



Quantitative, multivariate Bewertungsgröße für Straßen- und Schienenverkehrslärm

DISSERTATION

eingereicht an der

Technischen Universität Graz,
Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der technischen Wissenschaften (Dr. techn.)

vorgelegt von

Michael Cik

Betreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing Martin Fellendorf, Technische Universität Graz

Gutachter: Prof. Dr. André Fiebig, Technische Universität Berlin

2024

Kurzfassung

Quantitative, multivariate Bewertungsgröße für Straßen- und Schienenverkehrslärm

Schall ist eine physikalisch-technisch messbare Größe und kann in zwei Bereiche gegliedert werden: den Nutzschall und den sogenannten Störschall. Lärm mit seiner Definition als unerwünschter, störender Schall ist jedoch nicht messbar. Messbar ist in diesem Zusammenhang nur der Schalldruckpegel. In Normen und Richtlinien wird der A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ als der relevante Hauptindikator für die Beurteilung von Lärm verwendet. Die Problematik dabei ist, dass eine subjektiv empfundene Größe wie der Verkehrslärm, durch eine Mess- und Rechengröße wie den $L_{A,eq}$ abgebildet wird. Als Beispiel aus der Literatur kann dazu erwähnt werden, dass je kleiner der $L_{A,eq}$ ist, desto mehr werden Muster im Zeit- und Frequenzbereich als störend bzw. lästig wahrgenommen.

Basierend auf diesen Grundlagen war das Ziel dieser Dissertation die Entwicklung einer neuen Bewertungs- und Berechnungsgröße, welche die subjektive Wirkung des Verkehrslärms auf den Menschen besser als die heute zur Verfügung stehenden Größen abbildet. Dazu wurde in 4 Studienphasen eine Bewertungsgröße für Straßen- und Schienenverkehrslärm als Zielgröße entwickelt.

Im Zuge der empirischen Datenerhebung wurden verschiedene binaurale Kunstkopfaudioaufnahmen von Einzelvorbeifahrten von Kraftfahrzeugen und Zügen auf homogenen Straßen- und Schienenabschnitten bei freier Schallausbreitung inkl. Aufzeichnung verkehrstechnischer und meteorologischer Kenngrößen durchgeführt. Diese Audioaufnahmen wurden in einer Geräuschdatenbank mit unterschiedlicher kategorialer Unterteilung (Fahrzeugtyp, Fahrbahnbelag, Geschwindigkeit, usw.) zusammengefasst. In weiterer Folge wurden aus den Einzelvorbeifahrten mittels Audiosignalverarbeitung definierte, synthetisch erzeugte Straßen- bzw. Schienenverkehrslärmsamples erzeugt, die mittels orthogonaler Versuchsplanung für die verschiedenen Studienphasen in experimentellen Versuchsplänen zusammengefasst wurden. Diese Versuchspläne waren die Grundlage für die psychoakustischen Hörversuche (402 ProbandInnen), bei denen drei verschiedene Bewertungsmethoden Anwendung fanden. Als erste Methode wurde die sogenannte Personal Noise Ranking Scale (PNRS), eine Intervallskala für die Bewertung der Lästigkeit, angewendet. Weiters wurde mittels Multidimensional Scaling (MDS) die Ähnlichkeit von Lärmsamples bewertet und die Probanden mussten die Lästigkeit auch mittels der Handkraftmethode ermitteln. Nebenbei wurden in dem psychoakustischen Hörversuch auch die Erhebung von Persönlichkeitsdaten (Sozio-Demographie, Audiometrie, Mehrdimensionale Befindlichkeit (MDBF)) und die grundlegende Lärmempfindlichkeit der Probanden für die Analyse von Nebeneinflüssen und Abhängigkeiten durchgeführt.

Neben den subjektiven Bewertungen aus den Hörversuchen wurden die objektiven, akustischen Parameter der Straßen- bzw. Schienenverkehrslärmsamples berechnet. Dazu gehören der $L_{A,eq}$ als Normparameter und die psychoakustischen Parameter Lautheit, Rauigkeit, Schärfe, Schwankungsstärke und Tonhaltigkeit. Zusätzlich wurden zwei neue, auf der Theorie der Psychoakustik basierende, Parameter entwickelt und implementiert.

Im nächsten Schritt wurden mit den subjektiven Ergebnissen der Hörversuche und den objektiven, akustischen Parametern verschiedene statistische Modellbildungen durchgeführt und analysiert. Dazu gehören die einfache und multiple lineare und nichtlineare Regressionsanalyse (Logistische und Arkustangensfunktion) und die Ähnlichkeitsstrukturanalyse auf Basis von Multidimensional Scaling.

Als Ergebnis aus den Laborversuchen wurde eine Bewertungsgröße mit den signifikanten psychoakustischen Parametern und der Bezeichnung „Traffic Noise Annoyance on Roads and Rail“ für den Straßen- und Schienenverkehrslärm im Laborbereich modelliert, welche die subjektive Empfindung der Lästigkeit mit einer höheren Varianzerklärung beschreibt als der $L_{A,eq}$.

Abschließend wurde die im Labor entstandene Bewertungsgröße und Untersuchungsmethodik auch in einer Feldstudie in der eigenen Wohnumgebung von 16 ProbandInnen angewendet und evaluiert.

Abstract

Quantitative, multivariate assessment variable for road and rail traffic noise

Sound is a physically and technically measurable quantity and can be divided into two areas: useful sound and so-called disturbing sound. However, noise, defined as unwanted, disturbing sound, cannot be measured. Only the sound pressure level can be measured in this context. In standards and guidelines, the A-weighted energy equivalent continuous sound level $L_{A,eq}$ is used as the relevant main indicator for the assessment of noise. The problem here is that a subjective perceived quantity such as traffic noise is represented by a measured and calculated quantity such as $L_{A,eq}$. As an example from the literature, it can be mentioned that the smaller the $L_{A,eq}$ is, the more patterns in the time and frequency domain are perceived as disturbing or annoying.

Based on these principles, the aim of this dissertation was to develop a new assessment and calculation parameter that better reflects the subjective effect of traffic noise on people than the currently available parameters. To this end, an assessment parameter for road and rail traffic noise was developed as a target parameter in 4 study phases.

In the course of the empirical data collection, various binaural artificial head audio recordings were made of individual passing vehicles and trains on homogeneous road and rail sections with free sound propagation, including recordings of traffic-related and meteorological parameters. These audio recordings were summarized in a noise database with different categorical subdivisions (vehicle type, road surface, speed, etc.). Subsequently, defined, synthetically generated road and rail traffic noise samples were generated from the individual pass-by vehicles using audio signal processing, which were summarized in experimental test plans for the various study phases using orthogonal test planning. These test plans were the basis for the psychoacoustic hearing tests (402 test subjects), in which three different assessment methods were used. The first method used was the Personal Noise Ranking Scale (PNRS), an interval scale for assessing annoyance. In addition, the similarity of noise samples was assessed using multidimensional scaling (MDS) and the test subjects also had to determine the annoyance using the hand force method. In addition, personality data (socio-demographics, audiometry, multidimensional mental state (MDBF) and the basic noise sensitivity of the test subjects were collected in the psychoacoustic hearing test for the analysis of secondary influences and dependencies.

In addition to the subjective assessments from the listening tests, the objective, acoustic parameters of the road and rail traffic noise samples were calculated. These include $L_{A,eq}$ as a standard parameter and the psychoacoustic parameters loudness, roughness, sharpness, fluctuation strength and tonality. In addition, two new parameters based on the theory of psychoacoustics were developed and implemented.

In the next step, various statistical models were created and analyzed using the subjective results of the listening tests and the objective acoustic parameters. These include simple and multiple linear and non-linear regression analysis (logistic and arctangent function) and similarity structure analysis based on multidimensional scaling.

As a result of the laboratory tests, an assessment parameter with the significant psychoacoustic parameters and the designation "Traffic Noise Annoyance on Roads and Rail" was modeled for road and rail traffic noise in the laboratory area, which describes the subjective perception of annoyance with a higher explanation of variance than the $L_{A,eq}$.

Finally, the assessment parameter and research methodology developed in the laboratory was also applied and evaluated in a field study in the subjects' own living environment (16 test subjects).

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Ich möchte die Gelegenheit nutzen, um all den Menschen zu danken, die mich während meiner Forschungsarbeit und der Erstellung dieser Dissertation unterstützt haben.

Zunächst danke ich speziell meinem Doktorvater Martin Fellendorf, der mir nicht nur fachliche Anleitung gegeben hat, sondern auch stets unterstützende und ermutigende Worte fand, wenn auch die Herausforderungen groß waren.

Ebenso ein großes Dankschön an André Fiebig für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Familie, insbesondere an meine Frau Beate, meine Tochter Hannah und meine Eltern für ihre bedingungslose Unterstützung und ihr Verständnis in all den Jahren. Ihr Glaube an mich hat mir die Kraft gegeben, durchzuhalten.

Ein herzliches Dankeschön gilt auch meinen Freunden und Kollegen am Institut für Straßen- und Verkehrswesen der TU Graz, die mit mir Höhen und Tiefen geteilt haben. Eure moralische Unterstützung und die gemeinsamen Diskussionen haben diese Reise unvergesslich gemacht.

Schließlich möchte ich mich bei allen bedanken, die im Hintergrund geholfen haben, sei es durch administrative und technische Unterstützung oder auf andere Weise.

Vielen Dank an euch alle.

Michael

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	x
1 Einleitung	13
1.1 Problemstellung	14
1.2 Zielsetzung der Arbeit	17
1.3 Aufbau der Arbeit	23
2 Stand der Forschung	24
2.1 Lärmwirkungsforschung	24
2.1.1 Störungen, Belästigungen und kognitive Leistungen	25
2.1.2 Akute Störungen, Belästigungen und kognitive Beeinträchtigungen	26
2.1.3 Langfristige Störungen, Belästigungen und kognitive Beeinträchtigungen	26
2.1.4 Lärmwirkung auf den Schlaf	27
2.1.5 Physiologische Reaktionen, akute und chronische Erkrankungen	28
2.1.6 Ökonomische Bewertung der Wirkung von Verkehrslärm	29
2.1.7 Lärmwirkungsforschung - interdisziplinär	30
2.2 Relevante Faktoren bei der Schallereignisbeurteilung	31
2.3 Lärmwirkung im Verkehrswesen	32
2.4 Psychoakustische Parameter und Lästigkeit	36
3 Datengrundlagen und Studienphasen	46
3.1 Methodisches Grundkonzept	46
3.2 Akustische Aufnahmen und Signalverarbeitung	52
3.3 Experimentelles Versuchsdesign	58
3.4 Hörversuch im Labor und Feld	67
3.5 Studienphase 1 - Straßenverkehrslärm (Labor)	73
3.6 Studienphase 2 - Straßenverkehrslärm (Labor) – Erweiterung LKW	75
3.7 Studienphase 3 - Straßen- und Schienenverkehrslärm (Labor)	77
3.8 Studienphase 4 - Straßen- und Schienenverkehrslärm (Feld)	78
4 Ergebnisse der subjektiven und objektiven Parameter	80

4.1	Ergebnisse Studienphase 3 der subjektiven Hörversuche	80
4.1.1	Vergleich Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen	88
4.1.2	Zusammenhang zwischen dem $L_{A,eq}$ und PNRS	89
4.1.3	Paarvergleiche zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm	93
4.1.4	Handkraftbewertung der Lästigkeit	96
4.1.5	Zusammenhang zwischen der PNRS und der Handkraftbewertung der Lästigkeit	101
4.1.6	Lärmempfindlichkeit	101
4.1.7	Fragebogen „Lästigkeitsindex“	104
4.1.8	Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen	108
4.1.9	Audiometrie	111
4.1.10	Reproduzierbarkeit der Lästigkeitsurteile	112
4.2	Ergebnisse Studienphase 1 der subjektiven Hörversuche	113
4.3	Ergebnisse Studienphase 2 der subjektiven Hörversuche	118
4.4	Ergebnisse Studienphase 4 der subjektiven Hörversuche	120
4.5	Ergebnisse der akustischen Parameter	122
4.6	Entwicklung neuer psychoakustischer Parameter	125
5	Statistische Modellbildung, Ergebnisse und Anwendung	127
5.1	Statistische Modellbildung aus subjektiven und objektiven Parametern	127
5.1.1	Strukturprüfende Verfahren	128
5.1.2	Strukturentdeckende Verfahren	129
5.1.3	Systemübersicht der angewendeten statistischen Verfahren	130
5.2	Ergebnisse Studienphase 3 der Modellbildung	130
5.2.1	Lineare und multiple lineare Regressionsanalysen auf Basis PNRS	131
5.2.2	Lineare Regressionsanalyse auf Basis Handkraftdynamometer	138
5.2.3	MDS-Urteilsraums – Lineare und nichtlineare Regressionsanalyse	139
5.3	Ergebnisse Studienphase 1 der Modellbildung	141
5.4	Ergebnisse Studienphase 2 der Modellbildung	143
5.5	Ergebnisse Studienphase 4 der Modellbildung	144
5.6	Zusammenfassung Ergebnisse Studienphase 1 bis 4 der Modellbildung	146
5.7	Ergebnisse der Zielgrößenmodellierung (TNA_R)	147
5.7.1	Studienphase 3 - Lineare Regressionsanalyse	148
5.7.2	Studienphase 3 - Nichtlineare Regressionsanalyse – Arcustangens Funktion	149

5.7.3	Studienphase 3 - Nichtlineare Regressionsanalyse – Logistische Funktion.....	150
6	Fazit	151
6.1	Zusammenfassung	151
6.2	Erkenntnisse.....	152
6.3	Ausblick	153
Literatur	155
Anhang	162
	Lästigkeitsindex - Fragebogen.....	163
	Der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen (MDBF) [Steyer et al. 1997].....	166
	Audiometrie	167
	Lärmempfindlichkeitsfragebogen	168
	Erhebung LKW Merkmale.....	169
	Einblicke in die Messungen	171

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lärmstörungen am Tag und/oder in der Nacht in Österreich unabhängig von der Lärmquelle [Quelle: Statistik Austria, Mikrozensus 2020]	15
Abbildung 2:	Vergleich der Lärmstörung insgesamt nach Gemeindegröße und Urbanisierungsgrad [Quelle: Statistik Austria, Mikrozensus 2020]	16
Abbildung 3:	Vergleich der verkehrsbedingten Lärmquellen von 2002 bis 2019 [Quelle: Statistik Austria, Mikrozensus 2020]	17
Abbildung 4:	Schema der Lärmentstehung [Quelle: Kalivoda et al. 1998], modifiziert Cik	21
Abbildung 5:	Ziel einer neuen Bewertungsgröße für den Straßen- und Schienenverkehrslärm .	22
Abbildung 6:	Beziehung zwischen Belastungsfaktoren, Moderatorvariablen und Beanspruchungsparametern des Umweltlärms [Quelle: Jansen und Notbohm 1994], modifiziert Cik	31
Abbildung 7:	Parameter, die bei der Beurteilung eines Schallereignisses relevant sein können [Quelle: Genuit 1994], modifiziert Cik	32
Abbildung 8:	Relevante Merkmale des Straßen- und Schienenverkehrslärms in Bezug auf die Geschwindigkeit	34
Abbildung 9:	Relevante Einflussfaktoren auf den Straßenverkehrslärm	35
Abbildung 10:	Lautheitsfunktion eines 1 kHz Tones (durchgezogene Linie) und eines gleichmäßig angeregten Rauschens (punktierter Linie). Die Lautheit wird als Funktion des Schalldruckpegels angegeben. Gestrichelte und punktiert-gestrichelte Linien stellen Näherungen dar [Fastl et al. 2007]	39
Abbildung 11:	Schärfe von frequenzgruppenbreiten Schmalbandrauschen in Abhängigkeit von der Mitten-frequenz (durchgezogene Linie), von Bandpassrauschen mit einer oberen Grenzfrequenz von 10 kHz in Abhängigkeit von der unteren Grenzfrequenz (gestrichelte Linie), und von Bandpassrauschen mit einer unteren Grenzfrequenz von 0,2 kHz in Abhängigkeit von der oberen Grenzfrequenz (punktierter Linie). Das Kreuz markiert den Standardton mit einer Schärfe von 1 acum [Fastl et al. 2007].	40
Abbildung 12:	Methodisches Grundkonzept der Studienphasen 1 bis 3 (Labor)	47
Abbildung 13:	Methodisches Grundkonzept der Studienphase 4 (Feld)	51
Abbildung 14:	Skizzenhafte Darstellung einer akustischen Aufnahme laut RVS 04.02.11 Lärmschutz	53
Abbildung 15:	Beispiel eines Aufnahmeortes und der Fahrbahnoberfläche SMA (Splitt-Mastix-Asphalt) auf der A2 bei Ilz – Kilometerbereich 141	54

Abbildung 16:	Fahrbahnoberfläche SMA (Splitt-Mastix-Asphalt) des Aufnahmeortes auf der A2 bei Ilz	55
Abbildung 17:	Signalverarbeitung der Akustikdaten.....	56
Abbildung 18:	Synthetisch erzeugtes Straßenverkehrslärmsample mit einer Dauer von 30 Sekunden	57
Abbildung 19:	Personal Noise Ranking Scale (PNRS)	65
Abbildung 20:	Handkraftdynamometer	66
Abbildung 21:	Multidimensionale Skalierung (MDS) Ratingmethode Skala	67
Abbildung 22:	Labor für Psychoakustik im Verkehrswesen am Institut für Straßen- und Verkehrswesen der TU Graz – Konzept, Bau und operative Umsetzung durch M. Cik.....	68
Abbildung 23:	Exemplarischer Ablauf des gesamten Hörversuchs in der Studienphase 3 inkl. der geplanten Zeitdauer.....	69
Abbildung 24:	Exemplarischer Ablauf des Hörversuchs auf Basis der Multidimensionalen Skalierung in der Studienphase 3.....	71
Abbildung 25:	Systematische Darstellung des Ablaufs des gesamten Hörversuchs in der Studienphase 4 im Feld.....	72
Abbildung 26:	Detaillierte Beschreibung der Studienphase 4 im Feld mit grundsätzlichen Informationen und dem zeitlichen Ablauf.....	79
Abbildung 27:	Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf alle 31 definierten Soundsamples (Studienphase 3, N=171)	81
Abbildung 28: PZ_A: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 51,1$ dB)	Abbildung 29: PZ_B: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 55,27$ dB)	83
Abbildung 30: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 57,72$ dB)	Abbildung 31: PZ_D: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 53,69$ dB)	83
Abbildung 32: GZ_A: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 72,06$ dB)	Abbildung 33: GZ_B: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 65,01$ dB)	83
Abbildung 34: GZ_C: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 69,03$ dB)	Abbildung 35: GZ_D: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 63,79$ dB)	84
Abbildung 36: SMA_A: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 57,89$ dB)	Abbildung 37: SMA_B: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 60,39$ dB)	84
Abbildung 38: SMA_C: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 61,17$ dB)	Abbildung 39: SMA_D: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 55,17$ dB)	84
Abbildung 40: Beton_A: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 69,66$ dB)	Abbildung 41: Beton_B: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 68,64$ dB)	85

Abbildung 42: Beton_C: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 71,46$ dB)	Abbildung 43: Beton_D: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 64,64$ dB)	85
Abbildung 44: 2.1.17:Strasse_55dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 55$ dB)	Abbildung 45: Strasse_65dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 65$ dB)	85
Abbildung 46: Strasse_75dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 75$ dB)	Abbildung 47: Schiene_55dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 55$ dB)	86
Abbildung 48: Schiene_65dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 65$ dB)	Abbildung 49: Schiene_75dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 75$ dB)	86
Abbildung 50: Rauschen_50dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 50$ dB)	Abbildung 51: Rauschen_60dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 60$ dB)	86
Abbildung 52: Rauschen_70dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 70$ dB)	Abbildung 53: Rauschen_80dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 80$ dB)	87
Abbildung 54:	Boxplot der mittleren Lästigkeitsbeurteilung über alle Bewertungen (Gesamt), die Bewertungen für Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen (Studienphase 3, N=171).....	88
Abbildung 55:	Mittlere Skalenbewertung der Lästigkeit von Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen (Studienphase 3, N=171)	89
Abbildung 56:	Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf die definierten Gesamt-Soundsamples mit gerundeten $L_{A,eq}$ - Angaben (Studienphase 3, N=171)	90
Abbildung 57:	Boxplot der Personal Noise Ranking Scale in Bezug auf die definierten Straßen- Soundsamples mit den $L_{A,eq}$ - Angaben (Studienphase 3, N=171).....	91
Abbildung 58:	Boxplot der Personal Noise Ranking Scale in Bezug auf die definierten Schienen- Soundsamples mit den $L_{A,eq}$ - Angaben (Studienphase 3, N=171).....	92
Abbildung 59:	Boxplot der Personal Noise Ranking Scale in Bezug auf die definierten Rauschen- Soundsamples mit den $L_{A,eq}$ - Angaben (Studienphase 3, N=171).....	93
Abbildung 60:	Unterschied zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei 55 dB $L_{A,eq}$	94
Abbildung 61:	Unterschied zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei 65 dB $L_{A,eq}$	95
Abbildung 62:	Unterschied zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei 75 dB $L_{A,eq}$	95
Abbildung 63:	Boxplot der mittleren relativen Kraftbeurteilung der Lästigkeit über alle Bewertungen (Gesamt), die Bewertungen für Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen (Studienphase 3, N=171)	97
Abbildung 64:	Mittlere relative Kraftbewertung der Lästigkeit von Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen (Studienphase 3, N=171)	98
Abbildung 65:	Unterschied zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei 55 dB $L_{A,eq}$	99
Abbildung 66:	Unterschied zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei 65 dB $L_{A,eq}$	100
Abbildung 67:	Unterschied zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei 75 dB $L_{A,eq}$	100

Abbildung 68:	Mittlere Skalenbewertung der Lästigkeit bei niedrig und hoch lärmempfindlichen Testpersonen	102
Abbildung 69:	Mittlere relative Kraftbewertung der Lästigkeit bei niedrig und hoch lärmempfindlichen Testpersonen.....	103
Abbildung 70:	Fragebogen Lästigkeitsindex: Welche Räume in ihrer Wohnung liegen zur Straße hin?	106
Abbildung 71:	Unterschied in der Befindlichkeitsdimension Gute-Schlechte Stimmung vor und nach der Beschallung mit Verkehrsrgeräuschen.....	109
Abbildung 72:	Unterschied in der Befindlichkeitsdimension Wachheit-Müdigkeit vor und nach der Beschallung mit Verkehrsrgeräuschen	110
Abbildung 73:	Unterschied in der Befindlichkeitsdimension Ruhe-Unruhe vor und nach der Beschallung mit Verkehrsrgeräuschen.....	110
Abbildung 74:	Rechtes Ohr: mittlerer HV bei 500, 1000, 2000 und 4000 Hz.....	111
Abbildung 75:	Linkes Ohr: mittlerer HV bei 500, 1000, 2000 und 4000 Hz	112
Abbildung 76:	Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf alle 29 definierten Soundsamples der Studienphase 1 mit N=135	115
Abbildung 77:	Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf die definierten Soundsamples mit dem Fahrbahnbelag Beton der Studienphase 1 mit N=135... ..	116
Abbildung 78:	Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf die definierten Soundsamples mit dem Fahrbahnbelag Asphaltbeton der Studienphase 1 mit N=135.....	116
Abbildung 79:	Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf die definierten Soundsamples mit dem Fahrbahnbelag SMA der Studienphase 1 mit N=135	117
Abbildung 80:	Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf alle 25 definierten Soundsamples der Studienphase 2 mit N=50	118
Abbildung 81:	Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf die definierten Soundsamples mit dem Fahrbahnbelag Beton der Studienphase 2 mit N=50	119
Abbildung 82:	Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf die definierten Soundsamples mit dem Fahrbahnbelag Asphaltbeton der Studienphase 2 mit N=50.....	119
Abbildung 83:	Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf die definierten Soundsamples mit dem Fahrbahnbelag SMA der Studienphase 2 mit N=50	120
Abbildung 84:	Exemplarische Feldmessungen im Außenbereich der Wohnumgebungen der Probanden in der Studienphase 4.....	121
Abbildung 85:	Exemplarische Feldmessungen im Innenbereich der Wohnumgebungen der Probanden in der Studienphase 4.....	122

