISIKANZ	Baseline	Schallschutzwand 3 m	****	1,047	groß
RISIKANZ	Schallschutzwand 1,5 m	Schallschutzwand 3 m	****	0,892	groß
NÄHE	Baseline	Schallschutzwand 3 m	****	1,327	groß
NÄHE	Schallschutzwand 1,5 m	Schallschutzwand 3 m	****	1,120	groß
VALENZ	Baseline	Schallschutzwand 3 m	****	-0,777	moderat
VALENZ	Schallschutzwand 1,5 m	Schallschutzwand 3 m	***	-0,715	moderat
DYNAMIK	Schallschutzwand 1,5 m	Schallschutzwand 3 m	**	0,601	moderat
lästig	Baseline	Schallschutzwand 1,5 m	*	0,412	klein
RISIKANZ	Baseline	Schallschutzwand 1,5 m	*	0,425	klein
NÄHE	Baseline	Schallschutzwand 1,5 m	*	0,470	klein

Tabelle 5.6 Statistisch signifikante Unterschiede zwischen Baseline und Testbedingungen  
(Sign.-Level entsprechen \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*\*\*  $p < 0,001$ )

### 5.5.5 Qualität des entwickelten Untersuchungsinstruments

Ein nebeneordnetes Ziel der Studie war es, das im vorangegangenen Studienteil entwickelte Fragebogeninstrument zur Erhebung der empfundenen Qualität von (Straßenverkehrs)Geräuschen zu validieren. Dazu wurden drei Tests durchgeführt.

Erstens wurde anhand des Vergleichs Baseline 1 vs. Baseline 2 (Pegel -3 dB) die Reliabilität und Trennschärfe des Instruments heuristisch begutachtet. Das Ergebnis der MANOVA zeigte keine signifikanten Unterschiede. Dies kann als Indiz gesehen werden, dass zum einen die Retest-Reliabilität gegeben scheint. Zum anderen zeigt dies auch, dass entweder die Trennschärfe des Instruments für solche vergleichsweise kleinen Unterschiede nicht ausreichend ist, so dass sich eine reine Pegeländerung von 3 dB nicht wesentlich auf das qualitative, mehrdimensionale Lärmempfinden auswirkt. Oder es könnte darauf hinweisen, dass die reine Pegelreduzierung in der hier verwendeten Größenordnung bei gleichbleibendem Geräuschcharakter keinen erheblichen Einfluss auf das mehrdimensionale Lärmempfinden hat. Vergleicht man dagegen die perzeptive Auswirkung der Schallschutzwand mit 1,5 m (72,8 dB(A)), die im Vergleich zur Baseline 2 (73,2 dB(A)) eine ähnliche Pegelreduktion von ca. 3 dB zur Baseline 1 darstellt, wird die Bedeutung der audio-visuellen Veränderung der Szene aufgrund der Lärmschutzmaßnahme deutlich. Der Schalldruckpegel ist nicht in der Lage, die Unterschiede zwischen den Bedingungen Baseline 2 und der Schallschutzwand mit 1,5 m Höhe zu erklären und andere psychoakustisch motivierte Parameter müssen zur Erklärung der Bewertungsunterschiede herangezogen werden. Zur detaillierten Klärung wäre eine gesonderte Studie notwendig.

Zweitens wurde anhand der Szene „Kreisel“ verglichen, ob und inwiefern sich Experten- und Laienurteile unterscheiden. Signifikante Unterschiede fanden sich auf den Zielvariablen DYNAMIK, SCHÄRFE und KONSISTENZ (s. Tabelle 5.7), wobei Laien die Dynamik und Konsistenz leicht höher und die Schärfe etwas niedriger einschätzten als die Personen mit akustisch relevantem Fachwissen. Die Tatsache, dass sich die Unterschiede nur auf 3 von 7 Skalen befinden, nur eine geringe Effektstärke besitzen und nicht einheitlich in eine Richtung zeigen, kann als Indiz gewertet werden, dass sich der Fragebogen gleichermaßen für Laien und Experten eignet. Im Detail und besonders bei inhomogenen Stichproben sollten diese Befunde jedoch berücksichtigt werden.

Zielvariable	Gruppe 1	Gruppe 2	Sig.-Level	Effektstärke	Effektgröße
DYNAMIK	Laien	Experten	***	0,420	klein
SCHÄRFE	Laien	Experten	*	-0,314	klein
KONSISTENZ	Laien	Experten	*	0,294	klein

Tabelle 5.7 Statistisch signifikante Unterschiede zwischen Laien und Experten (Sign.-Level entsprechen \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*\*\*  $p < 0,001$ )

Als drittes Kriterium zu Beurteilung der Qualität des Fragebogens wurde anhand der neuen Daten wiederholt eine konfirmatorische Faktorenanalyse durchgeführt. Das Ergebnis ist ein Comparative Fit Index von 0,920 und ein mittlerer Fehlerindex (*RMSEA*) von 0,072. Diese Werte sprechen dafür, dass das dem Fragebogen zugrundeliegende Messmodell nicht auf die Trainingsdaten überangepasst wurde, sondern auch neue Befunde zuverlässig einordnen kann.

Zusammenfassend kann die Qualität des Untersuchungsinstruments als geeignet beurteilt werden, um die in der Studie gestellten Fragen gemäß wissenschaftlichen Standards beantworten zu können. Für Grundlagenforschung im Bereich der

Psychoakustik sollte jedoch eine weitere Validierungsstudie anhand einer erheblich größeren Stichprobe vorgenommen werden.

## 5.6 Erprobung der (psycho)akustischen Prädiktionsmodelle

Mit den im dritten Studienteil generierten Daten war es möglich, die technisch-instrumentellen Vorhersagemodelle, berichtet in Kapitel 4.6, hinsichtlich ihrer Aussagekraft und Qualität zu überprüfen. Korrespondierend zu dem beschriebenen Verfahren zur Inhaltsanalyse aus Kapitel 4.6 wurde eine Zusammenstellung an Audio Features und Schalldruckpegelmessungen für die Stimuli aus Studienteil 3 berechnet. Die dadurch generierten Werte der relevanten (psycho-)akustischen Kenngrößen wurden verwendet, um die Ausprägungen zu den einzelnen Faktoren zu berechnen. Demnach ergaben sich Werte für sieben Faktoren und das Zusatzitem „lästig“ zu jedem der 17 analysierten Stimuli.

Darüber hinaus wurden die Beurteilungsdimensionen, die aus dem perzeptiven Messmodell hervorgehen, zusammen mit dem einzelnen Item „lästig“ über die generierten Daten aus dem Laborexperiment aggregiert, indem die Ergebnisse über alle Versuchspersonen für jedes Sample gemittelt wurden.

Somit konnten die aus den technischen Modellen mit den aus dem Laborexperiment hervorgegangenen perzeptiven Daten verglichen werden. Die Abweichungen zwischen den Mess- und Modellwerten werden auch in diesem Fall mit dem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  angegeben.

<b>Faktor</b>	<b>Modell</b>	<b>Prädiktoren</b>	<b><math>R^2</math></b>
SCHÄRFE	S2	LA5 Sharp Bism %50	0,09
DYNAMIK	DY2	LC95 T. Booming	0,42
KONSISTENZ	K2	Erb Skew Loud 532.1	0,54
VALENZ	V2	LA95-5 LC5 T.Warmth	0,67
NÄHE	N2	Barkband 7 LA95	0,76
SCHWERE	D2	Fluc LCLA Centroid %10 Acoustic Div LA95-5	0,36
RISIKANZ	R2	LA5 Spec Contrast Roughness %50	0,47
lästig	LL1	LC5 Sharp Din 45692 %50	0,37
lästig	LL2	LC5 MFCC 3 Spectral Skew	0,96

Tabelle 5.8 Berechnung von Audio-Features und Schalldruckpegelmessungen für die Stimuli aus Studienteil 3

Die meisten Modelle erwiesen sich als robust gegenüber den neuen, unbekanntem Daten aus dem dritten Studienteil. Sehr gute Prädiktionsergebnisse lieferte das Modell LL2 mit einer Vorhersagegüte von  $R^2 = 0,96$ . Sehr gut ließ sich auch das Modell für den Faktor VALENZ bestätigen ( $R^2 = 0,67$ ). Gute Vorhersagen zeigten auch die Modelle zu den Dimensionen RISKANZ und DYNAMIK ( $R^2 = 0,47$ ,  $R^2 = 0,42$ ). Die klangfarben-spezifische Kategorie SCHWERE ( $R^2 = 0,36$ ) zeigte bei dem neuen Datensatz bessere Vorhersageergebnisse als erwartet, zieht man die Vorhersagequalität aus Kapitel 4.6 in Betracht. Faktoren, die räumliche Kategorien beschreiben, erwiesen sich ebenfalls als robust. Das Vorhersagemodell zum Faktor NÄHE zeigte eine gute Vorhersagequalität von  $R^2 = 0,769$ . Auch bei dem Faktor KONSISTENZ ( $R^2 = 0,54$ ) erwies sich das entsprechende Modell als robust.