Abbildung 86:	Soundsamples mit den berechneten Ergebnissen des Parameter Lautheit (50. Perzentil) aus der Studienphase 3	124
Abbildung 87:	Soundsamples mit den berechneten Ergebnissen des Parameter Rauigkeit (50. Perzentil) aus der Studienphase 3	125
Abbildung 88:	Soundsamples mit den berechneten Ergebnissen des Parameter Schärfe (50. Perzentil) aus der Studienphase 3	125
Abbildung 89:	Systemskizze der statistischen Modellbildung aus subjektiven und objektiven Parametern	130
Abbildung 90:	Lineare Regression für den Bereich Straße: Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale in Abhängigkeit des $L_{A,eq}$ (Studienphase 3, N = 171); Adj. $R^2 = 0,738$	131
Abbildung 91:	Lineare Regression für den Bereich Schiene: Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale in Abhängigkeit des $L_{A,eq}$ (Studienphase 3, N = 171); Adj. $R^2 = 0,701$	132
Abbildung 92:	Lineare Regression für den Bereich Rauschen: Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale in Abhängigkeit des $L_{A,eq}$ (Studienphase 3, N = 171); Adj. $R^2 = 0,811$	133
Abbildung 93:	Lineare Regression für alle Soundsamples: Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale in Abhängigkeit des $L_{A,eq}$ (Studienphase 3, N = 171); Adj. $R^2 = 0,672$	134
Abbildung 94:	Lineare Regression für alle Soundsamples: Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale in Abhängigkeit der Lautheit (Studienphase 3, N = 171); Adj. $R^2 = 0,722$	135
Abbildung 95:	Lineare Regression für alle Soundsamples: Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale in Abhängigkeit der Rauigkeit (Studienphase 3, N = 171); Adj. $R^2 = 0,721$	136
Abbildung 96:	Lineare Regression für alle Soundsamples: Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale in Abhängigkeit der Schärfe (Studienphase 3, N = 171); Adj. $R^2 = 0,328$	137
Abbildung 97:	Lineare Regression zwischen der relativen Handkraftbewertung der Lästigkeit und dem $L_{A,eq}$ der Geräusche (Studienphase 3, N = 171).....	139
Abbildung 98:	Multiple lineare Regression der Ergebnisse aus der Multidimensionalen Skalierung für die relevanten psychoakustischen Parameter Lautheit, Schärfe und LFFS (Studienphase 3, N = 30); Adj. $R^2 = 0,672$	140
Abbildung 99:	Multiple nichtlineare (logistische) Regression der Ergebnisse aus der Multidimensionalen Skalierung für die relevanten psychoakustischen Parameter Lautheit, Schärfe und LFFS (Studienphase 3, N = 30); Adj. $R^2 = 0,631$	140

Abbildung 100:	Ergebnis Zielgrößenmodellierung der Studienphase 3 der nichtlinearen Regressionsanalyse - Lineare-Funktion; Adj. $R^2 = 0,72$ 148
Abbildung 101:	Ergebnis Zielgrößenmodellierung der Studienphase 3 der nichtlinearen Regressionsanalyse – Arcustangens Funktion; Adj. $R^2 = 0,743$ 149
Abbildung 102:	Ergebnis Zielgrößenmodellierung der Studienphase 3 der nichtlinearen Regressionsanalyse - Logistische Funktion; Adj. $R^2 = 0,768$ 150

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Beschreibung der verwendeten Straßen- und Schienenlärmverkehrssamples der Studienphase 3.....	58
Tabelle 2:	Gliederung der 4 Studienphasen nach Untersuchungsort, Lärmart der Quelle, Aufnahmetechnik und Probandenanzahl	73
Tabelle 3:	Verkehrsbezogener Merkmalsraum inkl. Anzahl an Ausprägungen für mögliche Kombinationen der synthetischen Fahrzeugensembles in der Studienphase 1.....	73
Tabelle 4:	Experimenteller Versuchsplan der Studienphase 1 mit 5 Bewertungsgruppen und 29 definierten Geräuschsamples	75
Tabelle 5:	Verkehrsbezogener Merkmalsraum bei LKWs inkl. Anzahl an Ausprägungen für mögliche Kombinationen der synthetischen LKW-Samples in der Studienphase 275	
Tabelle 6:	Experimenteller Versuchsplan der Studienphase 2 mit 4 Bewertungsgruppen und 25 definierten Geräuschsamples	77
Tabelle 7:	Experimenteller Versuchsplan der Studienphase 3 mit 6 Bewertungsgruppen und 31 definierten Geräuschsamples	78
Tabelle 8:	Beschreibung aller 26 Soundsamples und Zuordnung zu den einzelnen Kategorien und dem A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{A,eq}$	82
Tabelle 9:	Ergebnisse des Fragebogens „Lästigkeitsindex“ der Studienphase 3 (N=171)	105
Tabelle 10:	Detaillierte Ergebnisse der Lästigkeitsbewertung mittels PNRS aller 29 Soundsamples der Studienphase 1 (N = 135)	113
Tabelle 11:	Soundsamples mit den berechneten Ergebnissen der psychoakustischen Parameter (50. Perzentil) der Studienphase 3.....	123
Tabelle 12:	Gliederung der angewendeten statistischen Modelle in dieser Arbeit	128
Tabelle 13:	Ergebnisse Studienphase 3 (N = 171) der einfachen & multiplen lineare Regressionsanalyse	138
Tabelle 14:	Ergebnisse Studienphase 3 (N = 30) der multidimensionalen Skalierung	141
Tabelle 15:	Ergebnisse Studienphase 1 (N = 135) der einfachen & multiplen linearen Regressionsanalyse	142
Tabelle 16:	Ergebnisse Studienphase 2 (N = 50) der einfachen & multiplen linearen Regressionsanalyse	143
Tabelle 17:	Ergebnisse Studienphase 4 (N = 16) der einfachen & multiplen linearen Regressionsanalyse	145
Tabelle 18:	Ergebnisse Studienphasen 1 bis 4 (N = 402) der einfachen & multiplen linearen Regressionsanalyse	146

Tabelle 19:	Ergebnis Zielgrößenmodellierung der Studienphase 3	147
-------------	--	-----

„Eines Tages wird der Mensch den Lärm ebenso unerbittlich bekämpfen müssen, wie die Cholera und die Pest“.

Robert Koch (1843 – 1910)

*„... wir hätten den Lärm nicht, wenn wir ihn nicht heimlich wollten. Er ist nicht bloß ungelegen oder gar schädlich, sondern ein uneingestandenes und unverständenes Mittel zum Zweck, nämlich eine Kompensation der Angst, für die nur allzu reichlich Gründe vorliegen. In der Stille nämlich würde die Angst den Menschen zum Nachdenken veranlassen, und es ist gar nicht abzu-
sehen, was einem dann alles zum Bewußtsein käme ...“*

Carl Gustav Jung (1875 – 1961)

1 Einleitung

In den beiden vorangegangenen Zitaten zum Thema Lärm von Robert Koch und C. G. Jung zeigt sich, dass die Wirkung des Lärms auf den Menschen kontrovers, zwiespältig und dem Diskurs schon seit hunderten Jahren ausgesetzt ist.

Diese Dissertation setzt sich mit dem Themengebiet Lärm, speziell Straßen- und Schienenverkehrslärm, auseinander mit dem Ziel, eine neue, aus Bewertung und Berechnung entstandene, Korrelationsgröße zu entwickeln, welche die subjektive Wirkung des Verkehrslärms auf den Menschen besser als die heute zur Verfügung stehenden Größen abbildet.

Grundsätzlich stellt sich die Frage, was ist Lärm? Lärm ist die negativ gefärbte Erlebnisqualität, welche mit bestimmten Schallereignissen einhergeht. Lärm ist kein physikalisches Phänomen, sondern erst psychische, aber auch physische Prozesse, können ein Geräusch bzw. einen Schall zu Lärm werden lassen [Kalivoda et al. 1998].

In der ÖNORM S 5004 wird folgend definiert: "Lärm ist unerwünschter, störender oder belästigender Schall" [ÖNORM S 5004]. Diese allgemeine Definition des Lärms geht auf Ernst Lübecke aus dem Jahr 1935 zurück, der vom Lärm als „unerwünschtem Schall“ oder „unterbrochener Stille“ spricht [Lübecke 1935]. Diese Beschreibung wurde in einer Vielzahl von Arbeiten bestätigt bzw. erweitert [Guski 1987, Guski 1999].

Die Auswirkungen von Lärm auf den Menschen lassen sich, wie aus der Literatur bekannt ist, in drei verschiedene Dimensionen gliedern. Zunächst betrifft die erste Dimension das Gehör und äußert sich in dessen Schädigung, wie in den sogenannten auralen Auswirkungen des Lärms beschrieben. Die zweite und dritte Dimension beziehen sich auf die physiologischen Funktionen des Herz-Kreislaufsystems und des hormonellen Systems, sowie auf das psychosoziale Wohlbefinden und somit auf die Lebensqualität, die durch Störungen der Kommunikation, Leistung und des Schlafs beeinträchtigt wird. Diese beiden Dimensionen der Lärmauswirkungen werden zusammenfassend als extra-aurale Effekte beschrieben [Fleischer et al. 1998].

Die extra-auralen Wirkungen basieren auf der Verarbeitung der Botschaft, die durch Schall übermittelt wird. Dabei handelt es sich, ähnlich wie bei Verkehrslärm, in erster Linie um eine Kombination aus akustischen und gesellschaftlichen (nicht-akustischen) Problemen. Umfangreiche und langwierige Fallstudien haben die Komplexität dieser Problematik verdeutlicht. Es wurde festgestellt, dass das Erfassen einzelner Parameter zu erheblichen Streuungen in den Ergebnissen führt, was überzeugende Aussagen bezüglich der Schädigungsmechanismen erschwert. Die grundsätzliche Schwierigkeit der Übertragbarkeit von Laborexperimenten auf reale Welt trägt ebenfalls zu dieser Herausforderung bei. Diese Studien erfassen kurzfristige Phänomene, während der Lärm, der von Verkehrswegen und Industrieanlagen ausgeht, in der Regel langfristige Auswirkungen hat. Daher ist es für die Zukunft wichtig, komplexere und personenbezogene Parameter zu entwickeln, um die extra-auralen Effekte überzeugend und realitätsnah zu erfassen [Fleischer et al. 1998].

Die Auswirkungen von Lärm auf das Wohlbefinden der betroffenen Personen werden in der Lärmwirkungsforschung unter dem Begriff "Lästigkeit" (englisch: annoyance) zusammengefasst, der sich als Schlüsselbegriff in der Umweltforschung etabliert hat [Schick 1997]. Das Phänomen der Lästigkeit

durch Umweltreize wird wissenschaftlich seit den 1970er Jahren diskutiert. Verschiedene Definitionsversuche [Lindvall & Radford 1973, Miedema 1987] haben gemeinsam, dass ein Umweltreiz, der zuvor oft unbeachtet blieb, nun in der betroffenen Bevölkerung eine emotionale Reaktion hervorruft und mit einem gewissen Gesundheitsrisiko assoziiert wird. Die Vorhersage der Lästigkeit von Lärm gestaltet sich nach wie vor als Herausforderung, da ein Geräusch in einem bestimmten Moment erwünscht sein kann, während es in einem anderen Kontext als unerwünscht empfunden wird [Widmann 1992]. Daher ist es grundlegend, die subjektive Einschätzung der Lästigkeit von Lärm durch eine objektive Beschreibung abzubilden und den umfangreichen Merkmalsraum der Einflussfaktoren zu integrieren.

Im Sinne der Definition der Weltgesundheitsorganisation (WHO), die Gesundheit als einen Zustand vollständigen physischen, psychischen und sozialen Wohlbefindens betrachtet, sind diese extra-auralen Wirkungen gesundheitlich relevant. Obwohl klinisch manifeste Erkrankungen (mit Ausnahme der für den Verkehrslärm nicht relevanten Lärmschwerhörigkeit) nur durch komplexe Zusammenhänge nachgewiesen wurden und signifikante Ergebnisse aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren nur begrenzt auftreten, kann angenommen werden, dass Lärm langfristig zur multifaktoriellen Entstehung chronischer Erkrankungen beitragen kann [Kloepfer et al. 2006].

1.1 Problemstellung

Im täglichen Leben sind wir Menschen ständig einer Vielzahl von Geräuschen ausgesetzt, die von einer großen Anzahl von Personen als unangenehm oder gar beeinträchtigend empfunden werden. Nicht nur Verkehrslärm, sondern auch Freizeit- und Nachbarschaftslärm wirken heute auf den Menschen ein, sodass er nahezu 24 Stunden am Tag von störenden Geräuschen beschallt wird.

Im Jahr 1996 wurde von der Europäischen Kommission mit dem sogenannten Grünbuch ein Rahmen für die europäische Lärmschutzpolitik festgelegt. Darin wird der durch Verkehr, Industrie und Freizeitaktivitäten verursachte Lärm zu einem der zentralen Umweltprobleme in Europa erklärt [Europäische Kommission 1996]. Im sechsten Umwelt-Aktionsprogramm der Europäischen Union wurde unter dem Thema Umwelt und Gesundheit explizit zum Ausdruck gebracht, dass sich mittlerweile die Einsicht durchgesetzt hat, dass die Gesundheit des Menschen durch Umweltprobleme wie Lärm beeinträchtigt wird [Sechstes Umweltaktionsprogramm 2001].

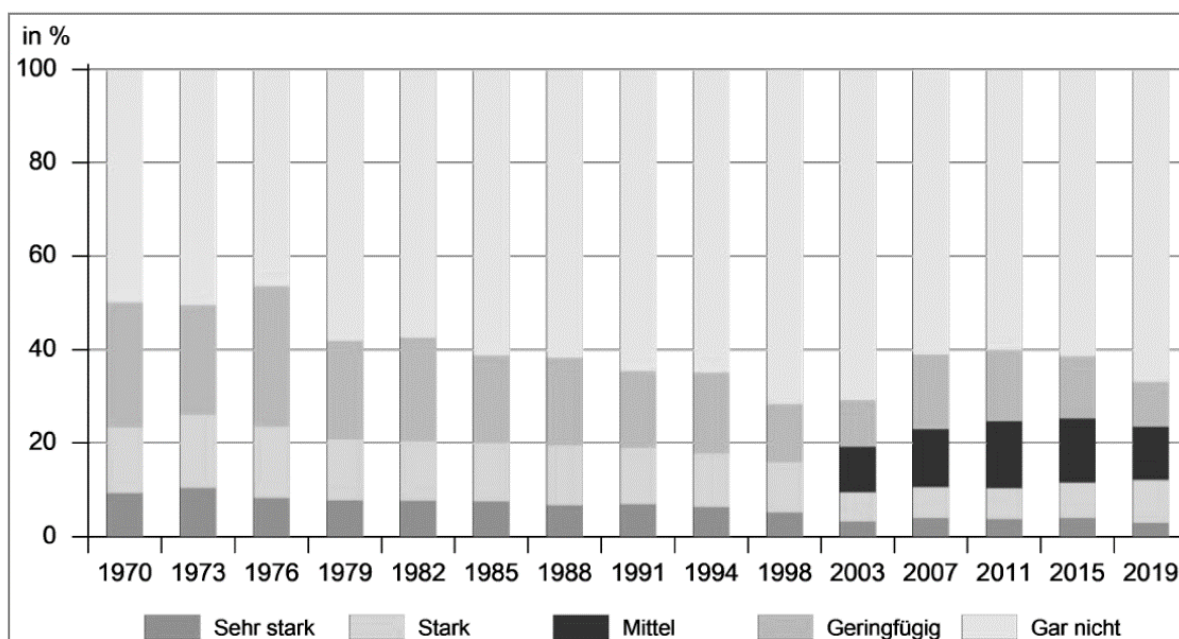
In aktuellen Publikationen der WHO zum Thema „Environmental Noise Guidelines for the European Region“ wird geschätzt, dass ungefähr 40% der Bevölkerung in der Europäischen Union Straßenverkehrslärm von mehr als 55 dB(A) ausgesetzt ist, und dass 20% der Bevölkerung in der Europäischen Union einem Lärmpegel ausgesetzt ist, der von Forschern und Gesundheitsexperten als inakzeptabel angesehen wird [CALM II Network 2007, Berglund et al. 2000, WHO 2018]. Weitere 170 Millionen Menschen leben in so genannten „grauen Zonen“, wo die Lärmpegel hoch genug sind, um eine beträchtliche Belästigung während der Tageszeit zu verursachen [WHO 2018].

In den letzten Jahrzehnten haben sich Emissionen in einigen Ländern durch den Einsatz technologischer (z.B. Veränderung des Straßenbelags) und regionaler Maßnahmen (Bau von Lärmschutzmauern,

Trennung von Verkehr und Wohngebieten) wesentlich gesenkt. Der Umweltlärm bleibt in den Industrieländern, aber auch in den Entwicklungsländern, aufgrund des enormen Verkehrswachstums und der 24-Stunden Wirtschaft weiterhin ein signifikantes Problem [Berglund et al. 2000, Staatsen et al. 2004].

Im Jahr 2019 wurde in Österreich durch die Statistik Austria im Rahmen eines Sonderprogramms auf Basis der Mikrozensusmethode die Einschätzung der allgemeinen Umweltqualität durch die Bevölkerung erfasst [Statistik Austria 2020]. Besonders auffällig waren die Bewertungen der Bereiche Luft und Lärm, wobei 86,7% der Befragten die Luftqualität als gut einschätzten. Im Gegensatz dazu erhielt die Qualität der Lärmsituation die niedrigste Bewertung und wurde nur von 72,3% der Bevölkerung als gut bewertet.

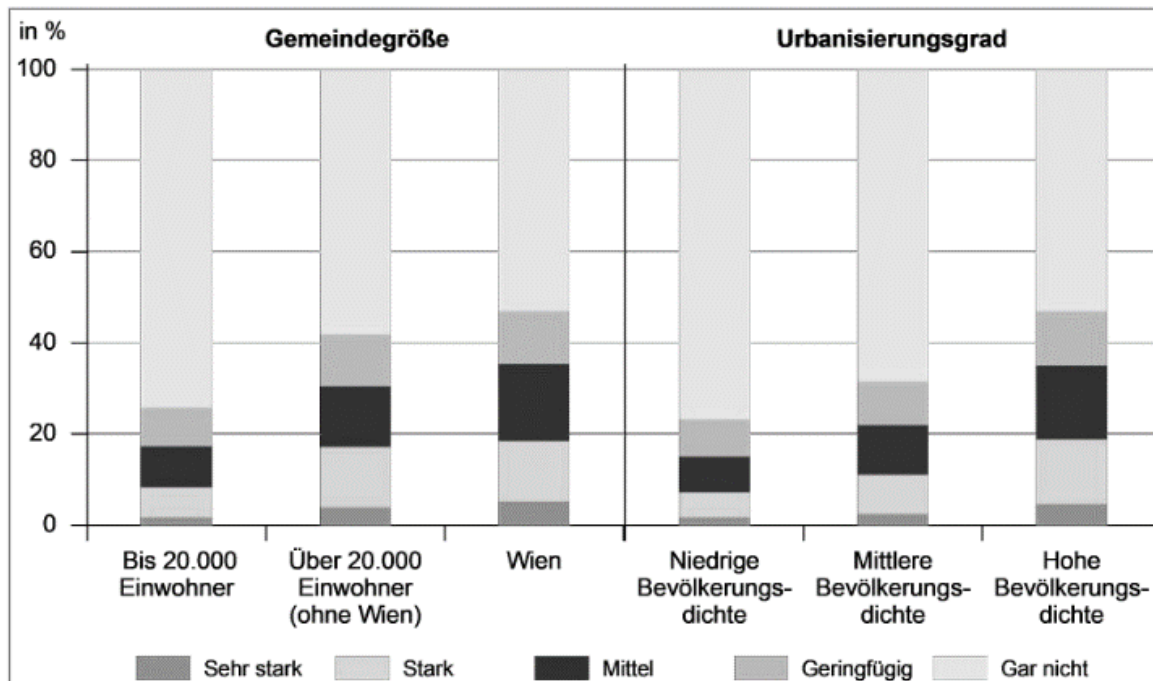
Detaillierte Ergebnisse aus dieser Erhebung zeigen, dass im Jahr 2019 33% der Österreicherinnen und Österreicher angaben, sich durch Lärm in ihrer Wohnung belastet zu fühlen (siehe Abbildung 1). Diese Werte zur Lärmstörung sind im Vergleich zu den Jahren 1998 und 2003 gestiegen, aber im Vergleich zu 2015 leicht gesunken. Insbesondere hat die Lärmstörung nachts im Vergleich zu 2015 leicht zugenommen, während sie tagsüber gesunken ist [Statistik Austria 2020].



Q.: Statistik Austria, Mikrozensus 3. Quartal 2019.

Abbildung 1: Lärmstörungen am Tag und/oder in der Nacht in Österreich unabhängig von der Lärmquelle [Quelle: Statistik Austria, Mikrozensus 2020]

Die geringere Belastung durch Lärm in ländlichen Gebieten wird deutlich in der Gliederung nach Gemeindegröße und Urbanisierungsgrad (siehe Abbildung 2). Die Lärmbelästigung liegt in Gemeinden mit bis zu 20.000 Einwohnern bei 26,1%, was erkennbar unter den Werten in den Ballungszentren liegt (41,7% in Gemeinden mit 20.000 und mehr Einwohnern sowie 47,1% in Wien). Zudem nimmt die Störung durch Lärm im Wohnbereich mit abnehmender Bevölkerungsdichte ab [Statistik Austria 2020].