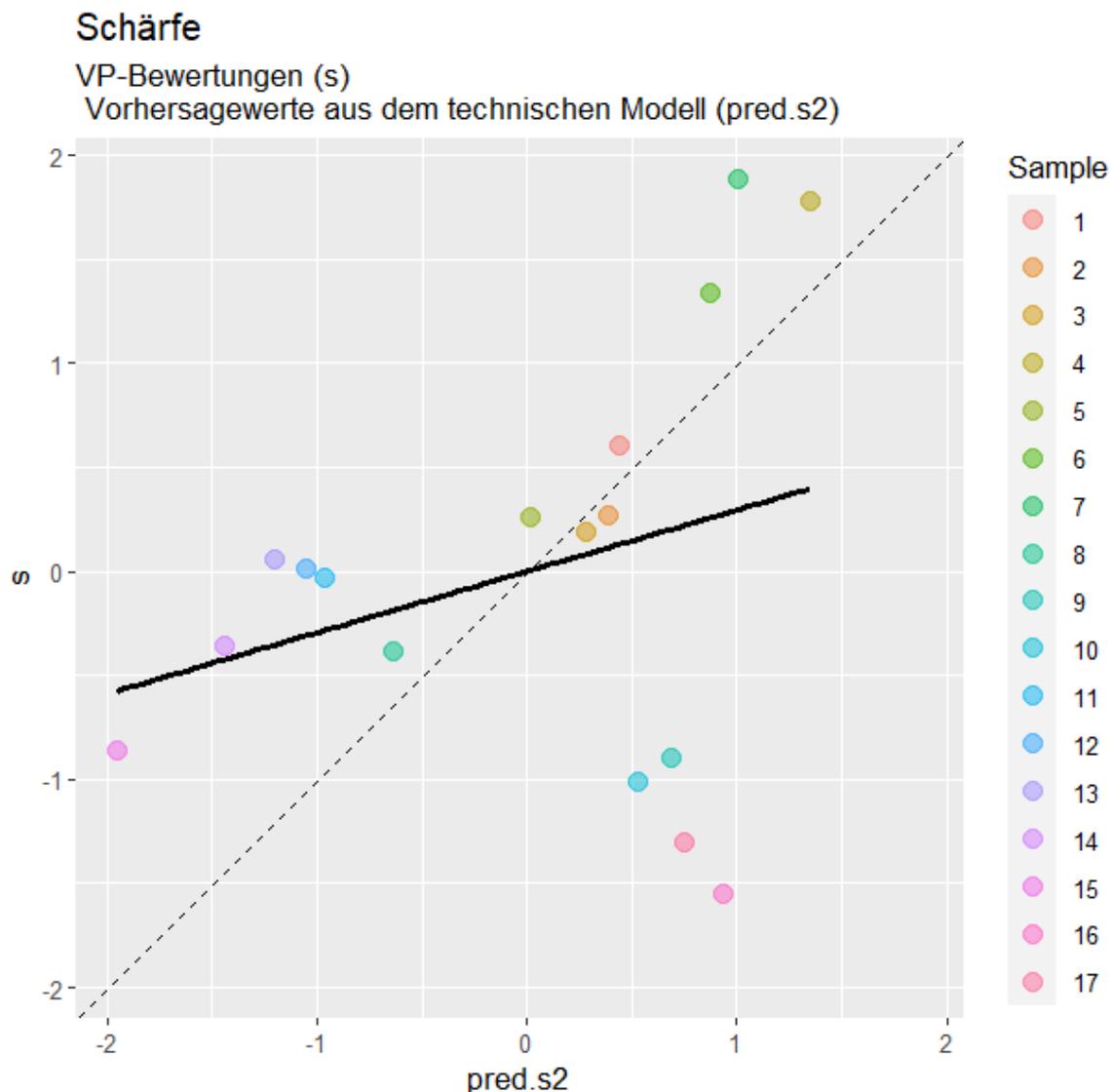


Bild 5.15 Standardisierte Vorhersageergebnisse des Modells für Schärfe 'S2' vs. Attributbewertungen der Versuchspersonen für die 17 Stimuli (Sample) (jeweils arithmetischer Mittelwert)

Das Berechnungsmodell zur Dimension SCHÄRFE  $R^2 = 0,09$  war als einziges Modell weniger robust bei der Prädiktion des neuen Datensatzes, was im Vergleich zur relativ guten Vorhersageleistung von SCHWERE überraschend erscheint. Um genauere Information über dieses Ergebnis zu erhalten, sind in Bild 5.14 die Zusammenhänge zwischen Prädiktionswert aus dem instrumentellen Messmodell und der gemittelten

Versuchspersonenbewertung für die 17 Stimuli abgebildet. Auffällig sind die vier deutlichen Abweichungen von der idealen Regressionsgeraden (s. unten rechts im Graphen). Diese Geräuschkulissen wurden von den Versuchspersonen als weniger scharf empfunden als vom Messmodell prädiziert. Dabei handelt es sich um die Stimuli 9, 10, 16, 17. Dies sind diejenigen Straßenverkehrsszenen, in denen Brunnengeräusche als innovative Lärmschutzmaßnahme zur partiellen Maskierung der Verkehrsgeräusche eingebracht wurden.

## 6 Zusammenfassung und Fazit

Ziel der hier berichteten Studie war es, die Wirkung einzelner psychoakustischer Parameter auf das Lärmempfinden zu untersuchen und damit die Grundlage zur Erforschung innovativer Lärminderungsstrategien zu schaffen, wobei konkret Straßenverkehrsgeräusche im Fokus standen. Die Studie bestand aus drei aufeinander aufbauenden Experimenten, in denen Probanden in einer virtuellen Versuchsumgebung Straßenverkehrsszenen erlebten.

Zur Vorbereitung der ersten Teilstudie wurde dazu zunächst eine variantenreiche Auswahl von Straßenverkehrsszenen in Bild und Ton an unterschiedlichen Orten aufgenommen. Für die Präsentation der daraus abgeleiteten audio-visuellen Stimuli wurden eine Testumgebung und ein exploratives Studiendesign zur Entwicklung von Beschreibungsdimensionen für die Bewertung von Straßenverkehrsgeräuschen im Mixed Reality Design Lab umgesetzt. Im Experiment wurden die Versuchsteilnehmenden gebeten, ihre Wahrnehmungsunterschiede zwischen Paaren der dargebotenen Szenen anhand möglichst vieler und inhaltsstarker Attribute zu beschreiben. Daraus resultierte eine große Anzahl an Beschreibungen, die teils hohe interindividuelle Übereinstimmungen aufwiesen. Die gesammelten Attribute deckten zwölf repräsentative Dimensionen ab, die zum Teil mit Befunden der Soundscape- und Hörforschung korrespondierten, aber auch neue Aspekte umfassten. Der Attributpool bildete damit eine umfassende Basis für die Entwicklung eines Fragebogens zur Bewertung von Straßenverkehrsgeräuschen. Im nächsten Schritt wurden Attribute aus jeder Dimension ausgewählt, um die Fragebogenitems zusammenzustellen. Hierbei war nicht ausschließlich die Häufigkeit der genannten Attribute innerhalb einer Dimension ausschlaggebend für die Auswahl, sondern auch die Eindeutigkeit der jeweiligen Attribute, also deren Interpretierbarkeit und deren Repräsentativität für die jeweilige Kategorie. Die Auswahl wurde in einem Konsensprozess innerhalb des Forschungsteams getroffen, wobei auf eine ausgewogene Anzahl von Attributen bzw. Items pro Kategorie geachtet wurde. Die 59 Items umfassende Auswahl wurde in einem Begleitkreistreffen des Projektes zur Verwendung im zweiten Teil der Studie bestätigt.

Ziel des zweiten Studienteils war es, einen Fragebogen zu entwickeln, der die Komplexität der Wahrnehmung von Straßenverkehrsgeräuschen hinreichend erfasst, gleichzeitig aber ökonomischer in der Anwendung ist, als die Erhebung sämtlicher der im vorangegangenen Studienteil gefundenen 59 Items. Dahinter verbarg sich die Annahme, dass bereits ein kleiner Teil der Items das Erleben von Straßenverkehrsgeräuschen hinreichend beschreiben könne. Um diese Hypothese empirisch zu prüfen, wurde zunächst ein geeignetes Experiment entwickelt und durchgeführt, um die gewonnenen Daten anschließend statistisch mithilfe von Faktorenanalysen zu untersuchen und die Ergebnisse zu interpretieren. Die Grundidee des Experiments war es, verschiedene Straßenverkehrsszenen von möglichst vielen Personen anhand der in Studienteil 1 gefundenen Attribute bewerten zu lassen. Dazu wurden vorbereitend 32 der in Teil 1 angefertigten Audioaufnahmen von möglichst unterschiedlichen Straßenverkehrsszenen für die Nutzung als akustische Stimuli ausgewählt und für die Wiedergabe mit einer hohen Realitätsnähe aufbereitet. Zudem wurde ein einfach zu bedienender Fragebogen entwickelt, mit dem die Antworten der Personen erhoben werden konnten. Für die Untersuchung wurden 78 Personen rekrutiert. Jeder Versuchsperson wurde eine Auswahl von 15 der 32 Straßenverkehrsszenen präsentiert, die anhand der 59 intervallskalierten Attribute zu bewerten waren. Das Experiment wurde unter steter

technischer und methodischer Betreuung im Mixed Reality Lab der TU Berlin und UdK Berlin durchgeführt.

Im insgesamt 1140 Bewertungen umfassenden Datensatz wurde mithilfe einer explorativen Faktorenanalyse nach Strukturen gesucht, entlang derer die intendierte Reduktion der Itemanzahl vorgenommen werden konnte. Aus drei statistisch wahrscheinlichen Strukturen wurde in einem Expertengremium diejenige ausgewählt, die am besten den theoretischen Erwägungen und methodischen Anforderungen entsprach. Nachfolgend wurde in iterativen konfirmatorischen Faktorenanalysen entlang dieser 7-faktoriellen Struktur die Itemanzahl reduziert. Der finale Fragebogen enthält damit 21 Items, mit denen die Wahrnehmung von Straßenverkehrsgeräuschen erschöpfend, ökonomisch und dank der Faktorenstruktur auch trennscharf interpretierbar erhoben werden kann.

Auf der Grundlage dieser Daten wurden Regressionsmodelle entwickelt, die eine Vorhersage der mehrdimensionalen Wahrnehmung von Straßenverkehrsgeräuschen durch (psycho-)akustische Merkmale und Indikatoren erlauben. Diese Modelle verdeutlichen mehrfach die Relevanz von spezifischen Parametern, die zeitliche und spektrale Signaleigenschaften erfassen und über konventionelle Schalldruckpegelindikatoren hinausgehen. Damit stehen zur Vorhersage der verschiedenen Faktoren der Straßenverkehrsgeräuschwahrnehmung Berechnungsmodelle auf Basis instrumenteller Größen zur Verfügung, die in weiteren Untersuchungen evaluiert werden können. Diese Berechnungsmodelle, die auf im Experiment 2 gesammelten Daten basieren, konnten bei der Untersuchung zur perceptiven Wirkung von Lärminderungsmaßnahmen (s. Kap. 5) genutzt und überprüft werden. Das Arbeitsergebnis ermöglichte es, im dritten Studienteil Maßnahmen zur Lärminderung nicht nur auf ihre Wirksamkeit hin zu evaluieren, sondern auch ihre Wirkungsweise besser verstehen zu können.