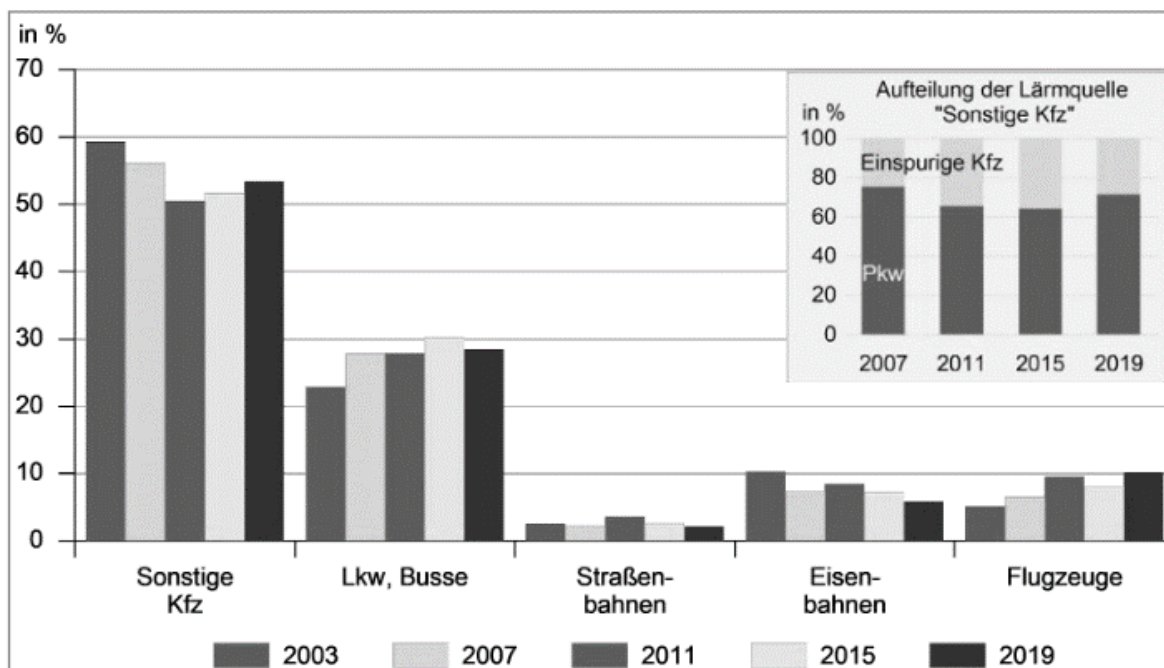


Q.: Statistik Austria, Mikrozensus 3. Quartal 2019.

Abbildung 2: Vergleich der Lärmstörung insgesamt nach Gemeindegröße und Urbanisierungsgrad [Quelle: Statistik Austria, Mikrozensus 2020]

Im Jahr 2015 war der Verkehr erstmals nicht mehr die vorherrschende Lärmquelle. Obwohl die Ergebnisse für das Jahr 2019 sehr ähnlich zu denen von 2015 sind, zeigt sich, dass der Anteil des Verkehrs als Hauptverursacher leicht zurückgegangen ist. Im Jahr 2019 wurde er in 48,5% der Fälle als Ursache für Lärmstörungen genannt. Im Vergleich zu 2003 ist seine Bedeutung erheblich gesunken, und zwar um 25 Prozentpunkte. Die Belastung durch nicht-verkehrsbedingte Lärmquellen hat im gleichen Maße zugenommen, von 26,5% im Jahr 2003 auf 51,2% im Jahr 2019 [Statistik Austria 2020].

Die Belästigung durch den Pkw-Verkehr liegt mit 38,1% deutlich höher als im Jahr 2015 (33,2%), aber niedriger als im Jahr 2007 (42,3%), wie in Abbildung 3 dargestellt. Im Gegensatz dazu fühlten sich mit 15,4% etwas weniger Personen durch 1-spurige Kfz gestört als im Jahr 2015 (18,5%). Abbildung 3 zeigt die Entwicklung von 2003 bis 2019, wobei im Jahr 2003 Pkw und 1-spurige Kfz noch unter dem Begriff "sonstige Kfz" zusammengefasst wurden [Statistik Austria 2020].



Q.: Statistik Austria, Mikrozensus 3. Quartal 2019. Dargestellt werden Anteile der durch Verkehrslärm belästigten Personen in Prozent.

Abbildung 3: Vergleich der verkehrsbedingten Lärmquellen von 2002 bis 2019 [Quelle: Statistik Austria, Mikrozensus 2020]

Etwa 29,8% der von Lärm beeinträchtigten Personen geben an, aufgrund des Geräuschpegels nicht bei geöffnetem Fenster schlafen zu können. Frauen (32,0%) sind dabei etwas häufiger betroffen als Männer (27,4%). Im Zusammenhang mit Verkehrslärm können 15,5% der von Lärm belasteten Personen nicht bei geöffnetem Fenster schlafen, während 14,3% aufgrund anderer Lärmquellen dasselbe Problem haben.

Von den Personen, die aufgrund von Verkehrslärm in der Nacht das Fenster nicht offenlassen können, geben rund 14,0% an, dass sie sich in ihrem Wohlbefinden sehr stark gestört fühlen. Bei 46,2% ist die Störung als stark und bei 35,2% als geringfügig beeinträchtigt zu bezeichnen. Allerdings ist die Beeinträchtigung durch andere Lärmquellen noch ausgeprägter (21,4% sehr stark gestört und 45,1% stark gestört) [Statistik Austria 2020].

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Schall wird physikalisch durch schwingende Körper erzeugt, was den Schallemissionen entspricht, und breitet sich in verschiedenen Medien (gasförmig, flüssig oder fest) aus. Im Detail entstehen mechanische Schwingungen oder Wellen im Hörbereich des Menschen in einem elastischen Medium, was als das physikalische Phänomen des Hörschalls bezeichnet wird. Der Hörbereich eines gesunden, normal hörenden Menschen reicht von etwa 0 bis 140 dB im Schalldruckpegel und von ca. 16 Hz bis 20.000 Hz in der Frequenz. Frequenzen unterhalb dieses Bereichs werden als Infraschall bezeichnet, während Schwingungen mit Frequenzen über dem menschlichen Hörbereich als Ultraschall gelten. Eine weitere

Unterscheidung erfolgt je nach dem schwingenden Medium. Wenn die Schwingungen in festen Körpern auftreten, spricht man von Körperschall, während Schwingungen in Flüssigkeiten als Flüssigkeitschall bezeichnet werden. Die am häufigsten im Alltag auftretende Form von Schall sind Luftschwingungen, die als Luftschall oder einfach als Schall bezeichnet werden. Luftschall entsteht durch Schwankungen der Luftdichte um den statischen Luftdruck [Kalivoda et al. 1998].

Schallwellen unterliegen verschiedenen Einflussfaktoren bei der Ausbreitung, wie etwa Entfernung und Dämpfung. Am Ort ihrer Wirkung werden sie als Schallimmissionen bezeichnet. Schall ist grundsätzlich eine physikalisch-technisch messbare Größe und kann in zwei Hauptbereiche unterteilt werden: Nutzschaall und sogenannter Störschall.

Lärm, definiert als unerwünschter und störender Schall, ist tatsächlich nicht direkt messbar. In diesem Kontext ist allein der Schalldruckpegel messbar. In sämtlichen relevanten österreichischen Gesetzen, Normen und Richtlinien (wie etwa ÖNORM S 5004, ÖNORM S 5001-3, ÖAL-Richtlinie Nr. 6/18 und RVS 04.02.11) wird der Schalldruckpegel als Maß für die Beschreibung und Messung von Lärm verwendet. Bei der Festlegung von Grenzwerten kommen oft der energieäquivalente Dauerschallpegel oder davon abgeleitete Größen zum Einsatz. Die ÖNORM S 5004 bildet dabei die Grundlage und beschreibt das Verfahren zur Messung von Schallimmissionen. Diese Norm beinhaltet auch Hinweise zur Beschreibung spezifischer Eigenschaften von Geräuschen, wie einzelne Schallpegelspitzen, Tonhaltigkeit, Impulshaltigkeit oder Informationsgehalt. Diese Aspekte sind von besonderer Bedeutung für die Beurteilung der Auswirkungen einer Schallimmission auf den Menschen.

Nachfolgend eine Auflistung der relevanten, messtechnischen Kenngrößen für Lärm, basierend auf der ÖNORM S 5004:

Schalldruck p

durch die Schallschwingungen hervorgerufener Wechseldruck, der dem statischen Luftdruck überlagert ist.

Schalldruckpegel L_p

zehnfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses der Quadrate des Effektivwerts des Schalldrucks p und des Bezugsschalldrucks p_0 in dB

$$L_p = 10 \cdot \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \text{ in dB} \quad (1)$$

mit $p_0 = 20 \mu Pa$

Sofern eine Verwechslung mit dem Schallleistungspegel nicht zu erwarten ist, wird vielfach statt Schalldruckpegel die vereinfachte Bezeichnung Schallpegel verwendet.

A-bewerteter Schalldruckpegel L_A

mit der Frequenzbewertungskurve A nach [ÖVE/ÖNORM EN 61672-1] gemessener Schalldruckpegel. Die A-Bewertung stellt eine Annäherung an den Frequenzgang der Empfindlichkeit des menschlichen Ohres dar. Der A-bewertete Schallpegel wird zur Kennzeichnung der augenblicklichen Stärke der Schallimmissionen verwendet.

Energieäquivalenter Dauerschallpegel L_{eq}

Einzahlangabe, die zur Beschreibung eines Schallereignisses mit schwankendem Schallpegel (z.B. Straßenverkehrslärm) dient. Er wird errechnet als jener Schallpegel, der bei dauernder Einwirkung dem unterbrochenen Schall oder Schall mit schwankendem Schallpegel energieäquivalent ist.

Der äquivalente Dauerschallpegel wird üblich A-bewertet angegeben und mit $L_{A,eq}$ bezeichnet.

Im Allgemeinen wird der A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ als der relevante Hauptindikator für die Beurteilung von Lärm verwendet. Diese Zuordnung bezieht sich natürlich auch auf den Verkehrslärm, welcher dieser Arbeit zugrunde liegt. Wie jedoch schon in der vorherigen Definition dargestellt, wird eine subjektive Größe, wie der Verkehrslärm, durch eine Mess- und Rechengröße wie den $L_{A,eq}$ abgebildet. In verschiedenen wissenschaftlichen Studien wurde versucht eine objektiv bessere Beschreibung über den Zusammenhang zwischen Lärm und $L_{A,eq}$ zu finden. Als Beispiel kann dazu erwähnt werden, dass je kleiner $L_{A,eq}$ ist, desto mehr werden Muster im Zeit- und Frequenzbereich als störend wahrgenommen [Genuit et al. 2010]. Grundsätzlich ist die A-bewertete Schalldruckpegelbestimmung ein notwendiges, aber nicht hinreichendes Maß zur Beschreibung der Lästigkeit von Schallereignissen und stellt sich als mangelhaft repräsentative Größe dar.

Um alle relevanten Faktoren in einer gemeinsamen Zielgröße zur Bewertung, Beurteilung und Berechnung von Lärm zu vereinen, bedarf es unterschiedliche Fragestellungen zu beantworten und Untersuchungen durchzuführen.

Unterschied zwischen Bewertung, Beurteilung und Berechnung von Lärm

Bei der Lärmbeurteilung durch eine Bewertung geht es um eine möglichst objektive Analyse der Ist- und Sollsituation und ihrer Wirkung auf den Menschen. Während physikalische Größen, wie der Schalldruckpegel, messbar und damit objektiv bewertbar sind, ist das Lärmempfinden individuell von einzelnen Menschen abhängig und wird damit subjektiv bewertet:

- Bewertung von Lärm findet grundsätzlich von Menschen auf Basis einer vordefinierten Skalierung statt („quasi-objektiv“, d.h. auf definierte Kriterien bezogen)
- Beurteilung von Lärm findet grundsätzlich von Menschen in Form einer „Verbalbeurteilung“ statt („rein subjektiv“, d.h. auf die persönliche Sichtweise des Beurteilers bezogen)

Der Begriff „Berechnung von Lärm“ bezieht sich auf die in Normen und Regeln beschriebenen physikalischen Kennwerte des Schalls und die dazugehörigen definierten Grenzwerte.

Gesetzliche Regelungen in Österreich

In Österreich gibt es kein allgemeines Gesetz zum Schutz vor Lärm; vielmehr ist dies in den jeweils anwendbaren Rechtsbereichen geregelt. Damit einher geht, dass unterschiedliche Behörden für die Bekämpfung von Lärm zuständig sind. Beispielsweise ist bei der Genehmigung von Schienenstrecken die Schienenverkehrslärm-Immissionsschutzverordnung maßgeblich [SchIV 1993]. Als übergreifende Rechtsgrundlage dient das Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz [UVP-G 2000].

Bei der Beurteilung von Lärm von Betriebsanlagen müssen, im Gegensatz zum rein gewerberechtlichen Verfahren, auch Aspekte wie der durch das Vorhaben induzierte Verkehr berücksichtigt werden. Für Lärmschutzmaßnahmen an Straßen gibt es keine festen Richtwerte in Gesetzen oder Verordnungen. Die erforderlichen Maßnahmen werden stattdessen durch Dienstanweisungen oder Richtlinien der zuständigen Behörden (Bundesländer) festgelegt oder ergeben sich aus der Beurteilung im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung – wie beispielsweise anhand der Dienstanweisung der Tiroler Landesregierung [Amt der Tiroler Landesregierung 2010].

In Österreich bestehen nicht nur unterschiedliche Rechtsgrundlagen für die Lärmbekämpfung, sondern auch die Beurteilung von Lärm und die Kriterien für die Umsetzung von Maßnahmen variieren. Es gibt feste Grenzwerte, jedoch erfolgt die Beurteilung auf der anderen Seite auch auf Grundlage der Änderung der tatsächlichen örtlichen Verhältnisse. Für das Bundestraßennetz (Autobahnen und Schnellstraßen) ist die Richtlinie und Vorschrift für den Straßenbau - RVS 04.02.11 Lärmschutz maßgeblich.

Grundlage zur Förderung von Lärmschutzmaßnahmen, z.B. im Bundesland Kärnten, ist die Richtlinie Lärmschutz an bestehenden Landesstraßen [RiLL 2007]. Diese Richtlinie gilt für alle Landesstraßen (sowohl im Freiland als auch im Ortsgebiet) und ist zur Beurteilung von verkehrsbedingten Lärmimmissionen bestehender und neu zu planender Landesstraßen zu verwenden.

Hinsichtlich der schalltechnischen Begriffe, Größen und Messverfahren gelten die Bestimmungen der [ÖNORM S 5001-3], [ÖNORM S 5004], und [ÖNORM S 5005].

Zusätzlich spielen natürlich weitere Faktoren für die Bewertung von Lärm, wie das Gehör mit seinen Empfindungen und die persönliche Einstellung gepaart mit der jeweiligen Lebenserfahrung des Menschen, eine wesentliche Rolle. Wissenschaftliche Studien zeigen, dass sich das Gehör an die Geräuschumwelt adaptiert und Änderungen im Zeit- oder Frequenzbereich als unangenehm empfindet [Genuit et al. 2010]. Ebenso spielen auch die subjektiv erlebten Lebenserfahrungen des Menschen eine wichtige Rolle bei Empfindung von Lärm und auch die charakterlichen Eigenschaften des einzelnen verändern den subjektiven Eindruck in Bezug auf Lärm.

Auch die kognitiven und psychologischen Aspekte bei der Beschreibung von Schallereignissen sind in diesem Zusammenhang nicht zu vernachlässigen. Alle diese Faktoren aus den Bereichen der Physik, Psycho-Physik und Psychologie sind in der nachfolgenden Abbildung zum Schema der Lärmenstehung zu finden und bilden die Basis dieser Arbeit (Abbildung 4).

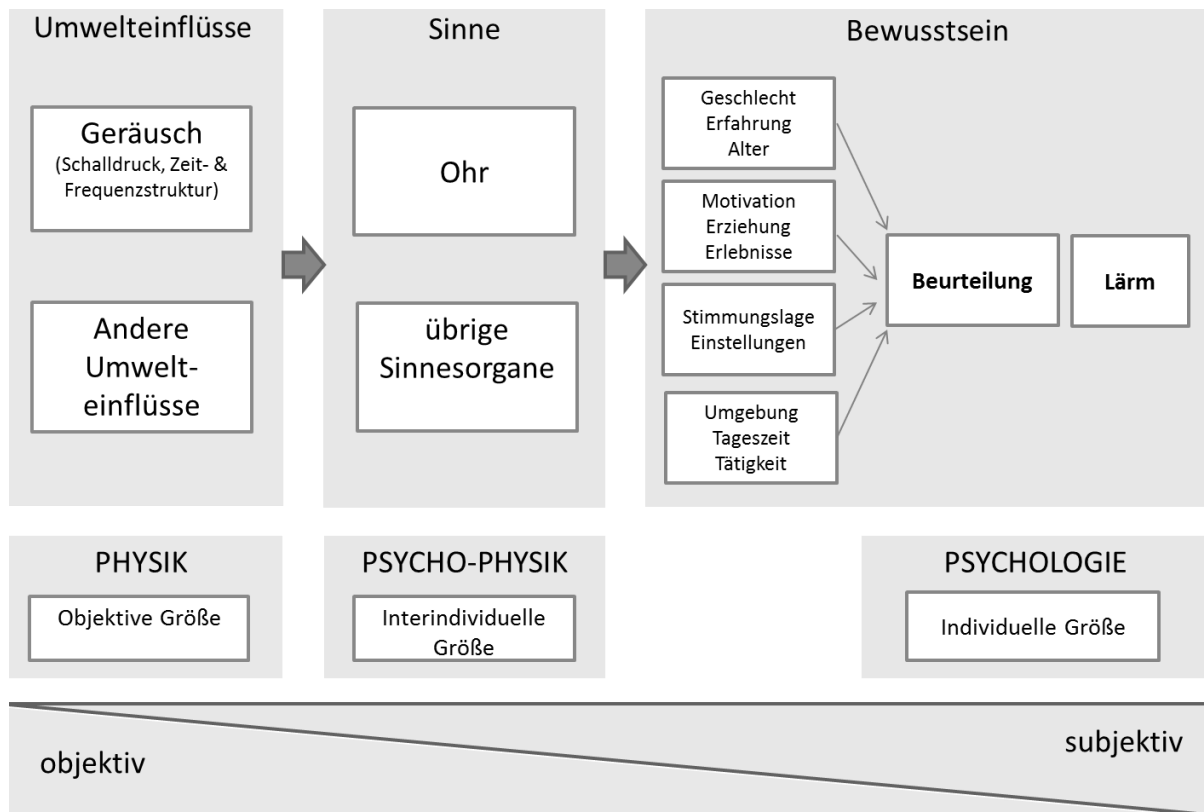


Abbildung 4: Schema der Lärmentstehung [Quelle: Kalivoda et al. 1998], modifiziert Cik

Das Ziel von Lärmbewertungsverfahren besteht darin, aus dem Frequenz- und Zeitverlauf eines Geräusches Kennwerte für die Belästigung zu ermitteln. Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, die Lästigkeit eines Schallfeldes, das über die beiden Dimensionen Frequenz und Zeit dargestellt wird, durch einen einzigen Wert zu beschreiben. Dementsprechend vielfältig sind die Lärmbewertungsverfahren. Allerdings haben alle diese Verfahren eine gemeinsame Herausforderung: Sie messen, berechnen und verwenden als Normgröße den Parameter Schalldruck [Kaliwoda et al. 1998].

Die Festlegung allgemeingültiger Beurteilungsgrößen für Lärm gestaltet sich grundsätzlich schwierig, da die vielfältigen Auswirkungen von Lärm in der Regel von unterschiedlichen Belastungsparametern abhängen. Zum Beispiel ist das nächtliche Aufwachen bei Schienenverkehrslärm vorwiegend von den auftretenden Maximalpegeln beeinflusst, während die Langzeitbelästigung stärker mit einem konstanten Dauerschallpegel zusammenhängt. Der Übergang von den Belastungsparametern zu einer Beurteilungsgröße verbleibt im Grunde im physikalischen Bereich, da für eine abschließende Beurteilung ein funktionaler Zusammenhang erforderlich ist, der der Beurteilungsgröße eine messbare Wirkung zuweist. In der Praxis werden solche Zusammenhänge als Dosis-Wirkungs-Beziehungen bezeichnet. Eine Herausforderung besteht darin, dass Dosis-Wirkungs-Beziehungen dem Einfluss von schwer quantifizierbaren nicht-akustischen Parametern unterliegen. Diese sind häufig äußerst individuell, wie etwa die Grundeinstellung zum spezifischen Verkehrsträger, positive oder negative Erfahrungen mit bereits umgesetzten Schallschutzmaßnahmen, Sorgen bezüglich der zukünftigen Lärmentwicklung am Wohnort, mangelndes Vertrauen in die zuständigen Behörden oder das Kommunikationsverhalten des Lärmverursachers. Nicht-akustische Parameter können von Standort zu Standort variieren oder unter-

schiedlich gewichtet werden. Aktuell sind diese Zusammenhänge Gegenstand verschiedener Untersuchungen in der Lärmwirkungsforschung. Neueste Studien zeigen, dass nicht-akustische Parameter mindestens genauso viel Varianz in den Belastungsurteilen erklären können wie akustische Parameter. Dies könnte dazu führen, dass eine einzige Dosis-Wirkungs-Beziehung für einen Verkehrsträger möglicherweise nicht ausreicht, um die örtliche Belastungssituation angemessen zu beschreiben [Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013].

Basierend auf diesen Erkenntnissen ist das Ziel dieser Dissertation die Entwicklung einer neuen Bewertungsgröße, welche die subjektive Wirkung des Verkehrslärms auf den Menschen besser als die heute zur Verfügung stehenden bzw. in den Praxis angewendeten Größen abbildet (siehe Abbildung 5).

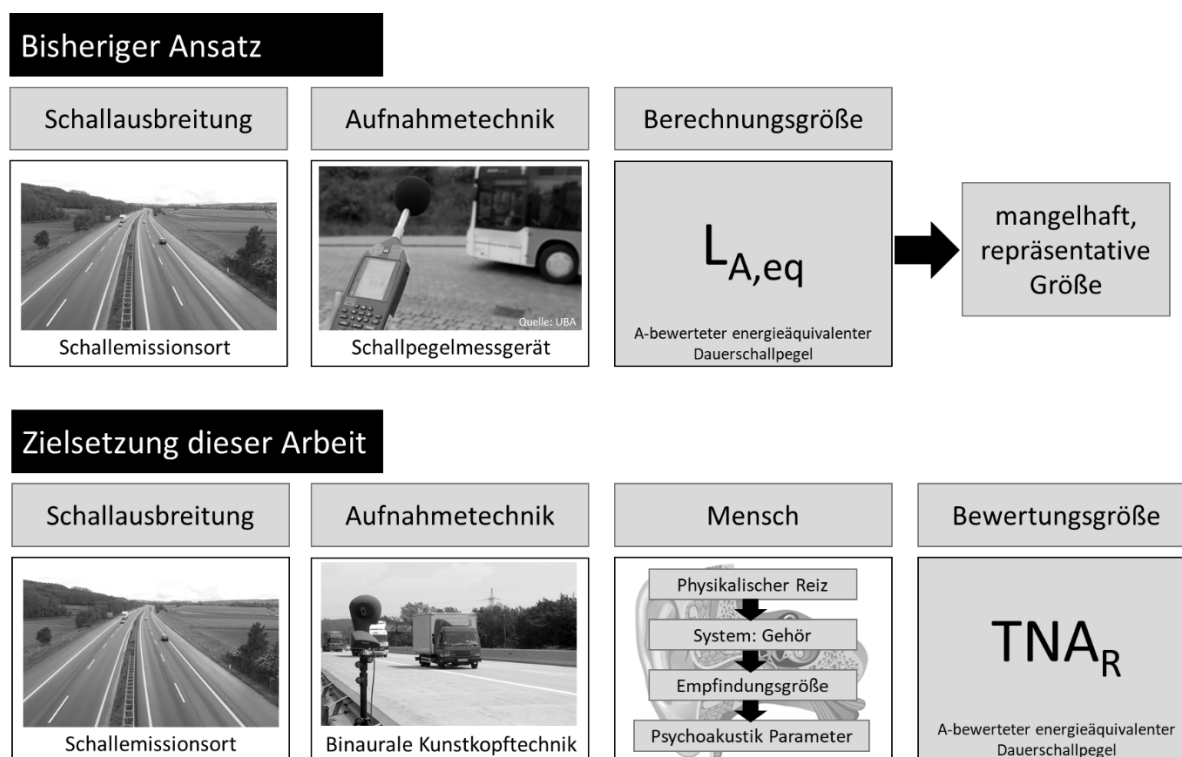


Abbildung 5: Ziel einer neuen Bewertungsgröße für den Straßen- und Schienenverkehrslärm

Dazu wurde auf Basis von unterschiedlicher Mess- bzw. Aufnahmeverfahren, Hörversuchen, statistischen Analysen und mathematischen Berechnungen eine Größe entwickelt, welche nachfolgend in dieser Arbeit in detaillierter Form beschrieben wird. Die wesentlichen Schwerpunkte lagen in der objektiven Berechnung der Geräuschqualität auf Basis von psychoakustischen Größen, den subjektiven Bewertungen in den Hörversuchen in verschiedenen Studienphasen und der statistischen Modellbildung der objektiven und subjektiven Parameter. Durch Integration subjektiver Parameter soll die bisher rein objektive Lärmberechnung zu einer Bewertungsgröße des Verkehrslärms unter Einbeziehung des menschlichen Lärmempfindens erweitert werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Dieser Dissertation liegt eine mehrjährige Forschungsarbeit zum Thema Verkehrslärm zugrunde. In diesem interdisziplinären Forschungsgebiet (Konglomerat aus Akustik, Verkehrswesen, Psychologie und Medizin) wurden unterschiedliche Fragestellungen erörtert und analysiert. Basierend auf den wissenschaftlichen Erkenntnissen dieser Projekte wurde eine Grundlage für die in dieser Dissertation neu entwickelten Methoden und Ergebnisse geschaffen. Nachfolgend eine kurze Beschreibung über die einzelnen Kapitel dieser Arbeit:

Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden allgemeine Themen wie Lärmwirkungsforschung und Akustik im Verkehrswesen oder relevante Faktoren in der Schallereignisbeurteilung auf Basis neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse beschrieben. Ebenso findet man im Unterkapitel Akustik eine detaillierte Beschreibung der psychoakustischen Parameter und kritische Anmerkungen dazu.