In dritten Studienteil wurden in einer virtuellen Umgebung sechs verschiedene Maßnahmen – zwei Schallschutzwände und zwei Straßenbelagsvarianten als konventionelle Maßnahmen, sowie zwei Brunnen als innovative Ansätze – getestet. Als Zielgröße wurde untersucht, wie sich die Wahrnehmung des Straßenverkehrslärms qualitativ in Abhängigkeit von den Maßnahmen und in Bezug auf die Abwesenheit von Maßnahmen unterscheidet. Diese Zielgröße wurde durch den zuvor entwickelten Fragebogen mit sieben Skalen sowie einem Einzelitem operationalisiert. Es wurden vier verschiedenen Straßenverkehrsszenen bewertet, wobei in einer der Szenen eine Baseline und sämtliche Maßnahmen getestet wurden und in den weiteren drei Szenen jeweils die Baseline und eine Maßnahme in zwei Ausprägungen. In einer der Szenen wurde zusätzlich eine im Schalldruckpegel um 3 dB reduzierte Version der Baseline getestet, um die Reliabilität und Trennschärfe des Fragebogens explorativ zu beurteilen. Die 39 Versuchspersonen durchliefen jeweils alle der 17 verschiedenen Bedingungen und gaben nach jeder Szene ihre Einschätzungen auf dem 22 Items umfassenden Fragebogen an. Die Ergebnisse wurden deskriptiv anhand von Grafiken und inferenzstatistisch durch MANOVAs und Paarvergleiche ausgewertet.

Aus der zusammenfassenden Betrachtung der einzelnen Befunde ließen sich klare Erkenntnisse ableiten. Zunächst wurde offenkundig, dass die verschiedenen Straßenbeläge in der vorliegenden Studie, mutmaßlich aufgrund der sehr geringen Pegelunterschiede, einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Erlebungsqualität von

Straßenverkehrsgeräuschen hatten, während alle anderen Maßnahmen deutliche und voneinander unterschiedliche Wirkungen erzielten. Mit Abstand den stärksten Einfluss auf die Zielvariablen, insbesondere VALENZ, RISKANZ und Lästigkeit, hatten die Lärmschutzwände. Das entspricht einem intuitiv erwartbaren Ergebnis und spricht auch für eine Validität des Untersuchungsinstruments. Der Fakt, dass die Faktoren SCHÄRFE, KONSISTENZ und SCHWERE weitestgehend unbeeinflusst von der Anwesenheit der Schallschutzwände blieben, macht aber auch deutlich, dass Lärmempfinden facettenreich und keinesfalls eindimensional ist. Interessanterweise wurden zwei von drei dieser, von der Schallschutzwand nicht beeinflussten Facetten von der Geräuschkulisse der Brunnen angesprochen. Das Rauschen und Plätschern des Wassers sorgte offenbar dafür, dass die Versuchspersonen die Verkehrsszene als weniger schwer, dafür aber konsistenter und auch angenehmer empfanden. Das ist insofern bemerkenswert, als dass eine Steigerung der VALENZ auch ohne Pegelverringerung der Lärmquelle erzielt werden konnte. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt sichtbar in der Szene „Kreisel“, in welcher der Brunnen relativ zum Verkehr deutlich näher an der Hörposition platziert war, was sich zusätzlich in der Zielvariablen NÄHE widerspiegelt. Dieses Phänomen deutet darauf hin, dass ein naher Brunnen insbesondere bei weiter entferntem Verkehrslärm (in diesem Fall 20 m) aufgrund seiner Maskierungswirkung eine wirksame Maßnahme für eine positivere Einschätzung des akustischen Gesamtbilds sein könnte.

Die in Kapitel 4.6 entwickelten Messmodelle auf Basis instrumenteller Größen wiesen auch im Hinblick auf die Wirkung von Lärmschutzmaßnahmen eine gute Vorhersagequalität auf und bestätigten auch hier den Nutzen von (psycho-)akustischen Größen über konventionelle Pegelindikatoren hinaus.

Zusammenfassend zeigt die Studie, dass Menschen Lärm als unerwünschte Geräusche als einen Eindruck auf mehreren Dimensionen wahrnehmen, die interindividuell Bestand haben und gezielt angesprochen werden können. Für die Erhebung der in der Studie herausgearbeiteten, sieben Dimensionen wurde ein Fragebogen entwickelt und getestet, der in Zukunft eine trennscharfe Beurteilung des Lärmeindrucks abseits trivialer Faktoren ermöglichen wird. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass sich die Wahrnehmungsdimensionen zu einem gewissen Anteil anhand messbarer, psychoakustischer Parameter bestimmen lassen. Auf Grundlage der hierfür ermittelten Messmodelle kann auch der Mehrwert psychoakustischer Parameter gegenüber dem Schallpegel alleine genauer spezifiziert werden: So kann schon mit einer Verwendung von zwei bis drei zusätzlichen Parametern etwa 50% mehr Varianz in der von den Probanden bewerteten Lästigkeit von Verkehrsgeräuschen erklärt werden. Dieser Mehrwert gilt in gleicher Weise auch für die Vorhersage der Wirkung von Lärminderungsmaßnahmen. Die Ergebnisse können somit dazu genutzt werden, um die Unterschiede in der Wirksamkeit verschiedener Lärminderungsstrategien herauszustellen und die Wirkungsweise innovativer Ansätze, wie der aktiven Maskierung, besser zu verstehen. Ebenso können die beobachteten Zusammenhänge die gezielte Entwicklung von Lärmschutzmaßnahmen unterstützen, die bestimmte wahrnehmungsbezogene Aspekte, jenseits der globalen Lästigkeit des Höreindrucks, positiv beeinflussen. Denkbar wären hier weitere Maskierungsverfahren, deren Wirkung Merkmale wie die wahrgenommene SCHÄRFE oder SCHWERES abmildern und damit auch einen positiven Einfluss auf die VALENZ der Empfindung haben können.

Wir empfehlen, die in dieser Studie ermittelten Parameter und Berechnungsmodelle zur messtechnischen Beschreibung von Verkehrsgeräuschen in einer Folgestudie zu validieren. Eine solche Folgestudie sollte einen erheblich größeren Stimuluspool von Verkehrssituationen aufweisen, um die Generalisierbarkeit der Modelle zu belegen und um den Mehrwert im Hinblick auf eine Beschreibung dieser Geräusche genauer spezifizieren können. Auf Grundlage der jetzt vorliegenden Ergebnisse kann die Auswahl der infrage kommenden, psychoakustischen Parameter erheblich reduziert werden; gleichzeitig können die dafür erforderlichen Hörversuche mit dem jetzt vorliegenden Fragebogen als Messinstrument erheblich schneller durchgeführt werden.

## Literatur

- ALETTA, F., AXELSSON, Ö., XIE, H., ZHANG, Y., LAU, S.-K., TANG, S.-K., JAMBROŠIĆ, K., COENSEL, B., DE, BOSCH, K. VAN DEN, AUMOND, P., GUASTAVINO, C., LAVANDIER, C., FIEBIG, A., SCHULTE-FORTKAMP, B., SARWONO, J., SUDARSONO, A., ASTOLFI, A., NAGAHATA, K., JEON, J.-Y., JO, H.-I., CHIENG, J., GAN, W.-S., HONG, J.-Y., LAM, B., ONG, Z.-T., KOGAN, P., SILVA, E.S., MANZANO, J.V., YÖRÜKOĞLU, P. N. D., NGUYEN, T.L., & KANG, J. (2020). Soundscape assessment: towards a validated translation of perceptual attributes in different languages. *inter-noise 2020*, 23. – 26. August, E-Congress, Seoul, 3137-3146.
- ALETTA, F., & KANG, J. (2018). Towards an urban vibrancy model: A soundscape approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(8), 1712.
- ALETTA, FRANCESCO, ÖSTEN AXELSSON & JIAN KANG (2017). „Dimensions Underlying the Perceived Similarity of Acoustic Environments“. *Frontiers in Psychology* 8. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2017.01162>.
- ALETTA, F., KANG, J., & AXELSSON, Ö. (2016). Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models. *Landscape and Urban Planning*, 149, 65-74.
- ALÍAS, F., SOCORÓ, J. C. und SEVILLANO, X. (2016). A Review of Physical and Perceptual Feature Extraction Techniques for Speech, Music and Environmental Sounds. *Applied Sciences* 6(5). 143. <https://doi.org/10.3390/app6050143>.
- ANDRINGA, T. C., & VAN DEN BOSCH, K. A. (2013). Core affect and soundscape assessment: fore- and background soundscape design for quality of life. *inter-noise 2013*, 15. – 18. September, Innsbruck, 2273-2282.
- AURES, W. (1985). Der sensorische Wohlklang als Funktion psychoakustischer Empfindungsgrößen. *Acustica* 58, 282-290
- AXELSSON, Ö., NILSSON, M., & BERGLUND, B. (2010). A principal components model of soundscape perception. *Journal of the Acoustical Society of America*, 128(5), 2836-2846.
- BABISCH, W. (2008). Road traffic noise and cardiovascular risk. *Noise & Health*, 10, 27-33.
- BERGLUND, B., LINDVALL, T., & SCHWELA, D.H. (eds.) (1999). Guidelines for Community Noise. World Health Organization, Geneva, 1–159, <http://www.who.int/docstore/peh/noise/guidelines2.html>
- BILD, E., PFEFFER, K., COLER, M., RUBIN, O., & BERTOLINI, L. (2018). Public Space Users' Soundscape Evaluations in Relation to Their Activities. An Amsterdam-Based Study. *Frontiers in Psychology*, 9, 1-16. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.01593
- BOGDANOV, D., WACK, N., GÓMEZ, E., GULATI, S., HERRERA, P., MAYOR, O., ROMA, G., SALOMON, J., ZAPATA, J., & SERRA, X. (2013). Essentia: An audio analysis library for music information retrieval. *14th Conference of the International Society for Music Information Retrieval (ISMIR)*, 4 – 8 November, Curitiba, Brazil.
- 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.
- BRINKMANN, F., ASPÖCK, L., ACKERMANN, D., LEPA, S., VORLÄNDER, M., & WEINZIERL, S. (2019). A round robin on room acoustical simulation and auralization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(4), 2746–2760.
- BROSSIER, P.M. (2006). The audio library at MIREX 2006. *Synthesis. Contribution to The Music Information Retrieval Evaluation eX-change (MIREX)*, 11-12 October 2006
- BULLOCK, J. (2007). Libxtract: A lightweight library for audio feature extraction. *International Computer Music Conference (ICMC)*, 27 – 31 August, Copenhagen, Denmark.

- BUNDES-IMMISSIONSSCHUTZGESETZ in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 1 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873) geändert worden ist.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (BMVI) (Hrsg.) (2016). Statistik des Lärmschutzes an Bundesfernstraßen 2016.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (BMVI). Lärmvorsorge und Lärmsanierung an Bundesfernstraßen. Verfügbar unter [https://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Laerm-Umweltschutz/Laermvorsorge-Laermsanierung-Bundesfernstrassen.html](https://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Laerm-Umweltschutz/Laermvorsorge-Laermsanierung-Bundesfernstrassen/Laermvorsorge-Laermsanierung-Bundesfernstrassen.html) [letzter Zugriff: 01.07.2021]
- CACLIN, A., MCADAMS, S., SMITH, B. K., & WINSBERG, S. (2005). Acoustic correlates of timbre space dimensions: A confirmatory study using synthetic tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(1), 471–482.
- CAIN, R., JENNINGS, P., & POXON, J. (2013). The development and application of the emotional dimensions of a soundscape. *Applied Acoustics*, 74(2), 232-239.
- CERWÉN, G. (2017). *Sound in Landscape Architecture A Soundscape Approach to Noise*. Dissertation, Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp, Schweden.
- CHUDALLA, M., STRIGARI, M., & WAGNER, P. (2020). Minderungsmöglichkeiten von verkehrsbedingten Geräuschemissionen und Lärmschuttimmissionen in Luft (SPT 205). In: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2020). *Verkehr und Infrastruktur umweltgerecht gestalten. Ergebnisbericht des Themenfeldes 2 im BMVI-Expertenetzwerk für die Forschungshase 2016-2019*, 81 – 98. DOI: 10.5675/ExpNBMVI2020.2020.13
- CIK, M., FALLST, K., RAGGAM, R.B., MARTH, E., GALLASCH, E., LACKNER, A., & FELLENDORF, M. (2009). *Traffic noise annoyance on road and rail (TNAR) in an experimental laboratory setup*, NAG/DAGA 2009, Rotterdam, Niederlande.
- DAVIES, W. J., BRUCE, N. S., & MURPHY, J. E. (2014). Soundscape reproduction and synthesis. *Acta Acustica United with Acustica*, 100(2), 285-292.
- DE COENSEL, B. D., VANWETSWINKEL, S., & BOTTELDOOREN, D. (2011). Effects of natural sounds on the perception of road traffic noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(4), 148-153. DOI: 10.1121/1.3567073
- Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA) (Hrsg.) (2008). *Kompendium zur Durchführung von Hörversuchen in Wissenschaft und industrieller Praxis*.
- Dernbach, G., Lykartsis, A., Sievers, L., & Weinzierl, S. (2020). Acoustic Identification of Flat Spots On Wheels Using Different Machine Learning Techniques. In: Fortschritte der Akustik - DAGA 2020: 46. *Deutsche Jahrestagung für Akustik*. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 367–370. DOI: 10.14279/depositonce-9992
- DIN (2021). *Jahresbericht 2020*. DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS), DIN e. V., Berlin. Verfügbar unter <https://www.din.de/resource/blob/234398/1c48c23214338e856cf8a1ceebabf971/nals-jahresbericht-2020-data.pdf> [letzter Zugriff: 07.07.2021]
- DIN 45631:1991. *Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum. Verfahren nach E. Zwicker*. DIN, Beuth Verlag, Berlin
- DIN 45631/A1:2010. *Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum. Verfahren nach E. Zwicker. Anhang 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche*. DIN, Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 45645-2:2012. *Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen - Teil 2: Ermittlung des Beurteilungspegels am Arbeitsplatz bei Tätigkeiten unterhalb des Pegelbereiches der Gehörgefährdung*. DIN, Beuth Verlag, Berlin.

- DIN 45680:1997. *Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschmissionen in der Nachbarschaft*. DIN, Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 45681:2005. *Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen*. DIN, Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 45692:2009. *Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe*. Deutsche Institut für Normung. DIN, Beuth Verlag, Berlin.
- DIN ISO/TS 12913-2:2018. *Akustik – Soundscape – Teil 2: Anforderungen an die Datenerhebung und die Dokumentation*. DIN, Beuth Verlag, Berlin.
- ECMA TR/108 (2019). *Proposal of new parameters. T-TNR and T-PR for total evaluation of multiple tones*, 1<sup>st</sup> edition.
- ECMA-418-2 (2nd Edition). *Psychoacoustic metrics for ITT equipment, Part 2: Models based on human perception*, December 2022.
- ELLERMEIER, W., EIGENSTETTER, M., ZIMMER, K. (2001). Psychoacoustic correlates of individual noise sensitivity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109, 1464-1473.
- ENGEL, M.S., FIEBIG, A., PFAFFENBACH, C., FELS, J. (2018). Review of socio-acoustic surveys for soundscape studies. *Current Pollution Reports*, 4, 220-239.
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2002). *Richtlinie 2002/49/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm*. Verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2002:189:0012:0025:DE:PDF> [letzter Zugriff: 07.07.2021]
- FAN, J., THOROGOOD, M. & PASQUIER, P. (2017). Emo-soundscapes: A dataset for soundscape emotion recognition. In *2017 Seventh International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII)*, 196–201. <https://doi.org/10.1109/ACII.2017.8273600>.
- FASTL, H. (1991). Beurteilung und Messung der äquivalenten Dauerlautheit. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 38, 98-103.
- FASTL, H. & ZWICKER, E. (2007). *Psychoacoustics. Facts and Models*. Springer: Heidelberg, Berlin.
- FIEBIG, A. (2020). Die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Lärmbekämpfung aus psychoakustischer Sicht. *DAGA 2020: 46. Deutsche Jahrestagung für Akustik*. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.
- FIEBIG, A., GUIDATI, S., & GOEHRKE, A. (2009). *Psychoacoustic Evaluation of Traffic Noise*. NAG/DAGA 2009, 23 – 26 March, Rotterdam, Niederlande.
- FIEBIG, A., MARLA, P., & SOTTEK, R. (2012). Noise of electric and combustion-powered scooters and resulting annoyance. *Euronoise 2012*, 10 – 14 June, Prag, Tschechische Republik.
- FIEBIG, A. & SCHULTE-FORTKAMP, B. (2023). How to put soundscape into practice, 313-330, In: SCHULTE-FORTKAMP, B., FIEBIG, A., SISNERUS, J.A., POPPER, A.N. & FAY, R.R. (eds). *Soundscapes: Humans and their acoustic environment*, Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-22779-0>
- FIEBIG, A. & SOTTEK, R. (2015). Contribution of peak events to overall loudness. *Acta Acustica united with Acustica*, 101 (6), 1116–1129.
- FIELDS, J. M., DE JONG, R. G., GJESTLAND, T., FLINDELL, I. H., JOB, R. F. S., KURRA, S., LERCHER, P., VALLET, M., YANO, T., GUSKI, R., FELSCHER-SUHR, U., & SCHUMER, R. (2001). Standardized general-purpose noise reaction questions for

- community noise surveys: Research and a recommendation. *Journal of Sound and Vibration*, 242(4), 641-679.
- GALBRUN, L. & ALI, T.T. (2012). Perceptual assessment of water sounds for road traffic noise masking. *Acoustics 2012*, 23 – 27 April, Nantes, France.
- GENUIT, K., SCHULTE-FORTKAMP, B. & FIEBIG A. (2023). Psychoacoustics in soundscape research, 157-184, In: SCHULTE-FORTKAMP, B., FIEBIG, A., SISNERUS, J.A., POPPER, A.N. & FAY, R.R. (eds). *Soundscapes: Humans and their acoustic environment*, Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-22779-0>
- GENUIT, K., SOTTEK, R., & FIEBIG, A. (2009). Comparison of loudness calculation procedures in the context of different practical applications. *inter-noise 2009*, 23 – 26 August, Ottawa, Kanada.
- GIANNAKOPOULOS, T., SIANTIKOS, G., PERANTONIS, S., VOTSI, N. E., & PANTIS, J. (2015, July). Automatic soundscape quality estimation using audio analysis. In *Proceedings of the 8th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments* (pp. 1-9). <https://doi.org/10.1145/2769493.2769501>
- GUIDATI, S. (2008). Auralisation and psychoacoustic evaluation of traffic noise scenarios. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5), 3027-3027. <https://doi.org/10.1121/1.2932664>
- GUSKI, R. (1999). Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise Health*, 1(3), 45-56.
- HÄNISCH, F. & HEIDEBRUNN, F. (2020). Passive Schallschutzmaßnahmen – Akustische Wirksamkeit. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, Heft V 344. Fachverlag NW: Bergisch Gladbach.
- HARRIET, S. (2013). *Application of auralisation and soundscape methodologies to environmental noise*. Dissertation, University of York.
- HASTIE, T., QIAN, J., & TAY, K. (2023). An Introduction to glmnet. Verfügbar unter <https://glmnet.stanford.edu/articles/glmnet.html> [letzter Zugriff: 04.04.2023]
- HEMMECKE, J. (2012). *Handbuch der Repertory Grid Technik*. Verfügbar unter [http://www.hemmecke.de/jeannette/material/HemmeckeJeannette\\_Handbuch-Repertory-Grid-Technik\\_2012.pdf](http://www.hemmecke.de/jeannette/material/HemmeckeJeannette_Handbuch-Repertory-Grid-Technik_2012.pdf) [letzter Zugriff: 17.09.2021]
- HOFFMANN, H. (1993). *0 Dezibel + 0 Dezibel = 3 Dezibel: Einführung in die Grundbegriffe und die quantitative Erfassung des Lärms*. 6., Überarb. und Aktualisierte Aufl. Berlin: Schmidt.
- HONG, J. Y., ONG, Z. T., LAM, B., OOI, K., GAN, W. S., KANG, J., FENG, J. & TAN, S. T. (2020). Effects of adding natural sounds to urban noises on the perceived loudness of noise and soundscape quality. *Science of the Total Environment*, 711, 1-13. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134571
- ISHIYAMA, T. & HASHIMOTO, T. (2000). The impact of sound quality on annoyance caused by road traffic noise: an influence of frequency spectra on annoyance. *International Journal of Automotive Engineering*, 21(2), 225–230.
- ISING, H., PLATH, P., REBENTISCH, E., & SUST, C. A. (1996a). *Wirkung von Lärm auf das Gehörorgan – Effekte, Mechanismen, Prävention*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin BAuA – Arbeitsbeitswissenschaftliche Erkenntnisse, Nr. 97, Dortmund.
- ISING, H., SUST, C.A., & REBENTISCH, E. (1996b). *Lärmbeurteilung - Extra-aurale Wirkungen. Auswirkungen von Lärm auf Gesundheit, Leistung und Kommunikation*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin BAuA – Arbeitsbeitswissenschaftliche Erkenntnisse, Nr. 98, Dortmund.
- ISO 532-1:2017. *Acoustics — Methods for Calculating Loudness — Part 1: Zwicker Method*. International Organization of Standardization, Genf.