Datengrundlagen und Studienphasen

In diesem Kapitel geht es um zwei wesentliche Aspekte dieser Arbeit. Auf der einen Seite um die Erhebung der Datengrundlagen und auf der anderen Seite um die strukturelle Darstellung und Beschreibung des Gesamtkonzeptes dieser Dissertation. Grundlegend gliedert sich das Konzept in einen Labor- und Feldstudienbereich. Basierend auf dieser Unterteilung wurden vier verschiedene Studienphasen durchgeführt, die am Ende zu einer gemeinsamen Zielgröße mathematisch zusammengefasst werden.

Ergebnisse der subjektiven und objektiven Parameter

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Hörversuche aus den einzelnen Studienphasen beschrieben. Dabei erfolgt eine Unterscheidung in objektive und subjektive Parameter um für die nachfolgende Modellbildung eine Grundlage zu schaffen.

Statistische Modellbildung, Ergebnisse und Anwendung

In diesem Kapitel wird die Modellbildung aus den subjektiven und objektiven Parametern beschrieben. Es wurden verschiedene statistische Methoden verwendet, welche in einer Zielgrößenmodellierung zusammengefasst werden. Der Ergebnisindex „Traffic Noise Annoyance on Roads an Rail“ aus dem Modell entspricht einem sogenannten Vektor aus einzelnen gewichteten psychoakustischen Parametern, um die Lärmwirkung quantitativ besser zu bewerten.

Fazit

Hier erfolgt eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Dissertation mit einer verkehrlichen Interpretation und einem zusätzlichen Ausblick über noch potentielle und relevante weitere Forschungstätigkeiten in diesem Fachbereich.

2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden allgemeine Themen wie Lärmwirkungsforschung und Akustik im Verkehrswesen oder relevante Faktoren in der Schallereignisbeurteilung auf Basis neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse beschrieben. Ebenso findet man im Unterkapitel Akustik eine detaillierte Beschreibung der psychoakustischen Parameter und kritische Anmerkungen dazu.

2.1 Lärmwirkungsforschung

In der Lärmforschung besteht weithin Übereinstimmung, dass Lärm als psychologischer Begriff zu verstehen ist. Das heißt, Lärm beschreibt nicht nur eine akustische Belastung, sondern vielmehr die negative Bewertung eines Geräuschs durch eine Person. Hinsichtlich lauter Verkehrsgeräusche kann man davon ausgehen, dass die überwiegende Mehrheit der Betroffenen diese Geräusche als störend empfindet [Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013].

Die Frage nach den verschiedenen Auswirkungen und Risiken von Lärm ist nach wie vor komplex und wird auch in Zukunft keine einfache Antwort finden. Stattdessen erfordert die Beantwortung dieser Frage umfassende und komplexe Untersuchungen, insbesondere zu folgenden Fragen und Hypothesen [Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013]:

- Welchen Einfluss hat das Ausmaß der Lärm- oder Verkehrslärmbelastung auf die Lebensqualität und die Gesundheitsrisiken?
- Wie entstehen diese Auswirkungen?
- Welche Parameter von Lärm oder Verkehrsgeräuschen, wie Lautstärke, Dauer, Häufigkeit, zeitliche Verteilung oder psychoakustische Merkmale, tragen zu erhöhten Gesundheitsrisiken bei (Fokus dieser Dissertation)?
- Welche Rolle spielen die empfundene Lärmbelästigung, Schlafstörungen oder andere nicht-akustische Faktoren?
- Inwieweit können verschiedene Lärmschutzmaßnahmen tatsächlich die Auswirkungen von Lärm mindern?

Ein ganzheitlicher Ansatz ist entscheidend, da die Auswirkungen von Lärm nicht isoliert betrachtet werden können. Störungen tagsüber, sei es durch Lärm oder andere Einflüsse, können den Schlaf eines Menschen beeinträchtigen. Ein gestörter Schlaf wiederum führt zu Müdigkeit und Beeinträchtigungen der Leistungsfähigkeit am nächsten Tag. Langfristig können chronische Schlafstörungen zu Gesundheitsproblemen führen, und Personen, die bereits gesundheitliche Probleme haben, reagieren empfindlicher auf Lärm [Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013].

Das Ausmaß der empfundenen Belästigung hängt von vielen Faktoren ab, sowohl akustischen als auch nicht-akustischen. Daher kann eine Reduzierung der Lautstärke eines Geräuschs die Lärmbelästigung in der Bevölkerung entweder kaum oder aber viel stärker verringern, als aufgrund der Lautstärkeänderung zu erwarten wäre. Die Lärmwirkungsforschung beschäftigt sich mit diesen Zusammenhängen und ihren Ursachen, um Erkenntnisse für den Lärmschutz und die Grundlagenforschung zu gewinnen [Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013].

Die Lärmwirkungsforschung steht vor verschiedenen Herausforderungen, zu denen die Erstellung einer Rangliste relevanter akustischer und wirkungsbezogener Größen, die Quantifizierung von Bewertungskenngrößen, die Identifizierung belastbarer Beziehungen zwischen Lärmexposition und Auswirkungen, die Untersuchung der Wirkungen verschiedener Lärmquellen sowie die Definition von Schutzziele gehören. Zusätzlich ist die Einführung wirksamer Maßnahmen zur Minimierung negativer Lärmwirkungen, sei es durch akustische oder nicht-akustische Maßnahmen, eine wichtige Aufgabe. Diese Herausforderungen erfordern eine eingehende Untersuchung des komplexen Lärmwirkungsprozesses und der vielfältigen Interaktionen der beteiligten Faktoren. Dabei ist es entscheidend, fundierte Erkenntnisse zu gewinnen, um effektive Strategien für den Lärmschutz entwickeln zu können [Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013].

2.1.1 Störungen, Belästigungen und kognitive Leistungen

Grundsätzlich lassen sich in der Fülle der stresstheoretischen Modelle hinsichtlich der Wirkannahmen von Stress zwei klar abgrenzbare Ansätze unterscheiden. Auf der einen Seite stehen reizphysiologische, biologistische Aktivierungstheorien, während auf der anderen Seite Modelle existieren, die den subjektiven, kognitiven Verarbeitungsprozessen von Stressreizen einen zentralen Stellenwert einräumen. Im Kontext der Lärmwirkung wird mittlerweile deutlich, dass weder das eine noch das andere Modell ausreicht, um die gesamte Bandbreite potenzieller Lärmwirkungen zu erklären [van Kamp 1990, Lercher 1996, Ising et al. 2002]. Beide Ansätze sind vielmehr hilfreich und ergänzen einander, anstatt sich gegenseitig auszuschließen. Eine sehr sorgfältige Zusammenführung der beiden Ansätze im Lärmwirkungskontext wurde beispielsweise von [van Kamp 1990] veröffentlicht. In den Arbeiten von [Cohen 1981], [Campbell 1983] und [van Kamp 1990] sind ausführliche Darstellungen der stresstheoretischen Ansätze zu finden.

In der psychologischen Forschung zur Wirkung von Lärm dominiert der stresstheoretische Ansatz, der besagt, dass akute Lärmereignisse zu kurzfristigen psychischen und physischen Veränderungen beim Menschen führen. Die Intensität dieser Veränderungen hängt von der Häufigkeit und Stärke der akustischen Belastung ab, ebenso wie von individuellen und sozialen Erfahrungen, Erwartungen und anderen Belastungen, die unabhängig vom aktuellen Lärm auftreten. Wiederholte Reaktionen auf Lärm können ohne langfristige Folgen bleiben, solange es Schutz- und Ausgleichsmöglichkeiten gibt, wie zum Beispiel das Schließen von Fenstern ohne Beeinträchtigung der Belüftung, ausreichende Ruhezeiten, Vertrauen in die Verantwortlichen für Lärmschutz und effektive Beteiligungsmöglichkeiten bei der Lärmbelastungsregulierung. Wenn jedoch Schutz- und Ausgleichsmöglichkeiten nicht ausreichend vorhanden sind, können wiederholte akute Lärmreaktionen zu langfristiger Belästigung oder Beeinträchtigung der Lebensqualität führen. Sie können auch die kognitive Entwicklung von Kindern beeinträchtigen und zur Entstehung oder Verschlimmerung von Krankheiten beitragen, insbesondere im Bereich des Herz-Kreislauf-Systems. Dabei ist zu berücksichtigen, dass weder die langfristige Belästigung noch die Beeinträchtigung der kognitiven Entwicklung oder die Entstehung von Krankheiten auf einen einzigen Umweltfaktor, wie zum Beispiel Verkehrslärm, zurückzuführen ist. Stattdessen sind sie in der Regel das Ergebnis einer komplexen Interaktion von körperlichen, geistigen, sozialen und Umweltbedingungen [Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013].

2.1.2 Akute Störungen, Belästigungen und kognitive Beeinträchtigungen

Akute Kommunikationsbeeinträchtigungen gehören zu den deutlichsten Störungen im unmittelbaren Zusammenhang mit Lärm. Energiereiche tiefe Schallfrequenzen überlagern dabei die informativen, jedoch energiearmen hochfrequenten Konsonanten der gesprochenen Sprache, was die Verständlichkeit beeinträchtigt. Dies führt zu belastenden Kompensationshandlungen wie verstärkter Anstrengung beim Zuhören, lauterem Sprechen, engerem Zusammenrücken zwischen Sprecher und Hörer, Anheben der Lautstärke von Radio- und Fernsehlautsprechern, Schließen von Fenstern bis hin zur Verlagerung des Aufenthaltsorts [Hellbrück et al. 2010, Lazarus-Mainka 1993]. In nachgelagerten Lärmuntersuchungen werden diese akuten Kommunikationsstörungen und ihre unmittelbaren Auswirkungen in der Regel als die häufigste Störung genannt [Brooker et al. 1985, Finke et al. 1980]. Ein ähnlich hoher Störeffekt wird von Anwohnerinnen und Anwohnern in verkehrslärmbetroffenen Wohngebieten hinsichtlich der Ruhe und Entspannung berichtet. Im Falle von Fluglärm kann die Häufigkeit dieser Nennung sogar die der Kommunikationsstörung übersteigen [Schreckenberget al. 2006]. Dies betrifft Absichten zur Entspannung sowohl im Außen- als auch im Innenbereich der Wohnungen. In diesem Zusammenhang geben die Betroffenen häufig nicht nur Belästigung, sondern auch Verärgerung als Reaktion auf die akute Störung an [Finke et al. 1980].

Zwei kognitive Folgewirkungen akuter Störungen sollen hier noch im Detail beschrieben werden:

- Die akute Störung der verbalen Kommunikation wird als mögliche Ursache der Beeinträchtigung des langfristigen Spracherwerbs und der Leseleistung von Schulkindern betrachtet [Klatte et al. 2010].
- Eine weitere akute Störung kognitiver Prozesse durch Lärm ist möglicherweise weniger auffällig, kann jedoch schwerwiegende Folgen haben: Wenn Menschen während mentaler Tätigkeiten unter schwankenden Verkehrslärmpegeln schwierige Entscheidungen treffen müssen, verlangsamen sich nicht nur ihre Entscheidungszeiten; sie neigen auch vermehrt dazu, Fehler zu machen. Diese Fehler erkennen sie zwar meist selbst wieder, dennoch müssen sie insgesamt erheblich mehr Aufwand betreiben, um ihre Aufgaben zu erledigen [Schönpflug et al. 1982, Sust 1989].

2.1.3 Langfristige Störungen, Belästigungen und kognitive Beeinträchtigungen

Langfristige Störungen und Belästigungen werden in der Regel durch retrospektive Bevölkerungsbefragungen bei Lärmbetroffenen erfasst. Hierbei ist eine Unterscheidung zwischen bevölkerungsrepräsentativen und lärmrepräsentativen Stichproben zu treffen. In bevölkerungsrepräsentativen Stichproben zeigt sich in der Regel, dass die Mehrheit der Gesamtbevölkerung in den vergangenen 12 Monaten entweder gar nicht oder nur leicht durch Verkehrslärm belästigt wurde. Menschen, die in der Nähe von Verkehrswegen oder Flugpfaden leben, sind hingegen je nach akustischer Belastung langfristig mehr oder weniger stark gestört oder belästigt. Entsprechende Erhebungen werden in speziellen (lärmrepräsentativen) Bevölkerungsstichproben durchgeführt, die aufgrund ihrer akustischen Belastung so ausgewählt wurden, dass die Anzahl der Betroffenen in jeder Belastungsstufe etwa gleich hoch ist. Der statistische Zusammenhang zwischen der akustischen Belastung und der langfristigen Störung oder Belästigung wird meist anhand des Anteils der stark belästigten Personen (highly annoyed people) pro Belastungsstufe dargestellt und findet häufig im politischen Kontext Verwendung, um Hinweise für

die Rechtsprechung oder Gestaltung von Schutzmaßnahmen zu erhalten. Eine der bekanntesten Darstellungen dieses Zusammenhangs stammt von [Miedema & Vos 1998] bzw. [Miedema & Oudshoorn 2001]. Dabei wurden Befragungen aus den 60er bis 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts aggregiert, und es zeigten sich insgesamt drei interessante Ergebnisse [Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013]:

- Der Anteil der stark belästigten Personen steigt mit dem Schalldruckpegel der akustischen Belastung zunehmend stärker an.
- Bei allen Schalldruckpegeln variieren die drei Verkehrsarten: Fluglärm wird als am stärksten belästigend empfunden, Schienenverkehrslärm als am wenigsten belästigend; der Straßenverkehrslärm liegt etwa in der Mitte.
- Mit steigendem Schalldruckpegel nehmen die Unterschiede zwischen den Lärmarten zu.

In aktuellen Fluglärmstudien wurde mehrfach festgestellt, dass die durchschnittlichen Belästigungswerte deutlich höher ausfallen als die von Miedema & Vos [1998] bzw. Miedema & Oudshoorn [2001] berechneten Kurven [Guski 2003, Janssen, et al. 2011]. Die genaue Ursache dieser Veränderung ist bisher nicht klar, insbesondere da es unwahrscheinlich ist, dass es sich um einen generellen Trend über die Zeit handelt. Die Ergebnisse neuerer Studien zu Straßen- und Schienenverkehrslärm stimmen weitgehend mit den alten Daten überein. Es besteht daher ein erheblicher Forschungsbedarf, sowohl in Bezug auf diese Diskrepanz als auch auf die langfristigen Auswirkungen von Verkehrslärm aus verschiedenen Quellen.

Weitere Forschungslücken betreffen unter anderem das Ausmaß und die Art des Zusammenhangs zwischen verbal berichteten Belästigungen oder Störungen einerseits und anderen Reaktionsbereichen wie Wertverlust-Befürchtungen, Schlafstörungen und körperlichen Symptomen andererseits. Obwohl die beobachteten Korrelationen nicht besonders hoch sind, erscheint die Annahme plausibel, dass diese verschiedenen Reaktionsbereiche teilweise miteinander verbunden sind, insbesondere wenn es um starke Belästigungen als Vorstufen körperlicher Erkrankungen geht. Es ist jedoch zu beachten, dass individuelle Reaktionsmuster variieren können, was zu unterschiedlichen Symptomen führt [Fahrenberg et al. 2005].

Zuletzt bleibt zu erwähnen, dass es trotz verschiedener getroffener Lärmschutzmaßnahmen oft unklar ist, in welchem Ausmaß diese Maßnahmen die Belästigungen und Störungen (wie Kommunikations- oder Schlafstörungen) tatsächlich verringern. Techniker gehen häufig davon aus, dass bauliche oder betriebliche Maßnahmen, die die akustische Belastung um einen bestimmten Dezibel-Wert reduzieren, auch die Belästigung in ähnlichem Maße reduzieren. Während es für einige Schallschutzmaßnahmen Hinweise gibt, fehlt es an methodisch akzeptablen Evaluationsstudien, die verschiedene Lärmschutzmaßnahmen miteinander vergleichen [Penn-Bressel 1988, Schreckenberger 2011].

2.1.4 Lärmwirkung auf den Schlaf

Ungestörter Schlaf von ausreichender Dauer ist entscheidend für die Aufrechterhaltung der psychomotorischen Leistungsfähigkeit und der Gesundheit [Banks et al. 2007]. Der Schlaf ist ein äußerst komplexer Prozess, der verschiedene physiologische Vorgänge beinhaltet, die im weitesten Sinne der Erholung und der Vorbereitung auf die nächste Wachphase dienen. Dazu gehören der Proteinaufbau, die

Ausscheidung spezifischer Hormone und die Konsolidierung von Gedächtnisinhalten. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) schätzt, dass in der Europäischen Union jährlich etwa 1,6 Millionen gesunde Lebensjahre aufgrund von Umgebungslärm verloren gehen, wobei mehr als die Hälfte davon auf lärmbedingte Schlafstörungen entfällt [Fritschi et al. 2011].

Geräusche werden auch im Schlaf wahrgenommen, bewertet und können je nach Situation zu einer Anhebung des Aktivierungszustandes bis hin zur vollständigen Weckreaktion führen [Oswald et al. 1960, Dang-Vu et al. 2010]. Verkehrslärm hat daher das Potenzial, den natürlichen Schlafablauf zu stören und die Erholungsfunktion zu beeinträchtigen [Basner et al. 2010]. Das Ausmaß der Schlafstörung hängt nicht nur von der Anzahl der Verkehrsgereusche ab, sondern auch von deren akustischen Eigenschaften. Neben dem Maximalschalldruckpegel wurden die Anstiegssteilheit des Schallpegels und hohe Frequenzanteile im Geräusch als wichtige Einflussfaktoren identifiziert [Basner et al. 2011].

Epidemiologische Studien der jüngeren Vergangenheit zeigen zudem konsistent, dass bei langfristiger starker Verkehrslärmexposition mit Gesundheitsbeeinträchtigungen, insbesondere des Herz-Kreislauf-Systems, zu rechnen ist [WHO 2009, Huss et al. 2010, Jarup et al. 2008, Babisch et al. 2009]. Der nächtlichen Exposition mit Verkehrslärm scheint dabei eine besondere Bedeutung zuzukommen [Jarup et al. 2008, Babisch et al. 2009]. Geringere Effekte sind regelmäßig bei Studienteilnehmern zu beobachten, die mit geschlossenem Fenster schlafen, deren Schlafraum auf der dem Straßenverkehr abgewandten Seite des Hauses liegt oder die Anspruch auf passive Schallschutzmaßnahmen haben.

Obwohl viele Fragen durch die in den letzten Jahren durchgeführten Studien beantwortet werden konnten, bleibt weiterhin ein erheblicher Bedarf an Forschung bestehen [Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013]:

- Der überwiegende Teil der bisherigen Studien wurde mit jungen und gesunden Probandengruppen durchgeführt, was die Repräsentativität für die von Verkehrslärm betroffene Bevölkerung einschränkt. Es besteht dringender Bedarf an umfangreichen Feldstudien an repräsentativen Kollektiven, die auch Risikogruppen wie chronisch Kranke und Kinder einschließen, um bestehende gesetzliche Vorgaben zu überprüfen und gegebenenfalls zu verbessern. Neue Untersuchungsmethoden können dabei helfen, qualitativ hochwertige Aussagen auf der Grundlage großer Kollektive mit vergleichsweise geringem Aufwand zu generieren [Basner et al. 2008, Cik et al. 2012].
- Es bedarf umfangreicher epidemiologischer Studien, um zu untersuchen, wie und ab welchem Maß langfristig gestörter Schlaf durch Verkehrslärm die Gesundheit negativ beeinflusst. Dabei sollte neben der Verkehrslärmexposition auch der Schlaf mit physiologischen Methoden erfasst werden.
- Über die kombinierte Wirkung bei gleichzeitiger Exposition mit verschiedenen Verkehrslärmarten ist bisher wenig bekannt. Diese Erkenntnisse sind von entscheidender Bedeutung, da die Gesetzgebung die verschiedenen Verkehrsträger separat betrachtet. Hier sind insbesondere ökologisch valide Feldstudien erforderlich.

2.1.5 Physiologische Reaktionen, akute und chronische Erkrankungen

Lärm wird per Definition als negativ betrachtet und gilt als Umweltbelastungsfaktor, der unspezifische Stressreaktionen beim Menschen auslöst – sowohl körperliche als auch seelische Anpassungsprozesse

an die auftretende Belastung. Elektrophysiologische Erregungen im Hörsystem und die anschließenden subjektiven Bewertungen des Gehörten können zu einer gesteigerten Aktivierung im vegetativen Nervensystem und zur Auslösung hormoneller Wirkungen führen. Somit kann Lärm eine Vielzahl physiologischer Veränderungen im Körper des Menschen hervorrufen, die Anzeichen körperlichen Stresses darstellen. Bei der Erfassung solcher akut auftretender Lärmwirkungen stehen aufgrund ihrer Zugänglichkeit und möglichen gesundheitlichen Bedeutung vegetative Funktionen wie Blutdruck, Herzfrequenz/-rhythmik und Stresshormone (insbesondere das Stresshormon Cortisol und Katecholamine) im Vordergrund.

Eine Vielzahl von Erkrankungen und Gesundheitsstörungen wird mit Lärm in Verbindung gebracht. In den letzten Jahren wurden insbesondere Studien veröffentlicht, die sich mit der Beziehung zwischen Lärm und Herz-Kreislauf-Erkrankungen – insbesondere mit Bluthochdruck (Hypertonie) – befassen. In Deutschland wird häufig die Untersuchung von [Greiser et al. 2007] diskutiert, die mithilfe von Krankenkassendaten vor allem einen Zusammenhang zwischen der ärztlichen Verschreibung blutdrucksenkender Medikamente und der Belastung durch nächtlichen Fluglärm am Flughafen Köln/Bonn feststellt. Der Effekt war bei Frauen ausgeprägter als bei Männern, insbesondere bei Patienten, die Kombinationen verschiedener Arzneimittelgruppen (Herzmedikamente inklusive blutdrucksenkender und sedierender Mittel) verschrieben bekamen. Einige statistische Probleme erschweren die Beurteilung der Effektstärke des nächtlichen Fluglärms, und die Arbeit von [Floud et al. 2011] zeigt beträchtliche Unterschiede zwischen verschiedenen europäischen Staaten in der Medikamentenverschreibung – hier zeigt sich nur hinsichtlich der Verschreibung von Sedativa ein übereinstimmender Effekt des Fluglärms.

Wissenschaftler haben wiederholt argumentiert, dass der Straßenverkehr sowohl eine wesentliche Quelle von Lärm als auch von Luftschadstoffen ist. Da letztere bereits mit kardiovaskulären Erkrankungen in Verbindung gebracht werden, lassen sich die Auswirkungen dieser beiden Emissionsarten auf das Risiko kardiovaskulärer Erkrankungen nur schwer voneinander trennen [Davies et al. 2011]. Studien zeigen jedoch auch, dass die Korrelationen zwischen straßenverkehrsbedingten Luftschadstoffen und Verkehrslärmpegeln gering bis moderat sind [Davies et al. 2011]. In Studien, die die Gesundheitseffekte beider Emissionsarten untersuchten, scheinen Verkehrslärm und verkehrsbedingte Luftschadstoffe voneinander unabhängige Beziehungen zu kardiovaskulären Erkrankungen aufzuweisen [Beelen et al. 2009, Gan et al. 2011, Selbänder 2009].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Lärm nach der aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnis vor allem für bestimmte Herz-Kreislauf-Erkrankungen, insbesondere für die Entstehung von Hypertonie und möglicherweise auch für das Fortbestehen einer Hypertonie, bedeutungsvoll sein kann. Dabei scheint nächtlicher Lärm einen stärkeren nachteiligen Einfluss als Lärm am Tag zu haben [WHO 2009]. Unklar ist weiterhin, ob es eine akustische Schwelle gibt, bei der von einer erhöhten Gefährdung ausgegangen werden kann. Dies wäre jedoch für die Festlegung von Grenzwerten von großer Bedeutung [Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013].

2.1.6 Ökonomische Bewertung der Wirkung von Verkehrslärm

Bei der ökonomischen Bewertung von Auswirkungen des Verkehrslärms stellt sich die Frage, wie die Effekte des Lärms in monetären Einheiten quantifiziert werden können. Hierbei werden in der Regel zwei Hauptaspekte betrachtet: erstens monetäre Verluste im Zusammenhang mit lärmbelasteten

Grundstücken und Immobilien, und zweitens monetäre Kosten, die durch lärmbedingte Krankheiten oder den Verlust von Lebensqualität entstehen [Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013].

Im Bereich der Grundstücks- und Immobilienwerte werden häufig "Hedonic Pricing"-Studien durchgeführt. In diesen Studien werden regionale Marktbeobachtungen zu Grundstücken, Immobilien und Mietpreisen mit regionalen Berechnungen der Lärmbelastung kombiniert. Dabei kommen unterschiedliche Modelle zur Beschreibung der Lärmbelastung zum Einsatz. Diese Modelle variieren beispielsweise in der Gewichtung von Tag- und Nachtbelastungen, der Behandlung von Kombinationslärm (z. B. Straßen- und Schienenverkehrslärm) und der Annahme von Belastungsschwellen, unterhalb derer kein Einfluss auf die Preise erwartet wird [Nelson 2008].

Auf einer anderen Ebene wird versucht, die externen Kosten lärmbedingter Gesundheitsrisiken für die betroffene Wohnbevölkerung abzuschätzen. Dabei konzentriert man sich vor allem auf Gesundheitsrisiken wie Schlafstörungen, Bluthochdruck und Herzinfarkt in Abhängigkeit von der akustischen Belastung. Die dabei auftretenden Kosten lassen sich in drei Kategorien unterteilen [Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013]:

- Krankheitskosten im Sinne von medizinischer Versorgung (Medikamente, Krankenhausbehandlung, Arztbesuche), die in der Regel durch die Krankenkasse bezahlt werden und durch Marktpreise ermittelt werden.
- Krankheitskosten im Sinne von Produktionsverlusten aufgrund der Arbeitsunfähigkeit während der Krankheit, die häufig mit Hilfe der Zahlungsbereitschaft bewertet werden.
- Nutzenverluste wie Unwohlsein, Leid und Schmerz, die oft als Reduzierung der Lebenserwartung ausgedrückt werden und ebenfalls durch Zahlungsbereitschaft bewertet werden.

2.1.7 Lärmwirkungsforschung - interdisziplinär

Die komplexe Natur der Lärmwirkungen erfordert einen wissenschaftlich systematischen und ganzheitlichen Ansatz. Es existiert kein standardisiertes Verfahren hinsichtlich der Methoden zur Erfassung von Verkehrslärmexposition, nicht-akustischen Einflussfaktoren und Lärmwirkungen. Die Auswahl der Methoden sollte auf die beabsichtigte Wirkung abzielen und die Stärken verschiedener Verfahren in einem abgestimmten Methodenmix kombinieren, anstatt auf etwaige methodische Schwächen einzelner Erhebungsverfahren hinzuweisen. Zu den angewandten Methoden gehören Feld- und Laborstudien, Mess- und Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Lärmexposition, Befragungen, psychologische Testverfahren, physiologische Messungen sowie Sekundärdatenanalysen zur Erfassung der Lärmwirkungen. Darüber hinaus erfolgt die Anwendung und fortlaufende Weiterentwicklung elaborierter statistischer Modellierungstechniken zur Quantifizierung der Expositions-Wirkungsbeziehungen.

Es wird deutlich, dass die Lärmwirkungsforschung nicht nur Aspekte der angewandten Akustik, Epidemiologie, Psychologie, Statistik und Umweltmedizin umfasst, sondern auch Schnittstellen zu Kommunikations- und Politikwissenschaften aufweist. Dies liegt daran, dass ethische Prinzipien, Informationsstrategien und gesellschaftliche Partizipation eine entscheidende Rolle bei der Vermittlung und Bewertung von Lärmwirkungen spielen. Falls sich aus empirischer Forschung allein keine eindeutigen Grenz-

werte für alle Wirkungsbereiche ableiten lassen, sind auch philosophische, geistes- und rechtswissenschaftliche Disziplinen gefordert, um durch wissenschaftliche Beiträge und Empfehlungen an einer gesellschaftspolitischen Diskussion über Lärmwirkungsethik teilzunehmen [Forschungsverbund Leiser Verkehr 2013].

2.2 Relevante Faktoren bei der Schallereignisbeurteilung

Das nachfolgende Modell veranschaulicht zusammenfassend den komplexen Wechselwirkungsprozess der Lärmwirkungen mit zahlreichen Faktoren (Abbildung 6). Dabei ist zu erkennen, dass die Beurteilung einer akustischen Umwelt einer mehrdimensionalen Sichtweise bedarf.

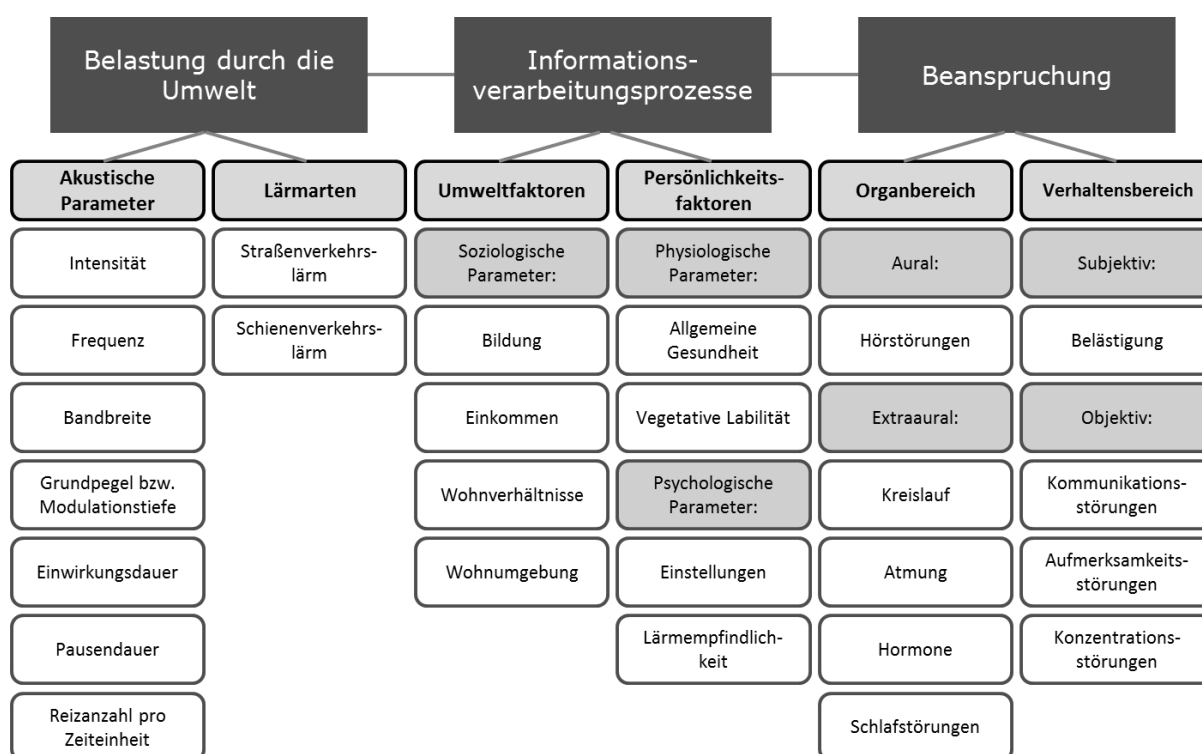


Abbildung 6: Beziehung zwischen Belastungsfaktoren, Moderatorvariablen und Beanspruchungsparametern des Umweltlärms [Quelle: Jansen und Notbohm 1994], modifiziert Cik

In Abbildung 6 zeigt sich die Beziehung der verschiedenen Belastungsfaktoren durch die Umwelt, den Informationsverarbeitungsprozess durch den Menschen und deren verschiedene Beanspruchungen. Die Belastung durch die Umwelt wird in die verschiedenen Lärmursachen unterteilt und in weiter Folge in die dafür beschreibenden akustischen Parameter. Im Bereich der Informationsverarbeitung erfolgt eine Unterteilung in soziologische, physiologische und psychologische Faktoren, welche jeweils nach Gewichtungsgrad unterschiedliche Prozessauswirkungen haben. Die Auswirkungen lassen sich dann als Lärmwirkung nach dem Organ- und Verhaltensbereich kategorisieren.

Die Beurteilung des Schallereignisses durch das „Menschliche Gehör“ wird von zahlreichen Parametern beeinflusst. Abbildung 7 stellt dazu eine gute Übersicht dar. Daraus geht hervor, dass die Beurteilung von Schallereignissen nicht durch eine einfache Größe, wie bislang der A-bewertete Schalldruckpegel, bestimmt werden kann, sondern dass diese Messung nur ein Bestandteil von zahlreichen Parametern ist, die letztendlich zur Beurteilung eines Schallereignisses führen und die abschließend auch Auswirkungen auf die Physiologie des Menschen haben. Diese Parameter können grundsätzlich in zwei Bereiche, den subjektiven (durch Befragung bestimmbar) und den objektiven (direkt messbar), unterteilt werden [Genuit 1994].

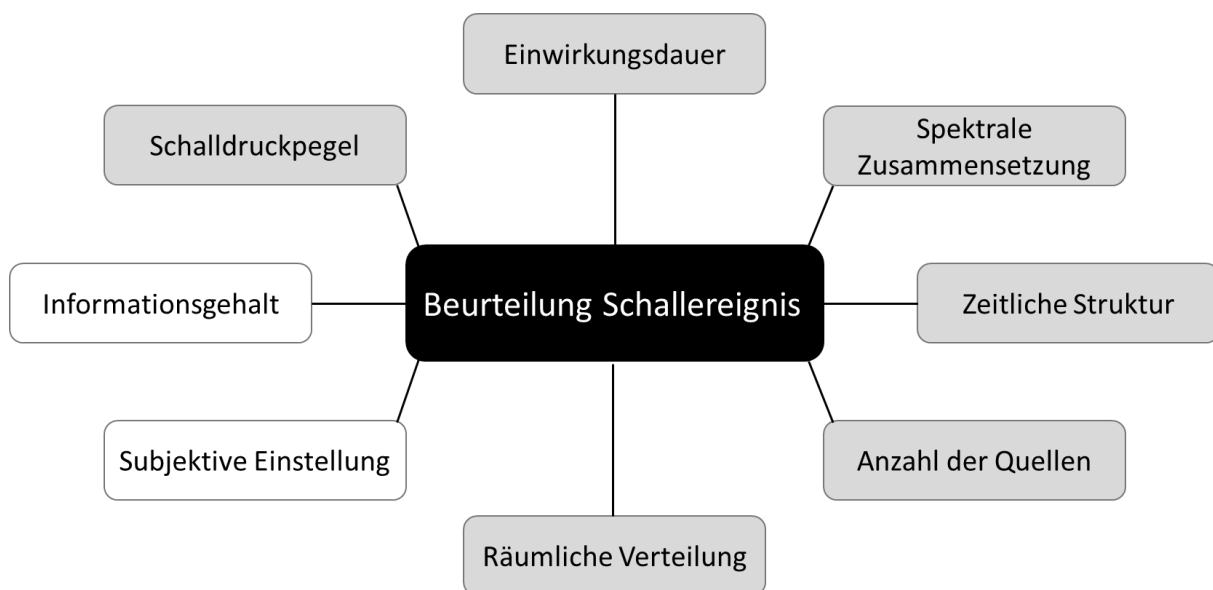


Abbildung 7: Parameter, die bei der Beurteilung eines Schallereignisses relevant sein können [Quelle: Genuit 1994], modifiziert Cik

Die subjektiven Parameter sind abhängig von der subjektiven Einstellung der Person zu Geräuschart, von den optischen Gestaltungen der Geräuschsituation sowie andererseits auch vom Informationsinhalt der Schallereignisse. Die subjektiven Parameter lassen sich nur durch Statistiken beschreiben, eine Umsetzung ist nur durch eine objektive gehörgerechte Schallmesstechnik möglich, wie sie auch in dieser Arbeit als Grundlage verwendet wird.

Die objektiven Parameter lassen sich, wie auch schon aus der Literatur bekannt, in Schalldruckpegel, Einwirkungsdauer, spektrale Zusammensetzung, zeitliche Struktur, Anzahl der Schallquellen und räumliche Verteilung gliedern.

2.3 Lärmwirkung im Verkehrswesen

Bei der Forschung zur Reduktion des Verkehrslärms hat sich in den letzten Jahren der Schwerpunkt auf Maßnahmen zur Minderung der Lärmemissionen verlagert. Nachdem lange Zeit die Optimierung der Form und der Materialien von straßen- und bahnseitigen Lärmschutzmaßnahmen im Mittelpunkt des

Interesses gestanden war, werden in letzter Zeit vor allem die Möglichkeiten der Emissionsminderung durch Maßnahmen am Fahrzeug selbst und an der Fahrbahndecke untersucht. Beim Schienenverkehr werden Reduktionspotentiale für die Emissionen des rollenden Materials gesucht.

Beim Straßenverkehr sind im Wesentlichen die Antriebsgeräusche, das Rollgeräusch, sowie Strömungsgeräusche als Geräuschquellen zu nennen.

Aufgrund der Entwicklungen der Grenzwerte gemäß EU-Richtlinien wurden in den letzten 25 bis 30 Jahren die Antriebsgeräusche sowohl beim Pkw als auch beim Lkw erheblich (in der Größenordnung von rund 10 dB) abgesenkt.

Aufgrund dieser Minderungen bei den Antriebsgeräuschen wird heutzutage die Schallemission des Straßenverkehrs durch das Reifen-/Fahrbahngeräusch (Rollgeräusch) bestimmt. Dies gilt auch schon für die in der Stadt gefahrenen niedrigen Geschwindigkeiten. Daraus folgt, dass eine weitere Lärmmin- derung an der Quelle des Kfz vordringlich in den Komponenten Reifen und Fahrbahn zu suchen sind. Verbesserungen in diesem Bereich machen sich vor allem im hochrangigen Straßennetz mit den hohen Geschwindigkeiten bemerkbar.

Aus diesen Gründen werden die Schwerpunkte der Lärmforschung in den nächsten Jahren auch auf dem Gebiet der Lärmemissionsminderung durch eine lärmtechnische Optimierung des Systems Rei- fen/Fahrbahn liegen.

Verursacht durch den Verkehr, stellt Lärm ein komplexes Phänomen dar, das auf zahlreichen, teilweise disparaten Elementen und Zusammenhängen beruht. Um das Phänomen sowie das Problem des Ver- kehrslärms angemessen zu verstehen und die herausfordernden Fragen bezüglich Belästigung, Zumut- barkeit und Lärmintoleranz bzw. Lärmtoleranz zu beantworten, ist es erforderlich, zunächst die spezi- fischen Merkmale des Lärms genau zu erfassen. Hierbei ist es notwendig, ein breites Spektrum von Lärmphänomenen zu betrachten, um dann im Rahmen einer Analyse und einer Systematik, die den unterschiedlichen Lärmphänomenen Rechnung trägt, sowohl einige grundlegende Eigenschaften als auch relevante Besonderheiten des durch Verkehr verursachten Lärms zu klären. [Kloepfer et al. 2006].

Merkmalsraum (Parameterraum) Verkehrslärm

Der auf den Menschen wirkende Verkehrslärm hat als Entstehungsursache einen sehr großen und komplexen Merkmalsraum. In Abbildung 8 sind die relevanten Merkmale für den Bereich Schiene und Straße dargestellt.

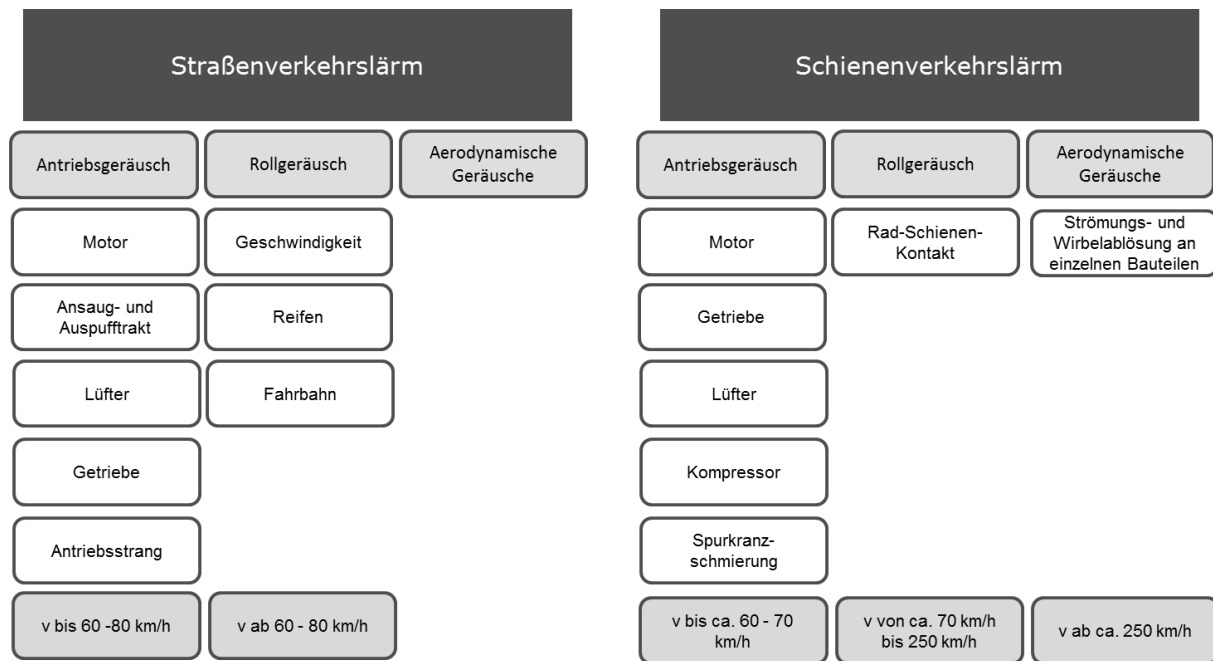


Abbildung 8: Relevante Merkmale des Straßen- und Schienenverkehrslärms in Bezug auf die Geschwindigkeit

Straßenverkehrslärm bezeichnet sämtlichen Lärm, der durch den Straßenverkehr erzeugt wird (siehe Abbildung 9). Dies schließt hauptsächlich Geräusche von Personenkraftwagen, Lastkraftwagen, motorisierten Zweirädern und Schienenfahrzeugen ein. Die Schallquellen umfassen Rollgeräusche von Reifen, Schienenlaufräder, Windgeräusche aufgrund des Luftwiderstands, Motorgeräusche, Abgasanlagen und akustische Signale. Der Baustellenlärm durch Baustellenfahrzeuge und Baumaschinen spielt eine geringere Rolle. Die maßgeblichen Entstehungsmechanismen können wie folgt unterteilt werden:

- **Reifen-Fahrbahn-Geräusche:** Die bedeutendste Quelle für Straßenverkehrslärm ist das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Die Rauheit der Fahrbahn und das Reifenprofil bringen Profilstollen und Karasse in Schwingungen, die Luftschall erzeugen. Zudem entstehen aerodynamische Geräusche durch den Ein- und Auslauf von Luft im Reifenlatsch (sog. Airpumping). Reifen-Fahrbahn-Geräusche dominieren über einen weiten Geschwindigkeitsbereich (ab etwa 30–50 km/h, je nach Gangwahl). Insbesondere treten sie auf Natursteinpflaster mit rauer Oberfläche und breiten Fugen sowie bei Lastkraftwagen deutlich auf. Die Einführung von Radialreifen seit den 1950er Jahren hat, ebenso wie der Trend zu Breitreifen, das Geräuschniveau, insbesondere bei Personenkraftwagen, signifikant erhöht [Sanderg et al. 2002].
- **Antriebsgeräusche:** Diese resultieren aus dem Betrieb von Motor, Getriebe und Antriebsstrang eines Fahrzeugs sowie aus den Nebenaggregaten und Anbauteilen. Im Verbrennungsmotor entstehen Geräusche durch Verbrennungsdrücke, Druckschwankungen im Ansaug- und Abgassystem sowie mechanische Kräfte im Ventil- und Kurbeltrieb. Bei Elektroantrieben werden sie durch elektromagnetische Kräfte, in den Lagern und durch Schaltvorgänge erzeugt. Antriebsgeräusche

werden als Luft- und Körperschall ins Fahrzeuginnere und nach außen weitergeleitet und dominieren – abhängig von Fahrzeugklasse und Antriebsart – bei niedrigen Geschwindigkeiten und hoher Motorleistung, beispielsweise beim Anfahren [Steven 2000].

- **Aerodynamische Geräusche:** Bei hohen Geschwindigkeiten entstehen an der Fahrzeugkarosserie und den Anbauteilen lärmerzeugende Luftwirbel. Deren Untersuchung erfolgt in aeroakustischen Windkanälen. Bei Autobahngeschwindigkeiten und "leisen" Reifen-Fahrbahn-Kombinationen können die aerodynamischen Schallquellen deutlich dominieren [Helfer 2005].
- **Sonstige Geräusche:** Notwendige akustische Signale wie Hupen, Klingeln und Sirenen tragen zur Verkehrssicherheit bei und können daher nicht vollständig vermieden werden. Zudem werden Geräusche durch Audiowiedergabesysteme oder das Zuschlagen von Türen und Hauben verursacht.