- ISO 12913-1:2014. *Acoustics—Soundscape—Part 1: Definition and Conceptual Framework*. International Organization for Standardization, Genf.
- ISO/IEC 15938-4:2002. *Information technology — Multimedia content description interface — Part 4: Audio*. International Organization for Standardization, Genf.
- KANG, J., ALETTA, F., GJESTLAND, T. T., BROWN, L. A., BOTTELDOOREN, D., SCHULTE-FORTKAMP, B., LERCHER, P., VAN KAMP, I., GENUIT, K., FIEBIG, A., COELHO, J. L. B., MAFFEI, L., & LAVIA, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. *Building and environment*, 108, 284-294. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.08.011
- KANG, J., ALETTA, F., OBERMAN, T., ERFANIAN, M., KACHLICKA, M., LIONELLO, M., & MITCHELL, A. (2019). Towards soundscape indices. *23rd International Congress on Acoustics*, 9 – 13 September, Aachen, Germany, 2488-2495.
- KANG, J., CHOURMOUZIADOU, K., SAKANTAMIS, K., WANG, B., & HAO, Y. (Herausgeber) (2013). *Soundscape of European cities and landscapes*. COST TUD Action TD-0804. E-Book. <http://soundscape-cost.org/index.php/32-publications/62-final-e-book-published> [letzter Zugriff: 17.09.2021]
- KANG, J. & HAO, Y. (2013). Soundscape of waterscape and square on the Sheffield Gold Route. *COST TD0804 Final Conference: Soundscape of European cities and landscapes*. 22 March, Merano, Italy.
- KANG, J., & ZHANG, M. (2010). Semantic differential analysis of the soundscape in urban open public spaces. *Building and Environment*, 45(1), 150-157.
- KEILHACKER, P. (2013). *Subjektive Bewertung von Lärminderungsmaßnahmen mittels Kategorien- und Verhältnisskalierung*. Dissertation, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt.
- KELLY, G. A. (1955). *The psychology of personal constructs*. (Vol. 1 & 2). New York: Norton.
- KRZYWICKA, P. & BYRKA, K. (2020). The Effect of Animate-Inanimate Soundscapes and Framing on Environments' Evaluation and Predicted Recreation Time. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23), 9086. DOI:10.3390/ijerph17239086
- LAND BRANDENBURG, Ministerium für Stadtentwicklung, Wohnen und Verkehr des Landes Brandenburg; Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg (Hrsg.) (2001): *Städtebauliche Lärmfibel. Hinweise für die Bauleitplanung*. Landesamt für Verbraucherschutz und Landwirtschaft: Frankfurt
- LARTILLOT, O. & TOIVAINEN, P. (2007). A Matlab toolbox for musical feature extraction from audio. *International conference on digital audio effects*, 10 – 15 September, Bordeaux, France.
- LENHARD, W. & LENHARD, A. (2016). *Berechnung von Effektstärken*. Abgerufen unter: <https://www.psychometrica.de/effektstaerke.html>. Psychometrica. DOI: 10.13140/RG.2.2.17823.92329
- LEPA, S., HERZOG, M., STEFFENS, J., SCHOENROCK, A., & EGERMANN, H. (2020). A computational model for predicting perceived musical expression in branding scenarios. *Journal of New Music Research*, 49(4), 387–402.
- LERCH, A. (2012). *An Introduction to Audio Content Analysis: Applications in Signal Processing and Music Informatics*. 1st Aufl. Wiley-IEEE Press.
- LERCHER, P., & SCHULTE-FORTKAMP, B. (2013). Soundscape of European cities and landscapes—harmonising. *Soundscape of European Cities and Landscapes*. Oxford: Soundcape COST TUD Action TD0804, 120-127.

- LEUNG, T. M., CHAU, C. K., TANG, S. K., & XU, J. M. (2017). Developing a multivariate model for predicting the noise annoyance responses due to combined water sound and road traffic noise exposure. *Applied Acoustics*, 127, 284-291.
- LINDSAY, A. T. & HERRE, J. (2001). MPEG-7 and MPEG-7 Audio. An Overview. *Journal of the Audio Engineering Society*, 49(7/8), 589–594.
- LIONELLO, M., ALETTA, F., & KANG, J. (2020). A systematic review of prediction models for the experience of urban soundscapes. *Applied Acoustics*, 170, 107479. DOI: 10.1016/j.apacoust.2020.107479
- LUNDÉN, P., AXELSSON, Ö. & HURTIG, M. (2016). On Urban Soundscape Mapping: A Computer Can Predict the Outcome of Soundscape Assessments, 4725–32. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-27615>.
- MATHIEU, B., ESSID, S., FILLON, T., PRADO, J., & RICHARD, G. (2010). YAAFE, an Easy to Use and Efficient Audio Feature Extraction Software. In *11th Conference of the International Society for Music Information Retrieval (ISMIR)*, 441–446.
- MCENNIS, D., MCKAY, C., FUJINAGA, I., & DEPALLE, P. (2005). jAudio: A feature extraction library. In 6<sup>th</sup> International Conference on Music Information Retrieval, 11 -15 September, London, UK.
- MCFEE, B., RAFFEL, C., LIANG, D., ELLIS, D. P., MCVICAR, M., BATTENBERG, E., & NIETO, O. (2015). librosa: Audio and music signal analysis in python. *14th Python in Science Conference (SciPy 2015)*, 6 – 12 July, Austin, Texas.
- MCKENNEL, A. C. (1973). Psycho-social factors in aircraft noise annoyance. *Proceedings of the International Congress on Noise as a Public Health Problem*. 13 – 18 May, Dubrovnik, Yugoslavia.
- MEHRABIAN, A., RUSSELL, J.A. (1974). An approach to environmental psychology. MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London
- MEYER, J., & ELKO, G. (2002). A highly scalable spherical microphone array based on an orthonormal decomposition of the soundfield. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 13 – 17 May, Orlando, USA.
- MOFFAT, D., RONAN, D., & REISS, J. D. (2015). An evaluation of audio feature extraction toolboxes. *18<sup>th</sup> International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-15)*. 30 November – 3 December, Trondheim, Norway.
- MOSHONA, C., LEPA, S. & FIEBIG, A. (2023). Optimization strategies for the German version of the soundscape affective quality instrument, *Applied Acoustics*, 207, 109338, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109338>.
- MÜLLER, M., TELLE, A., & FIEBIG, A. (2015). Psychoakustische Wirkung von Fahrbahnmarkierungen. In Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.). *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 116.
- MÜLLER, M. & EWERT, S. (2011). Chroma Toolbox: MATLAB implementations for extracting variants of chroma-based audio features. *12th International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR)*, 24 – 28 October, Miami, USA.
- MÜNDEL, T., KRÖLLER-SCHÖN, S., OELZE, M., GORI, T., SCHMIDT, F. P., STEVEN, S., HAHAD, O., RÖÖSLI, M., WUNDERLI, J.-M., DAIBER, A., SØRENSEN, M. (2020). Adverse Cardiovascular Effects of Traffic Noise with a Focus on Nighttime Noise and the New WHO Noise Guidelines, *Annual Review of Public Health* 41 (1), 309-328, DOI: 10.1146/annurev-publhealth-081519-062400
- NIELBO, F. L., STEELE, D. & GUASTAVINO, C. (2013). Investigating soundscape affordances through activity appropriateness. *Proceedings of Meetings on Acoustics (ICA 2013)*, 2 – 7 June, London, UK. DOI: 10.1121/1.4800502

- NIEMANN, H., HAMMERSEN, F., & LAUßMANN, D. L. (2014). Ergebnisse der GEDA-Studie 2012. Berlin: Robert Koch-Institut. *GBE kompakt*.
- NILSSON, M.E., ANDÉHN, & M., LESNA, P. (2008). Evaluating roadside noise barriers using an annoyance-reduction criterion. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(6), 3561-3567.
- NILSSON, M.E. & BERGLUND, B. (2006). Noise annoyance and activity disturbance before and after the erection of a roadside noise barrier. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(4), 2178-2188.
- NILSSON, M.E., ALVARSSON, J., EKMAN, M.R., & BOLIN, K. (2010). Auditory masking of wanted and unwanted sounds in a city park. *Noise Control Engineering Journal*, 58(5), 524-531. DOI: 10.3397/1.3484182
- OEHME, A. (2013). *Ästhetisches Verständnis und ästhetische Wertschätzung von Automobildesign. Eine Frage der Expertise*. Dissertation, Universität Potsdam. Verfügbar unter: <http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2013/6201/> [Letzter Zugriff: 08.07.2021]
- OKOKON, E. O., YLI-TUOMI, T., TURUNEN, A. W., TIITTANEN, P., JUUTILAINEN, J., & LANKI, T. (2018). Traffic noise, noise annoyance and psychotropic medication use. *Environment International*, 119, 287-294.
- ORBAN, E., MCDONALD, K., SUTCLIFFE, R., HOFFMANN, B., FUKS, K. B., DRAGANO, N., VIEHMANN, A., ERBEL, R., JÖCKEL, K.-H., PUNDT, N., & MOEBUS, S. (2016). Residential Road Traffic Noise and High Depressive Symptoms after Five Years of Follow-Up: Results from the Heinz Nixdorf Recall Study. *Environmental Health Perspectives*, 124(5), 578-585.
- PAYNE, S. R. (2013). The production of a Perceived Restorativeness Soundscape Scale. *Applied Acoustics*, 74, 255–263. DOI: 10.1016/j.apacoust.2011.11.005
- PAYNE, S. R. & GUASTAVINO, C. (2018). Exploring the validity of the Perceived Restorativeness Soundscape Scale: A psycholinguistic approach. *Frontiers in Psychology*, 9, 2224.
- PAPENFUS, T., FIEBIG, A., & GENUIT, K. (2011). Akustische Auswirkungen von Lichtsignalanlagen und Kreisverkehren. In Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.). *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 1053.
- PEETERS, G. (2004). A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project. *CUIDADO IST Project Report*, 54(0), 1–25.
- PEETERS, G., GIORDANO, B. L., SUSINI, P., MISDARIIS, N., & MCADAMS, S. (2011). The timbre toolbox: Extracting audio descriptors from musical signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(5), 2902–2916.
- POPP, C., EGGERS, S., HEIDEBRUNN, F., & CORTES, N. (2021). Verkehrsträgerübergreifende Lärmkumulation in komplexen Situationen. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, Heft V 344. Fachverlag NW: Bergisch Gladbach.
- RÄDSTEN-EKMAN, M., AXELSSON, Ö., & NILSSON, M.E. (2013). Effects of Sounds from Water on Perception of Acoustic Environments Dominated by Road-Traffic Noise. *Acta Acustica United With Acustica*, 99, 218-225. DOI 10.3813/AAA.918605
- RAWLINSON, H., SEGAL, N., & FIALA, J. (2015). Meyda: an audio feature extraction library for the web audio api. *The 1st web audio conference (WAC)*, 26 – 28 January, Paris, France.
- RITTERSTAEDT, U. & VOGT-SÄDLER, D. (2014). Psychoakustische Bewertung eines offenporigen Asphalts. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2014*, 10 – 13 March, Oldenburg.
- ROßBERG, D. & GUIDATI, S. (2008). Neue Methoden für die psychoakustische Bewertung von Verkehrsgeräuschen. *Lärmbekämpfung*, 3, 26–32.

- SCHLITTENLACHER, J., FASTL, H., HASHIMOTO, T., KUWANO, S., & NAMBA, S. (2012). Differences of loudness algorithms across the frequency spectrum. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2012*, 19 – 22 March, Darmstadt.
- SCHLITTENLACHER, J., HASHIMOTO, T., FASTL, H., NAMBA, S., KUWANO, S., & HATANO, S. (2011). Loudness of pink noise and stationary technical sounds. *inter-noise 2011*, 4 – 7 September, Osaka, Japan.
- SCHLITTENLACHER, J., HASHIMOTO, T., KUWANO, S., & NAMBA, S. (2017). Overall judgment of loudness of time-varying sounds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 142(4), 1841 – 1847.
- SCHRÖDER, D. & VORLÄNDER, M. (2011). RAVEN: A real-time framework for the auralization of interactive virtual environments. *Forum Acusticum*, 27 June – 1 July, Aalborg.
- SCHUBERT, E. & WOLFE, J. (2006). Does timbral brightness scale with frequency and spectral centroid? *Acta Acustica United with Acustica*, 92(5), 820–825.
- SCHULTE-FORTKAMP, B. (2013). Soundscape-focusing on resources. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 19(1), 2 – 7 June, Montreal, Canada.
- SCHULTE-FORTKAMP, B. & JORDAN, P. (2023). Soundscape. The holistic understanding of acoustic environments, 49-79, In: SCHULTE-FORTKAMP, B., FIEBIG, A., SISNERUS, J.A., POPPER, A.N. & FAY, R.R. (eds). Soundscapes: Humans and their acoustic environment, Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-22779-0>
- SECHZEHNTE VERORDNUNG ZUR DURCHFÜHRUNG DES BUNDES-IMMISSIONSSCHUTZGESETZES (Verkehrslärmschutzverordnung-16. BImSchV), letzte Änderung vom 4. November 2020 (BGBl. I S. 2334)
- SLAVIK, K. M., & WEINZIERL, S. (2008). Wiedergabeverfahren. In S. Weinzierl (Hrsg.). *Handbuch der Audiotechnik*, 609–685, Springer: Berlin, Heidelberg.
- SOTTEK, R. (2014). Psychoakustische Bewertung von Fahrzeuggeräuschen. *Fortschritte der Akustik – DAGA 2014*, 10 – 13 March, Oldenburg.
- STEFFENS, J., STEELE, D., & GUASTAVINO, C. (2017). Situational and person-related factors influencing momentary and retrospective soundscape evaluations in day-to-day life. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(3), 1414–1425.
- STEVENS, F., MURPHY, D. T., & SMITH, S. L. (2016). Soundscape preference rating using semantic differential pairs and the self-assessment manikin. *Sound and Music Computing 2016 (SMC2016)*, 31 August – 3 September, Hamburg, Germany.
- STREICH, S. (2006). Music complexity: a multi-faceted description of audio content. Barcelona, Spain: Universitat Pompeu Fabra. Verfügbar unter <https://www.semanticscholar.org/paper/Music-complexity%3A-a-multi-faceted-description-of-Streich/4488eca5f335f30dfd2e18b322d9e94e03183684> [letzter Zugriff am 04.04.2023]
- THYES, C. (2015). *Akustische Maskierung mittels aktiver Strukturen*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- TORIJA, A.J. & FLINDELL, I.H. (2014). Differences in subjective loudness and annoyance depending on the road traffic noise spectrum. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(1), 1-4. DOI: 10.1121/1.4842456
- TZANETAKIS, G. & COOK, P. (2000). Marsyas: A framework for audio analysis. *Organised sound* 4(3), 169–175.
- UMWELTBUNDESAMT (2019) (Hrsg.) *WHO-Leitlinien für Umgebungslärm für die Europäische Region: lärmfachliche Bewertung der neuen Leitlinien der Weltgesundheitsorganisation für Umgebungslärm für die Europäische Region*. Positionspapier. Verfügbar unter

- [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/190805\\_uba\\_pos\\_who\\_umgebungslarm\\_bf\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/190805_uba_pos_who_umgebungslarm_bf_0.pdf) [Letzter Zugriff 09.07.2021]
- VABALAS, ANDRIUS, EMMA GOWEN, ELLEN POLIAKOFF & ALEXANDER J. CASSON (2019). „Machine Learning Algorithm Validation with a Limited Sample Size“. *PLoS One* 14, Nr. 11: e0224365. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224365>.
- VAN RENTERGHEM, T. (2019). Towards explaining the positive effect of vegetation on the perception of environmental noise. *Urban Forestry & Urban Greening*, 40, 133-144.
- VILLANUEVA-RIVERA, L. J., PIJANOWSKI, B. C., DOUCETTE, J., & PEKIN, B. (2011). A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. *Landscape ecology*, 26, 1233-1246. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9636-9>
- VIERUNDZWANZIGSTE VERORDNUNG ZUR DURCHFÜHRUNG DES BUNDES-IMMISSIONSSCHUTZGESETZES (Verkehrslärmschutzverordnung-24. BImSchV), vom 4. Februar 1997 (BGBl. I S. 2329)
- VIOLLON, S. & LAVANDIER, C. (2000). Multidimensional assessment of the acoustic quality of urban environments. *inter-noise 2000*, 27 – 30 August, Nice, France.
- WALLAS, A., ERIKSSON, C., GRUZIEVA, O., LIND, T., PYKO, A., SJÖSTRÖM, M., ÖGREN, M. & PERSHAGEN, G. (2018). Road traffic noise and determinants of saliva cortisol levels among adolescents. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 221(2), 276-282.
- WEINZIERL, S., LEPA, S. & ACKERMANN, D. (2018). A measuring instrument for the auditory perception of rooms. The Room Acoustical Quality Inventory (RAQI). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(3), 1245–1257.
- WEINZIERL, S., LEPA, S., SCHULTZ, F., DETZNER, E., VON COLER, H., & BEHLER, G. (2018). Sound power and timbre as cues for the dynamic strength of orchestral instruments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(3), 1347–1355.
- WIRTZ, M. A. Wirtz (Hrsg.) (2017.) Dorsch. Lexikon der Psychologie. Hogrefe AG (Bern).
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) (2011). *Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe*. Bonn: WHO European Centre for Environment and Health.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION REGIONAL BÜRO FÜR EUROPA (2018). Leitlinien für Umgebungslärm für die europäische Region, Zusammenfassung, 2018. Verfügbar unter [https://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0011/383924/noise-guidelines-exec-sum-ger.pdf](https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0011/383924/noise-guidelines-exec-sum-ger.pdf) [Letzter Zugriff 09.07.2021].
- WU, J., ZOU, C., HE, S., SUN, X., WANG, X., & YAN, Q. (2019). Traffic noise exposure of high-rise residential buildings in urban area. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(9), 8502-8515.
- XU, W., ZHANG, X., YAO, L., XUE, W., & WEI, B. (2020). A multi-view CNN-based acoustic classification system for automatic animal species identification. *Ad Hoc Networks*, 102, 102115.
- YADAV, S., KEERTHANA, M., GOPE, D., & GHOSH, P. K. (2020). Analysis of acoustic features for speech sound based classification of asthmatic and healthy subjects. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 4 – 8 May, virtual, Barcelona, Spain.
- ZHANG, M. & KANG, J. (2007). Towards the evaluation, description, and creation of soundscapes in urban open spaces. *Environment and Planning B-Planning & Design*, 34(1), 68-86.
- ZHANG, X., WANG, K., WANG, Y., SHEN, Y., & HU, H. (2017). An improved method of rail health monitoring based on cnn and multiple acoustic emission events. *IEEE International*

*Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 22 – 25 May, Turin, Italy.

- ZIEGLER, P.-M. (21.07.2008). *Ohrenschmaus: Kölner Orgelkonzert live in Berliner Hightech-Hörsaal erleben*. Verfügbar unter <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Ohrenschmaus-Koelner-Orgelkonzert-live-in-Berliner-Hightech-Hoersaal-erleben-188715.html>. [Letzter Zugriff: 02.07.2021]
- ZIMMER, K. & ELLERMEIER, W. (1998). Ein Kurzfragebogen zur Erfassung der Lärmempfindlichkeit. *Umweltpsychologie*, 2 (2), 54-63.
- ZWICKER, E., & FASTL, H. (2013). *Psychoacoustics: Facts and models* (Vol. 22). Springer Science & Business Media.