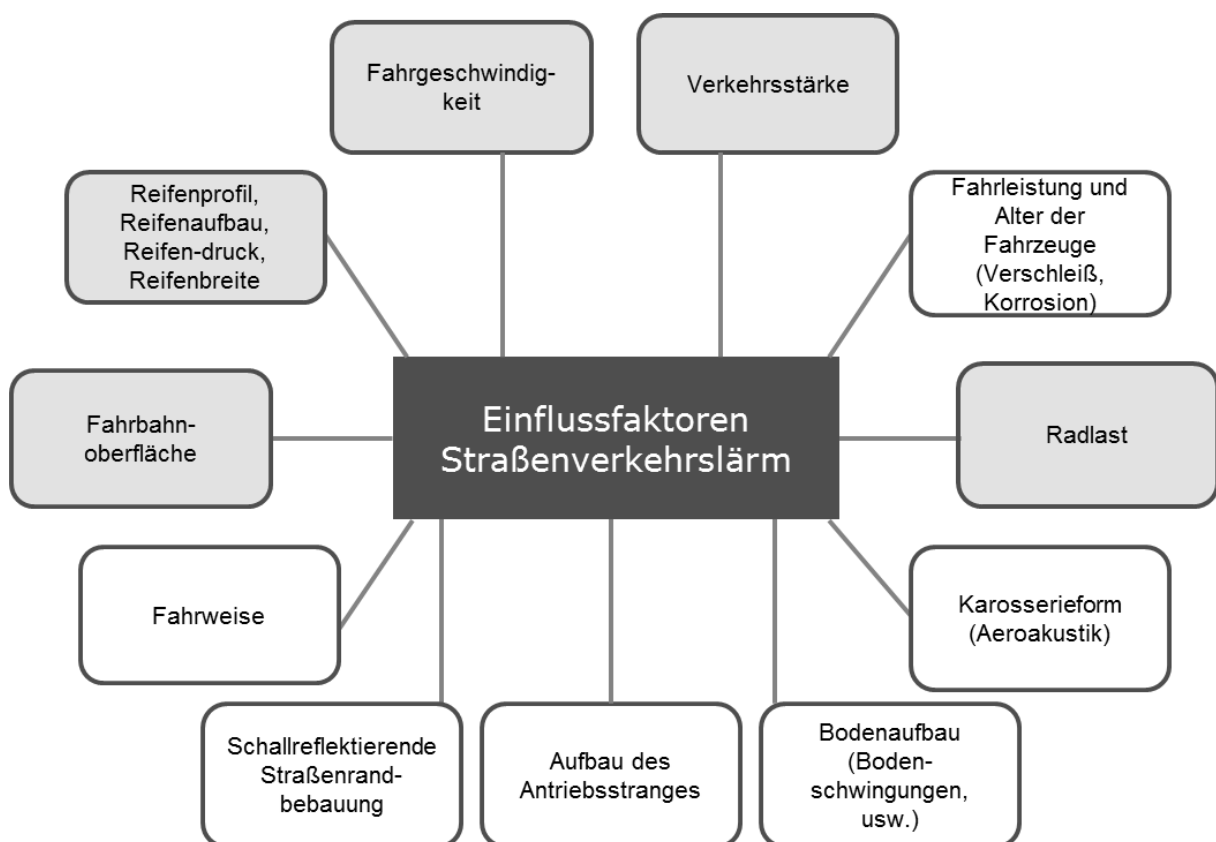


Abbildung 9: Relevante Einflussfaktoren auf den Straßenverkehrslärm

Schallimmissionen, die durch den Betrieb von Eisenbahnen und Straßenbahnen verursacht werden, werden als Schienenverkehrslärm bezeichnet. Hauptsächlich sind die Geräusche von Zugfahrten sowie Anfahrt-, Brems- und Rangiergeräusche. Die bei Zugfahrten erzeugten Geräusche lassen sich im Wesentlichen drei Wirkungsmechanismen zuordnen, die jeweils in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich den Gesamtpegel der Schallemission bestimmen [16. BImSchV 2012]:

- **Antriebsgeräusche:** Im Geschwindigkeitsbereich vom Fahrzeugstillstand bis etwa 40 km/h wird die Geräuschemission maßgeblich durch die Traktionsausrüstung beeinflusst. Antriebsgeräusche

entstehen durch den Betrieb von Motoren, Getrieben und anderen Komponenten des Antriebsstrangs, einschließlich Nebenaggregaten und Anbauteilen. Sie werden als Luft- und Körperschall sowohl in das Fahrzeuginnere als auch nach außen weitergeleitet. Diese Geräusche dominieren, abhängig von der Fahrzeugklasse und Antriebsart, bei niedrigen Geschwindigkeiten und hoher Motorleistung, beispielsweise im Stadtverkehr oder beim Anfahren.

- **Rad-Schiene-Geräusche:** Im Geschwindigkeitsbereich von etwa 40 km/h bis etwa 280 km/h wird die Geräuschemission vorrangig durch das Rollgeräusch am Rad-Schiene-Kontakt bestimmt.
- **Aerodynamische Geräusche:** Oberhalb von etwa 280 km/h wird die Geräuschemission vorwiegend durch aerodynamisch bedingte Geräusche beeinflusst.

Zusätzlich treten gelegentlich Geräusche wie das Quietschen in Kurven und Bremsgeräusche auf. Falls diese Geräusche als störend empfunden werden, manifestieren sie sich als Lärm, der aufgrund seiner Lautstärke und Struktur gesundheitsschädlich oder belastend für Menschen und die Umwelt sein kann.

2.4 Psychoakustische Parameter und Lästigkeit

Im Kapitel 1.2. werden die allgemeinen Normgrößen (Schalldruckpegel, energieäquivalenter Dauerschallpegel) für die Schallimmissionsmessung beschrieben, welche aktuell in Normen und Richtlinien auch für die Bewertung von Umweltgeräuschen verwendet werden.

Die adäquate Bewertung von Umweltgeräuschen zur Vorhersage von Lärmbelästigung ist eine komplexe Aufgabe, die von der spezifischen Ausprägung des Umweltgeräuschs abhängt. Insbesondere bei Umweltgeräuschen mit einem deutlich tieffrequenten Anteil ist es notwendig, dies angemessen zu berücksichtigen. In solchen Fällen könnte beispielsweise statt eines A-bewerteten Schalldruckpegels ein C-bewerteter Schalldruckpegel ermittelt werden.

Die Einbeziehung von psychoakustischen Größen wie Lautheit oder Schärfe ermöglicht differenzierte Aussagen über die Charakteristik von Schallereignissen. Zahlreiche Experimente zeigen, dass die Wahrnehmung der Lautstärke besser mit dem psychoakustischen Parameter Lautheit korreliert als mit dem A-bewerteten Schalldruckpegel [Hellmann 1987]. Die Hörempfindung Schärfe hingegen erfasst die Tatsache, dass Geräusche mit einem energetischen Schwerpunkt im Bereich hoher Frequenzen als scharf und schrill wahrgenommen werden.

Um die Bedeutung dieses psychoakustischen Parameters zu verdeutlichen, kann ein einfaches Beispiel mit zwei Rauschsignalen dienen. Wenn ein "rosa Rauschen" mit einem zu hohen Frequenzen abfallenden Leistungsdichtespektrum von 3 dB pro Oktave mit einem "weißen Rauschen" verglichen wird, das ein frequenzunabhängiges konstantes Leistungsdichtespektrum aufweist, und beide Rauschsignale einen gleichen A-bewerteten Schalldruckpegel (70 dB(A)) haben, sind sie dann gleich laut und gleich belästigend? Die psychoakustische Lautheit nach DIN 45631/A1 und die psychoakustische Schärfe nach DIN 45692 über die Zeit für die beiden Rauschsignale zeigen, dass das "rosa Rauschen" bei gleichem A-bewerteten Schalldruckpegel lauter, aber weniger psychoakustisch scharf ist als das "weiße Rauschen". Es ist aus Experimenten bekannt, dass in Bezug auf die Lästigkeit das "weiße Rauschen" im Vergleich zum "rosa Rauschen" bei gleichem A-bewerteten Schalldruckpegel als lästiger empfunden wird [Genuit & Fiebig 2014].

Generell stellt sich die Frage, ob man die Eigenschaften eines Schallereignisses instrumentell detailliert erfassen oder eher die durch dieses Ereignis ausgelöste Empfindung beim Betroffenen bestimmen sollte. Der erste Ansatz ermöglicht eine präzise instrumentelle Durchführung, jedoch ist für die Bestimmung von Lärmbelästigung der zweite Weg vorzuziehen: Welche tatsächlichen Empfindungen (Hörerereignisse) ruft ein Schallereignis hervor? In diesem Zusammenhang kann die Psychoakustik einen entscheidenden Beitrag leisten.

Die Psychoakustik rückt den Empfänger, also den Menschen, in den Fokus ihrer Betrachtung und versucht, ein Hörereignis mithilfe von Parametern wie Lautheit, Schärfe, Rauigkeit, Tonalität und anderen umfassend zu beschreiben [Fastl et al. 2007]. Dabei analysiert sie das Hörereignis eines Menschen in seiner komplexen Abhängigkeit von Signalzusammensetzung, zeitlichen Mustern und dem Zusammenspiel verschiedener Frequenzen unter Berücksichtigung der Mechanismen der Signalverarbeitung im Gehör. Im Bereich der Entwicklung und Optimierung technischer Produkte kommt die Psychoakustik bereits seit Jahrzehnten zum Einsatz, insbesondere bei der akustischen Gestaltung der Innenraumakustik von Kraftfahrzeugen [Genuit 2010]. In diesem Kontext existieren keine gesetzlichen Vorschriften. Stattdessen wird die wahrgenommene Produktgeräuschqualität durch potenzielle Kunden als wettbewerbsrelevantes Kriterium interpretiert. Diese Entwicklung hat zu einem verstärkten Einsatz und einer kontinuierlichen Weiterentwicklung psychoakustischer Größen geführt, die spezifische Wahrnehmungseffekte instrumentell nachvollziehbar und punktuell quantifizierbar machen.

Nachfolgend noch eine kurze allgemeine Beschreibung und in weiterer Folge eine Vertiefung in die psychoakustischen Grundlagen, welche als Basis für die Berechnung der akustischen Parameter in dieser Arbeit dienen.

Psychoakustische Parameter

Die Psychoakustik beschäftigt sich mit der Darstellung der Wechselwirkung zwischen der menschlichen Wahrnehmung von Schall (Hörerereignis) und den physikalischen Schallfeldgrößen (Schallereignis). Die Verarbeitung physikalischer Signale zu einem Hörerlebnis wird dabei durch mehrere Stufen modelliert, die dem einzelnen Ohr und der kognitiven Signalverarbeitung zugeordnet werden.

Es ist zweckmäßig, rein physikalische Parameter wie Pegel, Frequenz, Bandbreite, Dauer oder Modulationsgrad in gehörgerechte Parameter zu überführen. In der Regel wirken dabei mehrere physikalische Größen auf eine psychoakustische Größe ein, die als einzelne Empfindung unabhängig von anderen beurteilt werden soll. Die Skalen psychoakustischer Größen beschreiben die Intensität der Empfindung.

Gängige psychoakustische Parameter umfassen Lautheit (in sone), Schärfe (in acum), Rauigkeit (in asper), Schwankungsstärke (in vacil) und Tonhöhe (in mel), wobei letztere in dieser Arbeit nicht weiter untersucht wird. Tonhaltigkeit und Impulshaftigkeit sind zusätzliche bedeutende Größen, die bei der Bildung der Beurteilungspegel berücksichtigt werden.

Nachfolgend werden die psychoakustischen Parameter erklärt, auf welche in dieser Arbeit zurückgegriffen wird:

Lautheit

Die Lautheit ist eine Empfindungsgröße und kann getrennt von anderen psychoakustischen Wahrnehmungen wahrgenommen werden. Ein wichtiger Effekt bei der Lautheitsempfindung ist die Verdeckung. Kommt es zu einer teilweisen Verdeckung eines Schalles durch einen Verdeckter, so nimmt die Lautheit des verdeckten Schalles Werte zwischen null und der jeweiligen noch hörbaren Lautheit des Schalles an. Der Wert null entspricht hier der Verdeckungsgrenze. Die Effekte der teilweisen Verdeckung treten spektral und zeitlich auf.

Die Lautstärkeempfindung ist messbar, indem man den zu messenden Schall mit einem bekannten Schall auf Lautstärkeunterschiede vergleicht. Dies kann man erreichen, indem man zum einen ein Verhältnis durch Veränderung der Hörreize findet oder ein Verhältnis zweier Reize beurteilt. In der Psychoakustik dient ein 1 kHz Ton als Standardton. Dem 40 dB Schalldruckpegel des 1 kHz Tones wird die Lautheit 1 sone (lat. sonare - klingen) zugeordnet. Für eine Lautstärkebeurteilung ist die Verdoppelung oder Halbierung nützlich. Viele Messungen zeigen, dass der Pegel eines 1 kHz Tons im ebenen Feld um 10 dB erhöht werden muss, um eine Verdoppelung der Lautheit zu erzielen. Der Pegel von 50 dB entspricht dann einer Lautheit von 2 sone. Somit kann der Exponent der Lautheitsfunktion wie folgt berechnet werden:

Eine Zunahme von 10 dB bewirkt eine Erhöhung der Lautheit um den Faktor 2. Dies entspricht auf einer logarithmischen Basis einem Wert von 3 dB. Daher entspricht der Exponent des Potenzgesetzes, das die Lautheitsfunktion eines 1 kHz Tones über 40 dB beschreibt, $3/10$. Bei Lautstärkepegel unter 40 dB wird der Pegelunterschied für eine Verdoppelung oder Halbierung der Lautstärke geringer. Es ergeben sich Pegelunterschiede von 5 dB bei 20 dB oder 2 dB bei 10 dB. Nimmt man die Lautstärke eines 1 kHz Tones mit einem Pegel von 40 dB zu Hilfe, kann man die Lautheitsfunktion bestimmen. Sie wird durch die durchgezogene Linie in Abbildung 10 dargestellt.

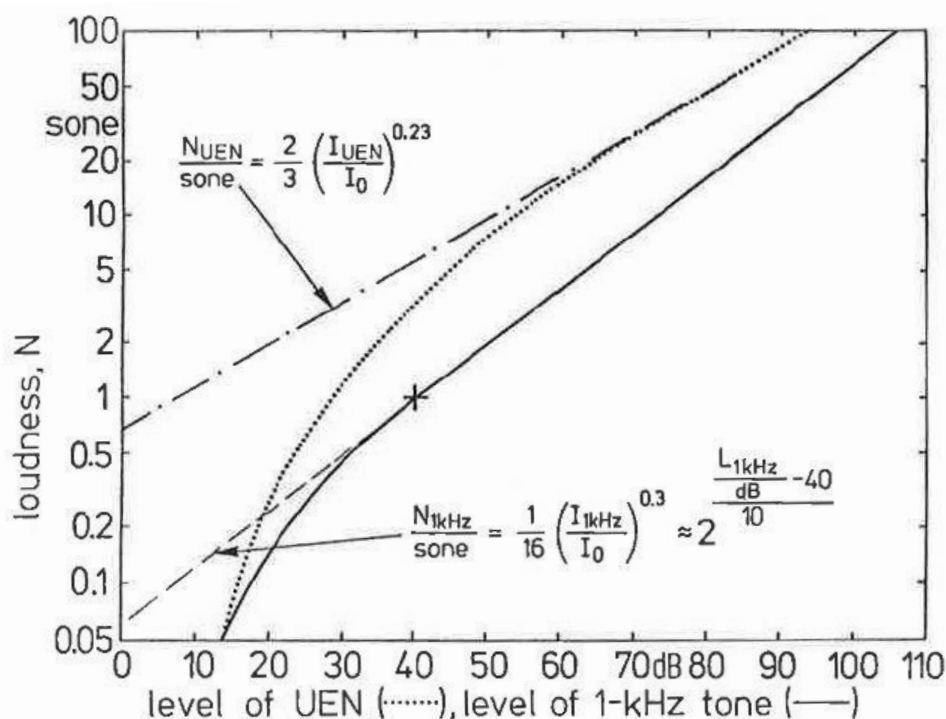


Abbildung 10: Lautheitsfunktion eines 1 kHz Tones (durchgezogene Linie) und eines gleichmäßig angeregten Rauschens (gestrichelte Linie). Die Lautheit wird als Funktion des Schalldruckpegels angegeben. Gestrichelte und punktiert-gestrichelte Linien stellen Näherungen dar [Fastl et al. 2007].

Die Abszisse ist der Schalldruckpegel des 1 kHz Tones. Die Ordinate ist der logarithmisch skalierte Lautstärkepegel. Der Exponent des Potenzgesetzes, das dem Verlauf einer Geraden entspricht, wird durch die Steilheit der Geraden bestimmt, die bei Pegeln über 30 dB auftritt. Bei Pegeln unter 30 dB ist die Potenzfunktion nicht weiter relevant. Der Unterschied zwischen der gestrichelten und der durchgezogenen Linie zeigt die Unstimmigkeit. Bei Pegel unter 10 dB nimmt die Lautstärke des 1 kHz Tones drastisch ab und erreicht bei einem Schalldruckpegel von 3 dB den Nullpunkt. Die Lautstärkefunktion wird normalerweise nur für den 1 kHz Ton angegeben. Aber mit Hilfe der Kurven gleicher Lautstärke kann auch für Töne anderer Frequenzen eine Funktion angegeben werden. Da die Einheit phon auf den Lautstärkepegel eines gleichlauten 1 kHz Tones bezogen ist, können die Kurven gleicher Lautstärke in Abbildung 10 neben dem Lautstärkepegel in phon auch mit vergleichbarer Lautheit beschriftet werden. Eine Zunahme von 10 phon entspricht einer Verdopplung der Lautheit und 20 phon führt zu einer Vervierfachung der Lautheit. Bei Lautstärken unter 40 phon nimmt die Lautheit stark ab und beträgt bei 20 phon 0,15 sone [Fastl et al. 2007].

Für die Bestimmung der Lautheit wird zwischen verschiedenen Signalstrukturen unterschieden. Stationäre, zeitvariante oder impulsive Signale haben aufgrund der Zeitabhängigkeit der Lautheit unterschiedliche Anforderungen für deren Berechnung und werden deswegen mittels verschiedener Verfahren berechnet. Die grundlegendsten Lautheitsverfahren sind das Modell nach Zwicker (erstmal erwähnt 1958) [ISO 532] und das Modell nach Moore [ANSI S3.4-2007]. Diese beiden Methoden sind allerdings nur für stationäre Signale anwendbar. Für zeitvariante Signale sind einerseits das Modell von Zwicker und Fastl [Zwicker und Fastl 1990] anwendbar, welches in der [DIN 45631/A1] festgehalten ist,

sowie das Model von Glasberg und Moore [Moore und Glasberg 2002]. Sie berechnen keinen zusammengefassten Wert für die Lautheit, sondern geben die Lautheitsschwankungen aussagekräftiger als Verlauf oder als Perzentilwerte an.

Schärfe

Die Schärfe ist wie die Lautheit ein wesentliches Merkmal zur Beurteilung von Schallen und lässt sich auch getrennt von anderen Empfindungsgrößen messen. Je größer der hochfrequente Anteil eines Schalles relativ zum Gesamtspektrum ist, umso schärfer wird er empfunden. Da es bei einer Pegelsteigerung von 30 dB lediglich zu einer Verdoppelung der Schärfe kommt, kann die Pegelabhängigkeit für Schalle mit kleinen Pegeldifferenzen vernachlässigt werden. Ist die Bandbreite eines Schalles kleiner als die Frequenzgruppenbreite, so ist die Schärfe nur gering von der Bandbreite abhängig. Die wichtigsten Größen, die die Schärfe beeinflussen, sind das Spektrum und die Mittenfrequenz von schmalbandigen Schallen. Daher muss ein Referenzschall von 1 kHz, 60 dB und einer Bandbreite von $\Delta f \leq f_G = 160$ Hz eingeführt werden. Als Einheit wurde der Ausdruck „acum“ (lat. scharf) gewählt. Für den Referenzschall beträgt die Schärfe 1 acum. Er ist in Abbildung 11 durch ein Kreuz markiert.

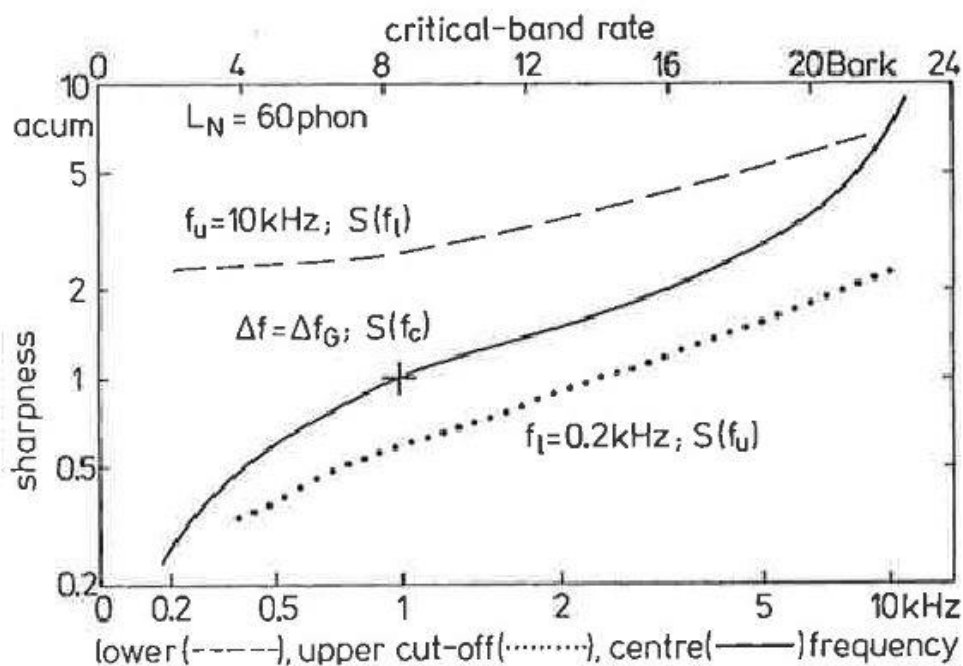


Abbildung 11: Schärfe von frequenzgruppenbreiten Schmalbandrauschen in Abhängigkeit von der Mittenfrequenz (durchgezogene Linie), von Bandpassrauschen mit einer oberen Grenzfrequenz von 10 kHz in Abhängigkeit von der unteren Grenzfrequenz (gestrichelte Linie), und von Bandpassrauschen mit einer unteren Grenzfrequenz von 0,2 kHz in Abhängigkeit von der oberen Grenzfrequenz (punktierte Linie). Das Kreuz markiert den Standardton mit einer Schärfe von 1 acum [Fastl et al. 2007].

Die durchgezogene Linie entspricht der Schärfe eines frequenzgruppenbreiten Rauschens in Abhängigkeit von der Rauschmittenfrequenz. Für schmalbandiges Rauschen nimmt die Schärfe mit zunehmender Mittenfrequenz zu. Hohe Spektralanteile sind für eine sehr ausgeprägte Schärfe verantwortlich. Die Bandbreite eines Schalles ist eine weitere Größe, die die Schärfe beeinflusst. Um diesen Effekt zu messen, werden zwei feste und zwei variable Größen benutzt. Eine feste Größe ist die untere Grenzfrequenz des Rauschens bei 200 Hz. Die veränderbare Größe ist hier die obere Grenzfrequenz. Erhöht man die obere Grenzfrequenz ab 300 Hz, so erhöht sich auch die Schärfe. Die gepunktete Linie in Abbildung 11 zeigt dieses Verhalten. Eine weitere Möglichkeit ist, die obere Grenzfrequenz von 10 kHz als Konstante, und die untere Grenzfrequenz als Variable zu nutzen. Die untere Grenzfrequenz wird soweit gesenkt bis ein Breitbandrauschen mit einer Bandbreite von 200 Hz bis 10 kHz entsteht. Diese Verschiebung der Frequenz führt zu einer Senkung der Schärfe. Die gestrichelte Linie zeigt den Verlauf. Die Schärfe eines Schmalbandrauschens bei 1 kHz, zu dem ein höherfrequentes Rauschen addiert wird, um ein Breitbandrauschen von 1 kHz bis 10 kHz zu erzeugen, nimmt von 1 acum zu 2,5 acum zu. Dieser Effekt ist zu erwarten, denn das Hinzufügen von hochfrequenten Anteilen bedeutet auch eine Zunahme der Schärfe. Die Schärfe nimmt ab, wenn tieffrequente Anteile hinzugefügt werden [Fastl et al. 2007].

Auch für die Berechnung der Schärfe gibt es unterschiedliche Modelle. Die meisten bauen auf dem Modell von [Von Bismarck 1972] auf, welches die spektrale Verteilung und somit den Parameter Schärfe über die spezifischen Lautheiten berechnet. Es berücksichtigt jedoch die absolute Lautheit nicht und ist somit nur für gleichlaute Signale vergleichbar. Das Verfahren ist in der Norm [DIN 45692] festgehalten und wird zusätzlich durch die Lautheitsberechnung nach [DIN 45631/A1] verbessert.

[Aures 1984] entwickelte eine erweiterte Form dieses Modells, bei der die absolute Lautheit miteinbezogen wird. Dieses Modell weist zudem eine größere Skala auf, d.h. Unterschiede in der Schärfe werden deutlicher gezeigt. Es eignet sich daher vorwiegend zum Vergleichen ähnlicher Signale. Allerdings stimmt die relative Lautheitswahrnehmung durch die zusätzlichen Berechnungen nicht so genau mit der menschlichen Wahrnehmung überein, wie im ursprünglichen Modell von v. Bismarck. In dieser Arbeit wurde in weiterer Folge die aktuelle Norm [DIN 45692] angewendet.

Rauhigkeit

Rauhigkeit ist eine Empfindungsgröße die als eine Art Brummen oder Verzerrung vom Menschen wahrgenommen wird. Sie tritt durch periodische Hüllschwankungen bei frequenzmodulierten und amplitudenmodulierten Schallen auf. Generell ergeben sich bei der Modulation drei unterschiedliche Schwankungsarten. Ist die Modulationsfrequenz sehr tief, d.h. die Töne liegen sehr nahe beieinander (bis maximal 4Hz Unterschied zwischen den Schwingungen), so äußert sich dies in Lautheitsschwankungen, welche durch die Größe Schwankungsstärke beurteilt werden. Erreicht die Modulationsfrequenz 15Hz werden die Fluktuationen nicht mehr einzeln gehört und es kommt zur Wahrnehmung einer Rauhigkeit, welche meist als unangenehm empfunden wird. Diese Rauhigkeit erreicht bei einem 100% modulierten Signal ihren Höhepunkt bei 70Hz und nimmt dann bis ca. 300Hz wieder ab. Über 150Hz werden die Signale vermehrt als zwei separate Töne wahrgenommen, da das Gehör nicht mehr in der Lage ist, die zeitlichen Veränderungen des Signals aufzulösen. Die Töne beeinflussen einander nicht mehr (meist liegen sie bereits in unterschiedlichen Frequenzgruppen) und klingen dadurch angenehmer.

Diese Arbeit verwendet den Algorithmus zur Berechnung der Rauigkeit basiert auf dem Gehörmodell nach [Sottek 1993]. Die Analyse Rauigkeit (Gehörmodell) über Zeit bildet die Signalverarbeitung des Hörvorgangs nach und bewertet die Rauigkeit von Signalen in ähnlicher Form wie das menschliche Gehör. Zuerst erfolgt eine Filterung des Zeitsignals, um den Einfluss von Außen- und Mittelohr zu berücksichtigen. Anschließend wird das Signal mit einer Filterbank aus parallel und überlappend angeordneten Bandpässen zerlegt. Der Abstand zwischen den Mittenfrequenzen benachbarter Filter ist auf der Tonheitsskala konstant. Die Anzahl der Bandpässe kann im Eigenschaften-Fenster der Analyse auf 24 bzw. 47 Filter eingestellt werden. Durch die Verwendung von 47 Bandpässen werden die natürlichen Hörvorgänge besser abgebildet. Dies führt aber gleichzeitig zu einer längeren Berechnungszeit. Nach der Filterung werden die Hüllkurven der Teilbandsignale mit Hilfe der Hilberttransformation ermittelt. Zur Berücksichtigung der Ruhehörschwelle werden die Erregungspegel reduziert (ca. 20 dB/Dekade für Frequenzen unter 500 Hz). In der nächsten Verarbeitungsstufe folgt eine Filterung mit Tiefpässen 3. Ordnung. Die Grenzfrequenz der Filter ist frequenzabhängig und beträgt bei 1 kHz etwa 120 Hz. Die Tiefpassfilterung trägt der Tatsache Rechnung, dass das Gehör dem Verlauf der Hüllkurvenschwankungen nicht beliebig schnell folgen kann. Danach werden die Hüllkurvenschwankungen nichtlinear verzerrt. Als nichtlineare Kennlinie wird eine Potenzfunktion mit einem Exponenten von 0,125 verwendet. Dann erfolgt die Berechnung der Autokorrelationsfunktion. Anschließend lassen sich die Teilrauigkeiten durch die Filterung mit Hochpässen 3. Ordnung und einer Verstärkung gewinnen. Sowohl die Grenzfrequenz der Hochpässe als auch die Gewichtung sind abhängig von der Frequenzlage des analysierten Teilbandes (bei 1 kHz ist die Grenzfrequenz ca. 120 Hz). Die Hochpassfilterung ist notwendig, um die Abnahme der Rauigkeit für niedrige Modulationsfrequenzen zu berücksichtigen. Die Kombination der eingesetzten Hochpass- und Tiefpassfilter bildet die typische Bandpasscharakteristik bzgl. des Zusammenhangs zwischen Rauigkeit und Modulationsfrequenz ab. Die Gewichtung berücksichtigt den Einfluss der Frequenzlage der Trägerfrequenz für die Rauigkeitsempfindung. Zusätzlich wird noch eine frequenzbänder-übergreifende Gewichtung durchgeführt. Diese gewichtet die Rauigkeit der Frequenzbänder, in denen eine hohe Rauigkeit vorliegt, stärker. Auf diese Weise wird eine Art Maskierungseffekt nachgebildet: Wenn in einem Frequenzband eine besonders hohe Rauigkeit herrscht, wird diese Rauigkeit die Rauigkeiten der benachbarten Frequenzbänder maskieren und muss aus diesem Grund stärker zur Gesamtrauigkeit beitragen als die Rauigkeiten der benachbarten Frequenzbänder. Nach der Gewichtung wird abschließend die Gesamtrauigkeit durch die Integration der Teilrauigkeiten berechnet [Sottek 1993].

Schwankungsstärke

Die Schwankungsstärke entsteht durch eine sehr tieffrequente Modulation im Signal und wird vom Menschen als eine periodische Lautstärkenänderung der Trägerfrequenz wahrgenommen. Dieser Effekt hat, wie auch die Rauigkeit, eine Bandpasscharakteristik und ist eine Funktion der Modulationsfrequenz. Das Maximum erreicht die Schwankungsstärke bei einer Modulationsfrequenz von 4Hz. Diese Eigenschaft ist unabhängig von der Modulationsart und der Bandbreite des Signals. Die Berechnung der Schwankungsstärke erfolgt in dieser Arbeit in ähnlicher Weise wie bei der Analyse Rauigkeit (Gehörmodell von [Sottek 1993]) über Zeit. Der Algorithmus zur Berechnung der Rauigkeit wurde

entsprechend angepasst, sodass das Maximum der Schwankungsstärke bei einer Modulationsfrequenz von 4 Hz erreicht wird, und nicht wie bei der Rauigkeit bei 70 Hz.

Tonhaltigkeit

Die Tonhaltigkeit ist ein Maß für den Anteil von tonalen Komponenten im Spektrum des Schalls. Sie drückt aus, ob es sich bei einem Schall um einen Klang, bestehend aus tonalen Anteilen, oder um ein Geräusch handelt. Bei breitbandigen Geräuschen gilt, je mehr tonale Komponenten enthalten sind, umso lästiger wird dieses Geräusch empfunden. Es gibt zwei unterschiedliche tonale Komponenten: zum einen einzelne Töne und andererseits ausgeprägte, schmalbandige Rauschanteile. Hörbare reine Töne können, obwohl ihr Beitrag zur Lautheit sehr gering sein kann, als lästig empfunden werden, wenn sie in breitbandigen Geräuschen auftreten. Schmalbandige Geräuschanteile haben nur dann einen Einfluss auf die Tonhaltigkeit, wenn deren Bandbreite kleiner als die kritische Bandbreite ist, dann werden sie vom Ohr als tonale Komponente wahrgenommen [Fastl et al. 2007].

In dieser Arbeit wurde die Tonhaltigkeit der Signale nach [DIN 45681] (Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen) berechnet.

Problematik in der Psychoakustik

Grundsätzlich ist die Überlagerung von mehreren Schallquellen ein nichtlineares Phänomen und daraus folgend ist die Vorhersage von psychoakustischen Größen nicht durch einfache Operationen möglich, sondern ein komplexer Zusammenhang muss beschrieben werden. Ebenso ist die Entfernungsabhängigkeit und räumliche Verteilung in der Psychoakustik ein sehr komplex zu bestimmender Zusammenhang und kann nicht durch einfache Berechnungsregeln erfolgen. Weiters sind psychologische und kognitive Aspekte messtechnisch schwer oder nicht zu beschreiben, insbesondere sind sie kaum berechenbar [Genuit et al. 2007].

Lästigkeit oder Wohlklang

Die Hörempfindung Wohlklang kann als Gegenstück zur Lästigkeit von Schallen aufgefasst werden. Sowohl der Wohlklang als auch die Lästigkeit repräsentieren Hörwahrnehmungen, die von den bereits beschriebenen Hörempfindungen wesentlich beeinflusst werden. Mit zunehmender Rauigkeit, Schärfe und Lautheit nimmt der Wohlklang ab und umgekehrt führt bei zunehmender Klanghaftigkeit zu einem hohen Wert des Wohlklanges zu.

Als besonders lästig werden Geräusche beschrieben, welche durch hohe Lautheit, große Schärfe, deutliche Rauigkeit und Ausgeprägtheit der Tonhöhe charakterisiert werden. Während für die Hörempfindungen Lautheit, Schärfe und Rauigkeit bezüglich Wohlklang und Lästigkeit gegenläufige Anforderungen bestehen, nimmt sowohl der Wohlklang als auch die Lästigkeit mit zunehmender Ausgeprägtheit der Tonhöhe zu [Cik 2012].

Berechnung der Lästigkeit von Geräuschen

In der Literatur sind in den letzten Jahren verschiedene Metriken publiziert worden, die mit Hilfe von Hörversuchen ermittelt worden sind, und die es erlauben sollten, ohne die Erhebung weiterer Subjektivdaten, zuverlässige Voraussagen hinsichtlich der Beurteilung von weiteren Geräuschen abzugeben. Nachfolgende zwei Formeln stellen exemplarisch dar, in welchen mathematischen Zusammenhängen verschiedenen akustische Parameter stehen können [Genuit et al. 2010].

Eine bekannte Metrik in diesem Bereich ist Zwickers 1991 entwickelter Entwurf zur Bestimmung der unbeeinflussten vorurteilslosen Lästigkeit (Unbiased Annoyance (UBA)), worunter die subjektive Reaktion auf ein rein akustisches Ereignis im Labor hinsichtlich Lästigkeit verstanden wird, für den Fall, dass keine Beziehung zur Geräuschquelle besteht [Zwicker 1991]. Es standen also nur die psychoakustischen Eigenschaften und nicht aber die Bedeutungszuschreibung, kognitive und kontextuelle Aspekte im Untersuchungsfokus. Die Aussagekraft der abgeleiteten Formel ist daher begrenzt und kann nicht auf die Beurteilung von Alltagsgeräuschen übertragen werden.

$$UBA = d \cdot \left(\frac{N_{10}}{sone} \right)^{1,3} \cdot (1 + S + F) \text{ in [au]} \quad (2)$$

UBA ... Unbiased Annoyance

d ... Tageszeit (Tag oder Nacht)

N₁₀ ... Perzentil Lautheit in sone

S ... Schärfe in acum

F ... Schwankungsstärke in vacil

$$d_{day} = 1 \text{ und } d_{night} = 1 + \left(\frac{N_{10}}{5 \cdot sone} \right)^{0,5} \quad (3)$$

$$S = 1 + 0,25 \cdot \left(\frac{S}{acum} - 1 \right) \cdot \lg \left(\frac{N_{10}}{sone} + 10 \right) \quad (4)$$

$$F = 0,3 \cdot \frac{F}{vacil} \cdot l \frac{1 + N_{10}/sone}{0,3 + N_{10}/sone} \quad (5)$$

Fastl und Zwicker entwickelten 2007 die Prädiktion der Lästigkeit von synthetischen und realen Geräuschen (psychoacoustic annoyance). Diese Metrik gelte für synthetische und reale Geräusche, können aber nicht ästhetische und kognitive Aspekte berücksichtigen [Fastl et al. 2007].

$$PA = N_5 \cdot \left(\sqrt{w_s^2 + w_{FR}^2} \right) \quad (6)$$

PA ... psychoacoustic annoyance

N_5 ... Perzentil Lautheit in sone

$$w_s = \left(\frac{S}{acum} - 1,75 \right) \cdot 0,25 \log \left(\frac{N_5}{sone} + 10 \right) \quad \text{für } S > 1,75 \text{ acum} \quad (7)$$

S ... Schärfe in acum

$$w_{FR} = \frac{2,18}{(N_5/sone)^{0,4}} \cdot \left(0,4 \frac{F}{vacil} + 0,6 \frac{R}{asper} \right) \quad (8)$$

F ... Schwankungsstärke in vacil

R ... Rauigkeit in asper

Diese exemplarisch angeführten Metriken für die Lästigkeit sind jedoch nicht für den Verkehrsbereich entwickelt worden und auch nicht für den Feldbereich anwendbar, da aus reinen Laborstudien hervorgegangen. Darum wurde auch mit dieser Arbeit ein neuer Weg gegangen, der sich speziell auf die Problematik im Straßen- und Schienenverkehrslärm konzentriert.

3 Datengrundlagen und Studienphasen

In diesem Kapitel geht es um zwei wesentliche Aspekte dieser Arbeit. Auf der einen Seite um die Erhebung der Datengrundlagen und anderen Seite um die strukturelle Darstellung und Beschreibung des Gesamtkonzeptes dieser Dissertation. Grundlegend gliedert sich das Konzept in einen Labor- und Feldstudienbereich. Basierend auf dieser Unterteilung wurden vier aufeinander aufbauende Studienphasen durchgeführt. Die Ergebnisse der Studienphasen werden zu einer gemeinsamen Zielgröße mathematisch zusammengefasst.

3.1 Methodisches Grundkonzept

In Abbildung 12 ist das methodische Konzept der Laborstudienphasen grafisch und in systematischer Form dargestellt und nachfolgend beschrieben.

Basis für diese Arbeit ist die empirische Datenerhebung aus den verschiedensten Bereichen, um am Ende des Prozesses eine Zielgröße zur Berechnung von Straßen- und Schienenverkehrslärm zu modellieren. Dafür wurden in einem ersten Schritt verschiedene binaurale Audioaufnahmen von Einzelvorbeifahren von Kraftfahrzeugen und Zügen auf homogenen Straßen- und Schienenabschnitten bei freier Schallausbreitung durchgeführt. Parallel dazu wurden auch verkehrstechnische Kenngrößen mit erhoben und die dabei auftretenden meteorologischen Bedingungen gemessen. Diese Audioaufnahmen wurden in einer Geräuschdatenbank mit unterschiedlicher kategorialer Unterteilung (Lärmtyp, Fahrbahnbelag, Geschwindigkeiten der Fahrzeuge, usw.) zusammengefasst. In weiterer Folge wurden aus den Einzelvorbeifahrten mittels Audiosignalverarbeitung definierte, synthetisch erzeugte Straßen- bzw. Schienenverkehrslärmsamples erzeugt, welche mittels orthogonaler Versuchsplanung für die verschiedenen Studienphasen in einem experimentellen Versuchsplan zusammengefasst wurden. Dieser Versuchsplan ist die Grundlage für den psychoakustischen Hörversuch, bei welchem drei verschiedene Methoden Anwendung finden. Als erste Methode wurde die sogenannte Personal Noise Ranking Scale (PNRS), eine Intervallskala für die Bewertung der Lästigkeit, angewendet. Weiters wurde mittels Multidimensional Scaling (MDS) die Ähnlichkeit von Lärmsamples bewertet und die Probanden mussten die Lästigkeit auch mittels der Handkraftmethode ermitteln. Nebenbei wurde in dem psychoakustischen Hörversuch auch die Erhebung von Persönlichkeitsdaten (Sozio-Demographie, Audiometrie, Mehrdimensionale Befindlichkeit (MDBF) der Probanden beim Hörversuch und grundlegende Lärmempfindlichkeit der Probanden) für die Analyse von Nebeneinflüssen und Abhängigkeiten durchgeführt. Neben den subjektiven Bewertungen aus den Hörversuchen wurden die objektiven, akustischen Parameter der Straßen- bzw. Schienenverkehrslärmsamples berechnet. Dazu gehören der A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel als Normparameter und die psychoakustischen Parameter. Im nächsten Schritt wurden mit den subjektiven Ergebnissen der Hörversuche und den objektiven, akustischen Parameter verschiedene statistische Modellbildungen untersucht und analysiert. Dazu gehören die einfache lineare und nichtlineare Regressionsanalyse, die multiple lineare und nichtlineare Regressionsanalyse, die Ähnlichkeitsstrukturanalyse auf Basis von Multidimensional Scaling und die Principal Component Analysis (PCA). Abschließend wurde eine Bewertungs- und Berechnungsgröße

mit der Bezeichnung „Traffic Noise Annoyance on Roads and Rail“ für den Straßen- und Schienenverkehrslärm im Laborbereich modelliert. Die nachfolgende Systemskizze stellt den methodischen Ablauf der Studienphasen 1 bis 3 im Detail dar.

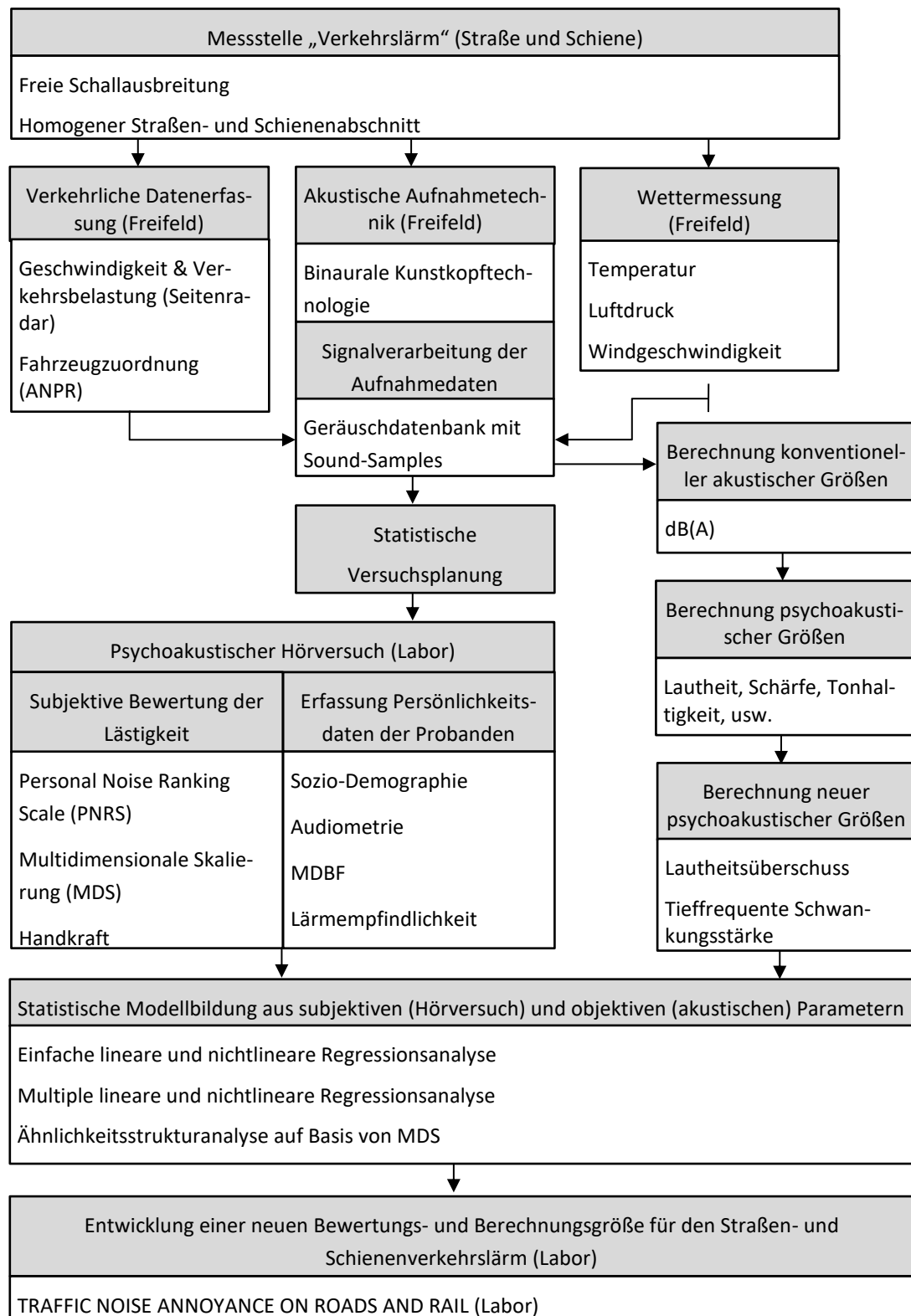


Abbildung 12: Methodisches Grundkonzept der Studienphasen 1 bis 3 (Labor)

Wie schon in Abbildung 12 grafisch dargestellt, gibt es eine Vielzahl von Eingangs- und Systemparametern die abschließend zu einer Zielgröße dem „Traffic Noise Annoyance on Roads and Rail“ führen. Um diesen Zusammenhang systematisch und auch mathematisch erfassen zu können, werden nachfolgend für den Hörversuch mit der Personal Noise Ranking Scale (PNRS) der Studienphase 3 mit der Modellbildung auf Basis der multiplen linearen Regressionsanalyse die Systemgleichungen (9-15) abgebildet.