## Bilder

Bild 2.1 Spektrogramm (oben) und aus dem Spektrogramm berechneter Spectral Centroid (unten) für das Geräusch von anfahrenen und

beschleunigenden Fahrzeugen an einer auf grün schaltenden Ampel

Bild 2.2: Mixed Reality Design Lab von TU Berlin und UdK Berlin. Installation zur Synthese von virtuellen oder augmentierten akustischen Realitäten durch ein Higher-Order-Ambisonics-Lautsprechersystem

Bild 3.1 Aufnahaufbau (links) und Aufnahmeorte (rechts) der Straßenverkehrsszenen

Bild 3.2 Beispiele für die Bandbreite an aufgenommenen Straßenverkehrssituationen

Bild 3.3 Versuchsdurchführung im Sweetspot des Mixed Reality Design Lab:

Technikleitung (links), Proband im Sweet Sport (rechts)

Bild 3.4 Grafische Darstellung des Versuchsablaufes

Bild 3.5 Prozentuale Verteilung der LEF-K-Gesamtwerte für die Stichprobe (N=22)

Bild 3.6 Anteil der Einzelattribute an insgesamt genannten Attributen pro Versuchsperson

Bild 3.7 Anteil der Attributnennungen in %, häufigste Adjektive

Bild 3.8 Häufigste Attribute aus den Kategorien Valenz (oben), Geräuschcharakter (links) und Lautstärke (rechts)

Bild 3.9 Häufigste Attribute aus den Kategorien Aktivierung (links) und Vordergrund/Hintergrund (rechts)

Bild 3.10 Häufigste Attribute aus den Kategorien Zeitstruktur (o. links), Dominanz (o. rechts), Raum (u. links) und Vertrautheit (u. rechts)

Bild 3.11 Häufigste Attribute aus den Kategorien Ereignisfülle (o. links), audio-visuell (o. rechts) und Klarheit (u. mittig)

Bild 4.1 Schematische Darstellung der Hörsituation. Vier Sitzplätze äquidistant um 90° verschoben Rund um den Sweet-Spot des Übertragungssystems

Bild 4.2 Finale Bewertungsansicht: Anordnung der Items auf der rechten Seite des Schiebereglers

Bild 4.3 Grafische Darstellung des Versuchsablaufes

Bild 4.4 Prozentuale Verteilung der LEF-K-Gesamtwerte für die Stichprobe (N=78)

Bild 4.5 Häufigkeitsverteilung der Stimuli

Bild 4.6 Parallel Analysis Scree Plots

Bild 5.1 Aufnahmeorte Brücke, Kreisel, Ampelkreuzung und Autobahn (v. links oben nach rechts unten)

Bild 5.2 Wirkung einer Schallschutzwand im mathematischen Modell

Bild 5.3 Zur Simulation der Auswirkung verschiedener Deckschichten verwendete Differenzfilter für Belag A und Belag B . Als Referenzbelag wurde hier die in [Heft V 333] enthaltene Deckschicht Asphaltbeton AB 0/11 verwendet .

Bild 5.4 Darstellung Frequenzspektrum des Gesamtsignals in Hertz über die Dauer des Signals in s, Originalaufnahme, Brunnenvariation A und B (von links nach rechts)

Bild 5.5 Beispielhafte Videomanipulation in der Straßenverkehrsszene Kreisel

Bild 5.6 Darstellung der modular zusammengestellten Max/MSP Anwendung

Bild 5.7 Bewertungsmaske mit einer Auswahl der zu bewertenden Items

Bild 5.8 Versuchsaufbau im Mixed Reality Design Lab der TU Berlin

Bild 5.9 Grafische Darstellung des Versuchsablaufes

Bild 5.10 Prozentuale Verteilung der LEF-K-Gesamtwerte für die Stichprobe (N=39)

Bild 5.11 Mittelwerte aller Versuchsbedingungen der Szene „Kreisel“ auf den einzelnen Zielvariablen

Bild 5.12 Mittelwerte aller Versuchsbedingungen der Szene „Brücke“ auf den einzelnen Zielvariablen

Bild 5.13 Mittelwerte aller Versuchsbedingungen der Szene „Ampelkreuzung“ auf den einzelnen Zielvariablen

Bild 5.14 Mittelwerte der Versuchsbedingungen der Szene „Autobahn“ auf den einzelnen Zielvariablen

Bild 5.15 Standardisierte Vorhersageergebnisse des Modells für Schärfe 'S2' vs. Attributbewertungen der Versuchspersonen für die 17 Stimuli (Sample) (jeweils arithmetischer Mittelwert)

## Tabellen

Tabelle 2.1 Software-Toolboxes zur Berechnung von Higher Level Audio Features

Tabelle 2.2 Interdisziplinäre Lärmschutzmaßnahmen des Landes Brandenburg

Tabelle 3.1 Aspekte und Ausprägungen für die Aufnahme der audio-visuellen Straßenverkehrsszenen

Tabelle 3.2 Kategorien aus der Literatur

Tabelle 3.3 Weitere beobachtete Kategorien neben den etablierten Kategorien aus Tabelle 2

Tabelle 3.4 Anteil der Attributnennungen in den Kategorien

Tabelle 4.1 Kategorisierung aller genutzten Items

Tabelle 4.2 Faktorenstruktur und Itemauswahl für den Fragebogen zum Erleben von Straßenlärm

Tabelle 4.3 Mittelwertunterschiede zwischen Experten- und Laienbewertungen

Tabelle 4.4 Sammlung gemessener und berechneter akustischer Indikatoren

Tabelle 4.5 Lineare Modelle generiert mit LASSO und Nested Resampling

Tabelle 4.6 Lineare Modelle für die Prädiktion des Items 'lästig' generiert mit LASSO und Nested Re-sampling

Tabelle 5.1 Eigenschaften der verwendeten Stimuli

Tabelle 5.2 Beschreibung der akustischen Maßnahmen anhand ausgewählter Kenngrößen

Tabelle 5.3 Einordnung der genutzten Items in 7 Kategorien

Tabelle 5.4 Statistisch signifikante Unterschiede zwischen Baseline und Testbedingungen

Tabelle 5.5 Statistisch signifikante Unterschiede zwischen Baseline und Testbedingungen

Tabelle 5.6 Statistisch signifikante Unterschiede zwischen Baseline und Testbedingungen

Tabelle 5.7 Statistisch signifikante Unterschiede zwischen Laien und Experten

Tabelle 5.8 Berechnung von Audio-Features und Schalldruckpegelmessungen für die Stimuli aus Studententeil 3

## Anhang I

Name	Toolbox	Range	Beschreibung	Quelle
Acoustic Diversity Index (ADI)	Sound-ecology	0-inf	Der Acoustic Diversity Index (ADI) wird berechnet, indem der Spektralbereich des Spektrogramms in Frequenzbereiche unterteilt und der Anteil der Signalenergie in jedem Bereich über einem Schwellenwert ermittelt wird. Der ADI ist das Ergebnis des auf diese Bins angewandten Shannon-Index.	VILLANU EVA-RIVERA et al., 2011
Booming	Timbral Models	0-1	Maschine-Learning trainiertes Modell, das das wahrgenommene Dröhnen/Brummen eines Audiosignals angibt.	AC-WP5-SURREY-D5.8
Dynamic Complexity	Essentia	0-inf	Mittlere absolute Ableitung der gesamten Lautheit eines Signals auf der Dezibel Skala. Gibt Information über Dynamik und Schwankung eines Signals an.	STREICH, 2007
Lautheit	Audio Toolbox (Matlab)	0-inf	Berücksichtigung der Frequenzaufteilung und der zeitlichen und spektralen Maskierungseigenschaften, um Lautheitswahrnehmung zu approximieren.	ISO 532-1
MFCC (13)	Essentia	-inf-inf	Features, die hauptsächlich bei Spracherkennungsalgorithmen verwendet werden. MFCCs sind eine Cepstral-Darstellung („Spektrum des Spektrums“) des Signals, bei der die Frequenzbänder entsprechend der (nichtlinearen) Mel-Skala verteilt sind.	GIANNAK OPOULOS, 2015
Rauigkeit	Audio Toolbox (Matlab)	0-inf	Schnelle Signaländerungen (größer 20 Hz bei Amplitudenmodulation sowie Frequenzmodulation) führen zu einem Höreindruck eines rauen, unsaubereren Klages.	FASTL und ZWICKER 2013
Schärfe	Audio Toolbox (Matlab)	0-inf	Gewichtetes erstes Moment der Tonheitsverteilung der spezifischen Lautheit. Es stellt ein Verhältnis der Lautheit der	DIN 45692 (AURES, VON

Name	Toolbox	Range	Beschreibung	Quelle
			höherfrequenten Spektralanteile zur Gesamtlautheit dar.	BISMARCK)
Schwankungsstärke	Audio Toolbox (Matlab)	0-inf	Langsame Signaländerungen, (kleiner 20 Hz bei Amplitudenmodulation sowie Frequenzmodulation) führen zu einem Höreindruck eines schwankenden Geräusches.	FASTL und ZWICKER 2013
Spectral Centroid	Librosa	0-inf	Beschreibt das spektrale Gravitationszentrum des Signals. Steht in einem Zusammenhang mit der wahrgenommenen Helligkeit eines Signals.	GIANNAK OPOULOS, 2015
Spectral Contrast	Librosa	0 - inf	Jedes Frame eines Spektrogramms wird bei Berechnung dieses Features in Teilbänder unterteilt. Für jedes Teilband wird der Energiekontrast geschätzt, indem die mittlere Energie im oberen Quantil (Spitzenenergie) mit der des unteren Quantils (Talenergie) verglichen wird.  Hohe Kontrastwerte entsprechen im Allgemeinen schmalbandigen Signalen, während niedrige Kontrastwerte breitbandigem Rauschen entsprechen.	<a href="https://librosa.org/doc/main/generated/librosa.feature.spectral_contrast.html">https://librosa.org/doc/main/generated/librosa.feature.spectral_contrast.html</a>
Spectral Crest	Essentia	0-inf	Spectral Crest misst das Verhältnis zwischen dem Maximum des Spektrums und dem arithmetischen Mittel des Spektrums. Ein höherer Crest Wert deutet darauf hin, dass es sich um ein tonales Signal handelt.	ALÍAS, 2016
Spectral Skweness	Essentia	-1 – 1	Bei diesem Feature wird die spektrale Schiefe für die spektrale Verteilung berechnet. Die Schiefe wird auch als das 3. statische Moment bezeichnet. Sie ist ein Maß, das die Asymmetrie der Werteverteilung um ihren Mittelwert beschreibt.	ALÍAS, 2016

Anhang I Toolboxen für Audioinhaltsanalysen

## Anhang II

Item	ML1	ML4	ML6	ML5	ML2	ML7	ML3
ablenkend	0,493	0,11	0,008	0,072	0,246	0,125	-0,019
abnehmend	-0,146	0,024	0,034	-0,003	0,192	-0,014	0,04
aggressiv	0,229	0,051	0,677	0,018	0,019	0,066	0,035
aktivierend	-0,295	0,273	0,308	0,084	0,225	0,035	-0,032
alarmierend	-0,025	-0,033	0,804	0,002	0,118	0,012	-0,049
angenehm	-0,853	0,097	-0,054	0,019	0,09	0,067	0,138
anstrengend	0,664	0,06	0,12	0,104	0,094	0,118	0,125
aufdringlich	0,449	0,125	0,227	0,098	0,023	0,255	0,114
auffällig	0,175	0,287	0,159	0,089	0,083	0,254	0,066
aufsteigend	0,023	0,188	0,101	0,098	0,217	0,122	-0,13
bedrohlich	0,031	-0,004	0,819	0,076	-0,007	0,017	0,041
belästigend	0,72	0,071	0,116	0,023	0,132	0,093	0,109
belebt	0,091	0,655	-0,091	0,088	-0,005	0,063	0,048
beruhigend	-0,764	0,011	-0,028	-0,002	0,126	0,063	0,18
brummend	0,005	0,003	-0,039	0,828	0,039	0,017	-0,084
chaotisch	0,115	0,466	0,297	0,192	0,025	-0,21	-0,101
detaillreich	-0,219	0,645	0,1	-0,023	0,074	0,047	-0,203
diffus	0,111	0,227	0,068	0,144	0,072	-0,421	0,338
direkt	-0,065	0,2	0,239	0,073	0,029	0,525	0,057
dominant	0,311	0,119	0,178	0,129	0,08	0,379	0,074
dröhnend	0,167	-0,021	0,086	0,604	0,039	0,172	-0,054
dumpf	-0,094	0,037	0,044	0,649	-0,065	-0,16	0,18
dünn	-0,246	0,01	-0,034	-0,139	0,352	-0,274	0,239
durchgehend	0,096	-0,09	-0,013	0,12	-0,093	0,087	0,585
dynamisch	0,041	0,575	0,107	-0,067	-0,071	0,074	-0,052
ereignisreich	-0,058	0,708	0,11	0,077	0,031	0,008	-0,186
erholsam	-0,767	0,055	-0,049	0,074	0,14	0,08	0,145
fließend	-0,044	0,079	-0,037	-0,082	-0,199	0,045	0,586
geordnet	-0,321	-0,079	-0,014	-0,052	0,089	0,097	0,399
geräuschvoll	0,293	0,396	0,018	0,107	-0,04	0,29	0,114
gleichmäßig	-0,196	-0,224	0,077	-0,06	-0,056	-0,021	0,664
hektisch	0,224	0,404	0,345	0,099	0,037	-0,067	-0,039
hell	-0,085	0,2	-0,005	-0,332	0,51	-0,104	0,202
heulend	0,024	-0,065	0,184	0,056	0,631	0,008	-0,093
intensiv	0,355	0,175	0,164	0,117	0,026	0,392	0,123
lärmend	0,587	0,055	0,072	0,167	0,085	0,231	0,067
lästig	0,745	0,073	0,106	0,035	0,096	0,054	0,139
laut	0,466	0,094	0,106	0,175	0,051	0,34	0,032
lebhaft	0,074	0,684	-0,048	0,037	-0,016	0,112	0,056
monoton	-0,052	-0,354	0,028	0,051	-0,015	-0,068	0,609
nah	0,093	0,276	0,112	0,033	0,012	0,513	-0,07
pfeifend	0,018	-0,03	0,026	0,05	0,726	-0,011	-0,125
quietschend	-0,062	-0,036	0,01	0,131	0,677	0,035	-0,171
rau	0,051	0,06	0,346	0,357	0,091	-0,038	0,092
rauschend	0,332	-0,026	-0,136	0,175	0,143	-0,104	0,392
rhythmisch	-0,324	0,132	0,185	-0,021	0,185	0,018	0,268

Item	ML1	ML4	ML6	ML5	ML2	ML7	ML3
ruhig	-0,649	-0,039	-0,01	-0,061	0,036	-0,057	0,234
scharf	0,158	0,089	0,286	-0,043	0,441	0,032	0,024
schwankend	0,097	0,377	0,011	0,074	0,141	-0,021	-0,09
stationär	-0,117	-0,077	0,108	0,041	0,114	-0,005	0,303
störend	0,76	0,093	0,08	0,03	0,106	0,077	0,113
tief	-0,105	0,029	0,115	0,589	-0,117	-0,026	0,105
tonhaltig	-0,032	0,321	-0,045	0,058	0,187	0,238	-0,049
umhüllend	-0,055	0,114	-0,071	0,267	0,077	0,153	0,267
verschwommen	-0,01	0,075	-0,031	0,237	0,105	-0,475	0,437
vertraut	-0,247	0,14	-0,329	0,166	0,029	0,196	0,123
vordergründig	0,178	0,262	0,06	0,084	0,027	0,475	0,102
wummernd	-0,026	0,02	0,044	0,742	0,122	-0,027	-0,048
zischend	0,088	-0,037	0,025	0,041	0,631	-0,01	0,097

Anhang II Ladungsmatrizen der 7-Faktoren-Analyse

# Schriftenreihe

## Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Verkehrstechnik“

### 2023

#### **V 368: Methoden zur Bewertung der Verbindungsqualität in Straßennetzen**

Friedrich, Bawidamann, Peter, Waßmuth

€ 20,00

#### **V 369: Verkehrsablauf an signalisierten Knotenpunkten mit hohem Radverkehrsaufkommen**

Fritz, Grigoropoulos, Kath, Baier, Reinartz, Schuckließ, Junghans, Lücken, Leonhardt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### **V 370: Wissenschaftliche Begleitung des digitalen Testfelds auf der A9 zwischen München und Nürnberg**

Vierkötter, Mischnick, Spangler, Gerstenberger, Windmann, Nedkov, Emmermann, Haspel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### **V 371: Begleitende Systemevaluation der Maßnahme: Sicheres Ausleiten bei BAG-Standkontrollen**

Fehn, Margreiter, Spangler, Bogenberger, Emmermann, Bengler, Vierkötter, Nedkov, Feldges, Holst

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### **V 372: Autonome Systeme für Straßenbetriebsdienste (AETAS BAB)**

Lüpges, Kleer, Holldorb, Zielke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### **V 373: Modellanalyse Schadstoffimmissionen – Auswirkungen des Verkehrs auf die Luftqualität in drei Ballungsräumen**

Jakobs, Schneider, Toenges-Schuller, Düring, Hoffmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### **V 374: Kriterien für die Beurteilung des Gefährdungspotenzials für Motorradfahrer durch scharfkantige Konstruktionsteile in Fahrzeug-Rückhaltesystemen**

Kathmann, von Heel, Schimmelpfennig, Reglitz, Kammel, Goergen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### **V 375: Virtuelle Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen mit der Finite-Elemente-Simulation**

Fröhlich, Schwedhelm, Kübler, Balzer-Hebborn, Yu

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### **V 376: Innovative Datenerfassung und -nutzung im Straßenbetriebsdienst**

Hess, Best, Lohmeier, Temme

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### 2024

#### **V 377: Verfahren für die Bewertung des Verkehrsablaufs auf Autobahnen als Ganzjahresanalyse für unterschiedliche Randbedingungen**

Geistefeldt, Hohmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### **V 378: Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit an Arbeitsstellen auf Autobahnen unter unterschiedlichen Randbedingungen**

Geistefeldt, von der Heiden, Oeser, Kemper, Diner, Baier, Klemps-Kohnen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### **V 379: Nachhaltige Förderung des Radverkehrs im Winter durch optimierten Winterdienst (WinRad)**

Holldorb, Riel, Wiesler, Cypra, März

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 380: Maßnahmen zum Umgang mit japanischem Staudenknöterich**

Molder, Gaar, Münch, Alberternst

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 381: Akustische Wirksamkeit abknickender und gekrümmter Lärmschirme**

Lindner, Ruhnau, Schulze

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 382: Potenziale für Photovoltaik an Bundesfernstraßen**

Ludwig, Tegeler, Schmedes, Tomhave, Hensel, Forster, Kleinhans, Heinrich, John, Schill

€ 19,50

**V 383: Analyse und Entwicklung leistungsfähiger Einfahrtstypen ohne Fahrstreifenaddition für Autobahnen**

Geistefeldt, Brandenburg, Sauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 384: Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen – Methoden zur Untersuchung und Metaanalyse**

Maier, Leonhardt, Ehm

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 385: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf einbahnigen Landstraßen**

Geistefeldt, Hohmann, Finkbeiner, Sauer, Vortisch, Buck, Weyland, Weiser, Giuliani

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2025

**V 386: Pilothafte Anwendung des Bridge-WIM Verfahrens zur Ergänzung des Achslastmessstellennetzes**

Firus, Petschacher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 387: Akustische Wirksamkeit von Vegetation**

Lindner, Schulze

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 388: Hochaufgelöste multisensorielle Verkehrsdaten in der Streckenbeeinflussung**

Schwietering, Löbbering, Weinreis, Maier, Feldges

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 389: Lärmwetter in der Praxis – Erprobung und Weiterentwicklung der Methodik zur Anwendung meteorologischer Korrekturen auf die Schallausbreitung**

Skowronek, Liepert, Müller, Schady, Elsen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 390: Wirkung von Fahrstreifenbegrenzungen an Einfahrten von Autobahnen auf das Fahrverhalten und auf die Verkehrssicherheit**

Geistefeldt, Sauer, Brandenburg

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**V 391: Erprobung psychoakustischer Parameter für innovative Lärminderungsstrategien**

Oehme, Böhm, Horn, Pourpart, Schweidler, Weinzierl, Fiebig, Schuck

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

---

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: [kontakt@schuenemann-verlag.de](mailto:kontakt@schuenemann-verlag.de)

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.



ISSN 0943-9331  
ISBN 978-3-95606-831-7  
<https://doi.org/10.60850/bericht-v391>

[www.bast.de](http://www.bast.de)