Verkehrsparameter für Straßen- und Schienenverkehrsensembles (2):

$$\text{Verkehrsparameter Straße}_j = \begin{bmatrix} \text{Verkehrstärke } q_i \\ \text{Geschwindigkeit } v_{KFZ(i)} \end{bmatrix}$$

i...Anzahl

j...Fahrzeugensemble

(9)

$$\text{Verkehrsparameter Schiene}_k = \begin{bmatrix} \text{Zugtyp } z_i \\ \text{Geschwindigkeit } v_{Schiene(i)} \end{bmatrix}$$

j...Schienenensemble

Wetterparameter für Straßen- und Schienenverkehrsensembles (3):

$$\text{Wetterparameter}_{j,k} = \begin{bmatrix} \text{Temperatur } T_i \\ \text{Luftdruck } p_i \\ \text{Windgeschwindigkeit } v_{Wind(i)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Akustikparameter für die Straßen- und Schienenverkehrsensembles (4):

$$Akustikparameter_{j,k} = \begin{bmatrix} Lautheit N_i \\ Schärfe S_i \\ Rauigkeit R_i \\ Tonhaltigkeit K_i \\ Schwankungsstärke F_i \\ Lautheitsüberschuss LUS_i \\ Tieffrequente Schwankungsstärke LFFS_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

Objektive Parameter für die Straßen- und Schienenverkehrsensembles bestehend aus Verkehr, Wetter und Akustik (5):

$$Objektive Parameter_i = \sum_{i=1}^n \langle Straße_j \vee Schiene_k \rangle * \langle Wetter_{j,k} \rangle * \langle Akustik_{j,k} \rangle \quad (12)$$

Subjektive Parameter für die Straßen- und Schienenverkehrsensembles auf Basis der 11-teiligen Personal Noise Ranking Scale (PNRS) (6):

$$Subjektive Parameter_i = \sum_{i=1}^n \langle PNRS_i \rangle \quad (13)$$

PNRS ... Personal Noise Ranking Scale

Index „Traffic Noise Annoyance on Roads and Rail“ für Straßen- und Schienenverkehrslärm basierend auf den Ergebnissen der multiplen linearen Regressionsanalyse der Studienphase 3 (7-8):

$$TNA_R = \sum_{i=1}^n \langle Objektive Parameter_i \rangle * \langle Subjektive Parameter_i \rangle \quad (14)$$

TNA_R ... Traffic Noise Annoyance on Roads and Rail

$$TNA_R = \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^n \left\langle \begin{bmatrix} q_i \vee z_i \\ v_{KFZ(i)} \vee v_{Schiene(i)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_i \\ p_i \\ v_{Wind(i)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} N_i \\ S_i \\ R_i \\ TK_i \\ F_i \\ LUS_i \\ LFFS_i \end{bmatrix} \right\rangle * \sum_{i=1}^n \langle PNR S_i \rangle \quad (15)$$

In Abbildung 13 ist das methodische Konzept der Feldstudienphase (Studienphase 4) grafisch und in systematischer Form dargestellt. Der wesentliche Unterschied zwischen den Laborstudien und der Feldstudie liegt darin, dass die Feldstudie bei den Probanden in ihrer persönlichen Wohnumgebung stattgefunden hat. Es war das Ziel, die Ergebnisse der Laborstudienphasen mit empirischen Erhebungen im Feld statistisch zu evaluieren und auch in einen korrelativen Zusammenhang zu bringen. Des Weiteren wurde auch die Wechselwirkung zwischen den beiden unterschiedlichen Systemmethoden, was die Örtlichkeit der Erhebung betrifft, analysiert.

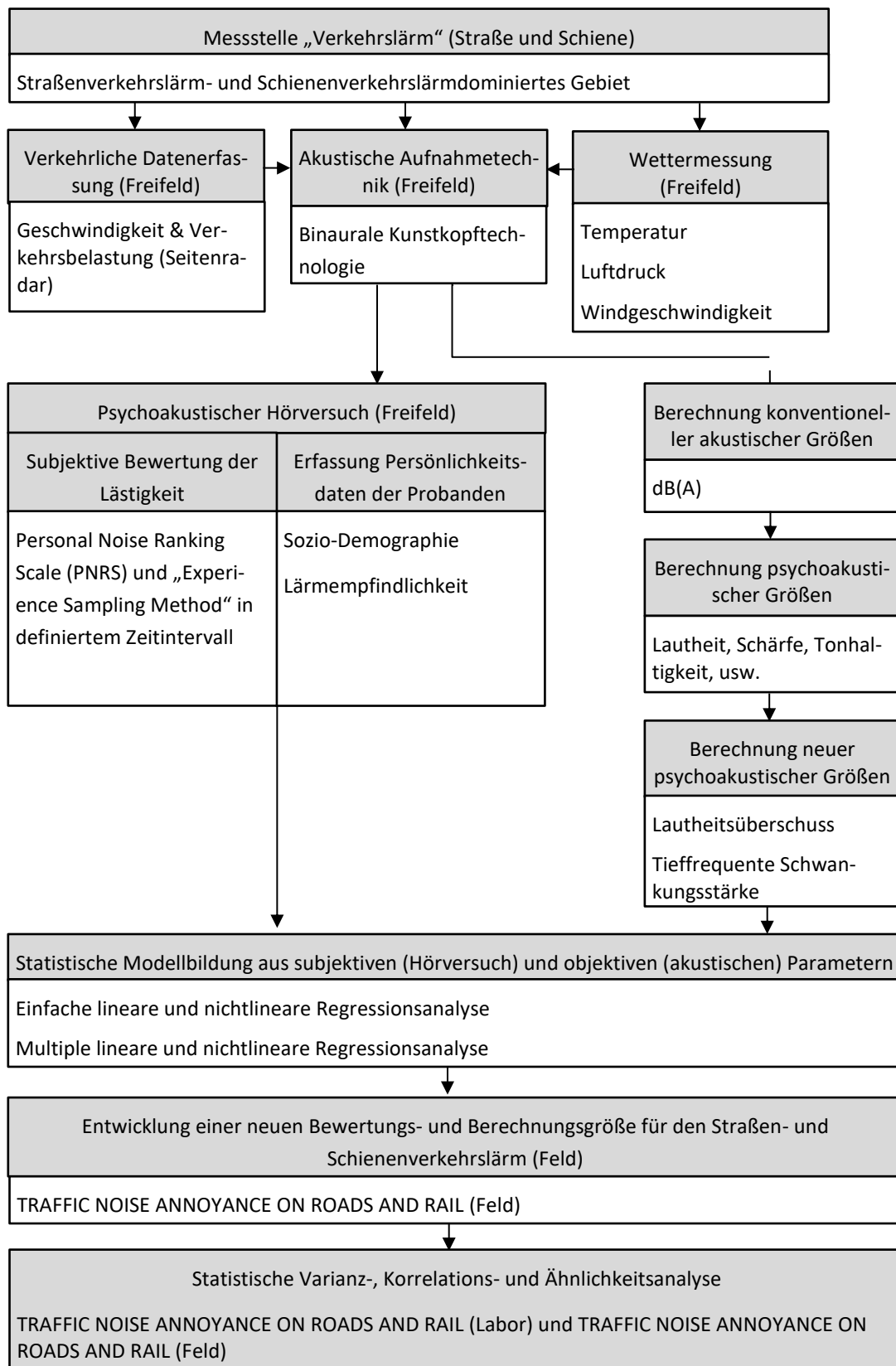


Abbildung 13: Methodisches Grundkonzept der Studienphase 4 (Feld)

3.2 Akustische Aufnahmen und Signalverarbeitung

Als Datengrundlage für die Hörversuche und die weiterführende statistische Modellbildung wurde mittels stereofoner Aufnahmetechnik (binaurale Kunstkopftechnologie) eine Geräuschdatenbank für Fahrzeugvorbeifahrten an Autobahnen, Schnellstraßen und Zugvorbeifahrten an Schienenstrecken erstellt. Diese Geräuschdatenbank diente als Grundlage für die weitere Signalverarbeitung der Audiodaten (Fahrzeug- oder Zugvorbeifahrten) um repräsentative Hörbeispiele für die Probanden zu generieren. Nach einem detaillierten Auswahlverfahren unterschiedlicher Aufnahme-Mikrofonierungstechniken wurde die Kunstkopftechnik, als die am besten geeignete Technologie, angewendet. Die binauralen Aufnahmen der Fahrzeuge und Züge wurden mit Kunstköpfen (HMS II und III von HEAD acoustics) und dem integrierten HEAD-DATA-Recorder (HDR VI) und dem externen Recorder SQuadriga aufgezeichnet.

Binauraltechnik

Von den heute bekannten und realisierten Verfahren zur Reproduktion realer Schallfelder ist die Binauraltechnik derzeit die einzige, die eine perzeptive plausible, im Idealfall authentische akustische Simulation ermöglicht [Weinzierl 2006]. Die zentrale Idee besteht darin, dass, wenn man das von einer beliebigen akustischen Szene an den Trommelfellen erzeugte Schallfeld dort identisch reproduzieren kann, auch das identische Hörereignis wieder eintritt. Man muss jedoch beachten, dass man mit dieser Annahme die heterosensorischen Theorien des räumlichen Hörens vernachlässigt [Blauert 1974]. Das binaurale Denkmodell, bei dem man sich bisher noch einen statischen Hörer, also einen mit fixiertem Kopf, vorstellen muss, führte schon sehr früh zu Konstruktionen, bei denen Nachbildungen menschlicher Köpfe benutzt wurden [de Boer et al. 1939]. Anhand von Mikrofonsignalen, die am Ort der Ohren aufgenommen wurden, gelang es so, binaurale Signalverläufe zu erhalten, die immerhin schon die für das Richtungshören wichtigsten Eigenschaften des Schallsignals (Laufzeit- und Pegeldifferenz) transportieren konnten. Auch die heutige Kunstkopfmikrofonie basiert auf dieser Grundannahme. Von der statischen binauralen Kunstkopfaufnahme gelangt man zur akustischen Simulation (Auralisation), indem man einige systemtheoretische Betrachtungen anstellt [Sturmann 1991]. Dazu geht man von der Annahme aus, dass sich die zu simulierende akustischen Systeme als linear und zeitinvariant darstellen lassen [Ahnert et al. 1991]. Zeitvarianzen wie atmosphärische Bewegungen, Temperaturveränderungen und Luftfeuchte werden vernachlässigt.

Das zeitinvariante System ist durch die binaurale Raum-Impulsantwort (BRIR) vollständig beschreibbar. Sendet man im idealen Freifeld einen einzigen Impuls aus, treffen außer dem Direktschall keine weiteren Wellenfronten auf den Kopf des Hörers. Durch richtungsabhängige Welleneffekte wie Beugung und Reflektionen an Torso, Kopf und der komplizierten geometrischen Feinstruktur des Außenohrs erhält die so beschriebene Übertragungsfunktion für jede Einfallsrichtung eine spezifische, frequenzabhängige Färbung. Da die beiden Ohren räumlich voneinander entfernt und zusätzlich durch das Hindernis Kopf voneinander getrennt sind, ergeben sich außer rein spektralen Eigenschaften auch noch Laufzeit- und Pegelunterschiede zwischen den Schallsignalen an beiden Trommelfellen. Das Gehirn kann diese mehrdimensionalen Unterschiede zur Dekodierung von Entfernung und Ort einer akusti-

schen Quelle auswerten. Das spektrale Pendant der Außenohrstoßantwort nennt man Außenohrübertragungsfunktion, in der Literatur hat sich der Begriff HRTF (head related transfer function) eingebürgert. In der Freifeldsituation besteht diese Impulsantwort dann nur durch den entfernungsgedämpften, mit Dissipationsverlusten frequenzabhängig gedämpften und mit der spezifischen richtungsabhängigen HRTF gefalteten Direktschallimpuls [Lindau 2006].

Akustische Aufnahmen für die weitere Verwendung im Labor

Um die akustischen Aufnahmen in 100 m Entfernung durchführen zu können, waren homogene Straßenstücke laut RVS 04.02.11 Lärmschutz (Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau) auf einer Länge von 600 m mit freier Ausbreitung (Freifeld) und ohne Störeinflüsse (Umgebungsärm usw.) erforderlich (Abbildung 14). Diese Annahme basiert auf Vorkenntnissen auf dem Gebiet der Verkehrslärmmessung und der einzuhaltenden Grenzwerte in Österreich und stellt auch den Bereich der Lärmbelastungszone dar. Der 100 m Abstand und der freie Ausbreitungsbereich wurden auch für die Aufnahmen der Schienenverkehrslärmsamples gewählt.

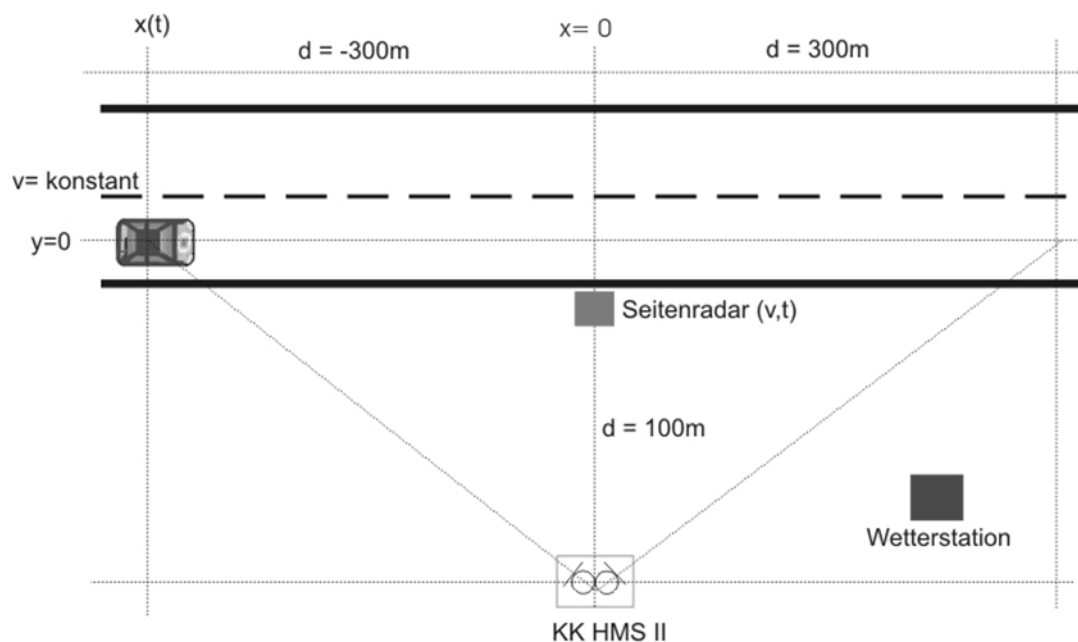


Abbildung 14: Skizzenhafte Darstellung einer akustischen Aufnahme laut RVS 04.02.11 Lärmschutz

Auswahlkriterien für die Audioaufnahmen im Straßen- und Schienenbereich

In einer Erstanalyse im Straßenbereich wurde das Streckennetz des österreichischen Autobahnbetreibers ASFINAG in Abhängigkeit von Fahrbahndecke und Streckenlänge analysiert. Daraus ergab sich eine Reihung der relevanten verbauten bzw. genutzten Fahrbahndecken in Österreich. Folgende drei Typen wurden ausgewählt - Asphaltbeton (AB), Beton, Splittmastixasphalt (SMA) - und für die weiteren Aufnahmen verwendet. Ein weiteres Kriterium war die Liegedauer in Abhängigkeit der Fahrleistung,

um einen sogenannten Abnutzungsgrad zu berechnen, der eine Vergleichbarkeit der Messorte gewährleisten soll. Zusätzlich war es relevant, dass nach bzw. vor dem Messort eine Ausleitmöglichkeit gegeben war, da vor Ort vom Messpersonal die Fahrzeugdaten (z.B. Profiltiefe der KW) zusätzlich erhoben wurden, um das Merkmalspektrum der Einflussgrößen in der nachfolgenden statistischen Analyse gesamtheitlich zu betrachten. In Summe wurden in allen Studienphasen an 76 Tagen Messungen durchgeführt, um so einen umfangreichen Datensatz zu generieren, welcher die Grundlage für die Erstellung von repräsentativen Geräuschsamples. Das Erhebungsprotokoll der Studienphase 3 ist exemplarisch im Anhang beigefügt.

Nachfolgend finden Sie eine exemplarische Abbildung der Fahrbahndecke in Abhängigkeit der Messlokation, der Fahrbahndecke und der Ausleitstelle, wo die zusätzliche Erhebung der Fahrzeugdaten durchgeführt wurde.



Abbildung 15: Beispiel eines Aufnahmeortes und der Fahrbahnoberfläche SMA (Splitt-Mastix-Asphalt) auf der A2 bei Ilz – Kilometerbereich 141



Abbildung 16: Fahrbahnoberfläche SMA (Splitt-Mastix-Asphalt) des Aufnahmeortes auf der A2 bei Ilz

Die Messungen entlang der Schienenstrecken wurden ebenso an repräsentativen Abschnitten mit Personen- und Güterzügen durchgeführt.

Verkehrstechnische Datenerhebung und Wetterdatenmessung

Die Geschwindigkeiten der PKW und LKW wurden mit einem mobilen Seitenradarmessgerät der Marke Sirzega gemessen. Um meteorologischen Einflüssen vorzubeugen, wurden beispielsweise die Aufnahmen auf der Straße jeweils in der Nacht (zwischen 01.00 und 04.00 Uhr) bei relativ gleichen Temperaturen, gleichem Luftdruck und Windstille durchgeführt. Die Daten von Temperatur, Luftdruck und Wind am Aufnahmeort wurden mit dem Wetter-Messgerät Kestrel 4000 vor Ort gemessen.

Signalverarbeitung der Akustikdaten

Die akustischen Aufnahmen (Vorbeifahrten von Straßen- und Schienenfahrzeugen) wurden im Kollektiv über einen bestimmten Zeitraum aufgenommen und mittels Audionachbearbeitung in eine definierte Form von Einzelvorbeifahrten gebracht. Diese Einzelvorbeifahrten wurden auf Basis kategorialer Einteilung (Fahrbahndecke, KFZ-Art, KFZ-Typ, Zug-Typ, Oberbau, Geschwindigkeit, Lärmschutzart, usw.) in einer Geräuschdatenbank zusammengefasst. Aus den Lärmsamples in der Geräuschdatenbank wurden definierte, für den Hörversuch verwendete Geräuschsamples mit einer definierten Dauer von 30 Sekunden (Studienphase 1 und 2) oder 1 Minute (Studienphase 3) erstellt (siehe beispielhafte Darstellung eines Straßenverkehrslärmsamples mit der Dauer von 30 Sekunden in Abbildung 17). Die Anzahl der PKWs und LKWs in einem Fahrzeugensemble wurden aus Verkehrszählungen einer durchschnittlich belasteten, höherrangigen Straße (DTV - durchschnittlicher täglicher Verkehr) erstellt

(Quelle: ASFINAG – Datenbank) und für die 30 Sekunden adaptiert. Um vergleichbare Ensembles in weiterer Folge zu analysieren, wurden die Vorbeifahrtszeitpunkte der Fahrzeuge in allen Ensembles als Trigger Punkte verwendet, sodass bei allen Stimuli in den Hörversuchen zum gleichen Zeitpunkt eine Vorbeifahrt stattfindet. Ebenso wurden die Zeitlücken zwischen den einzelnen Fahrzeugen aufgrund von vorhandenen empirischen Auswertungen (Quelle: ASFINAG – Datenbank: Fahrzeugverteilungen auf Autobahnen) gewählt.

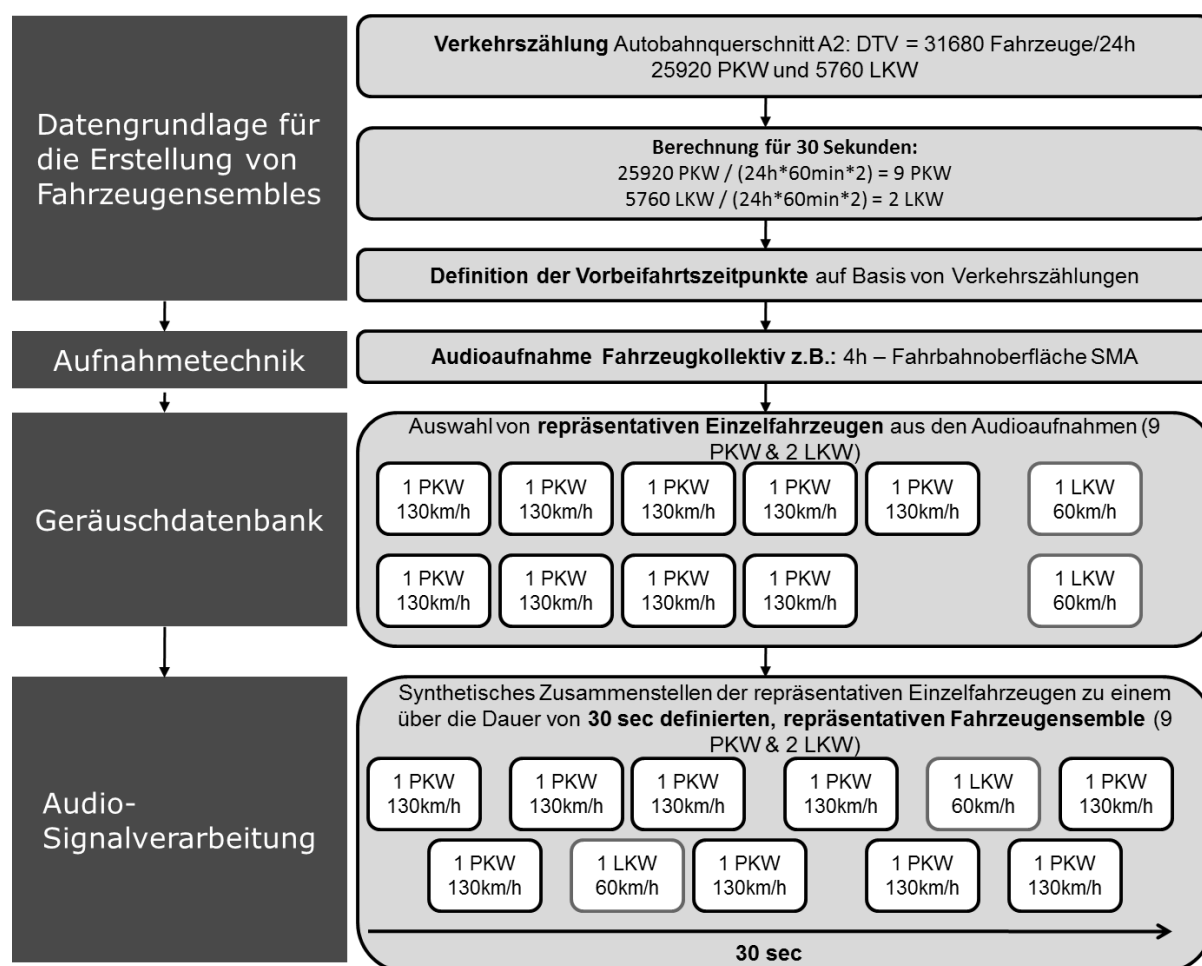


Abbildung 17: Signalverarbeitung der Akustikdaten

Als Ergebnis für das nachfolgend dargestellte Beispiel bekommt man ein synthetisch erzeugtes Lärm-sample für den Bereich Straße mit 9 PKW- und 2 LKW-Vorbeifahrten in 30 Sekunden. Es zeigt jeweils den Schalldruckpegelverlauf der einzelnen Fahrzeuge und als Gesamtergebnis den Schalldruckpegelverlauf des gesamten in weitere Folge verwendeten Lärmsamples.

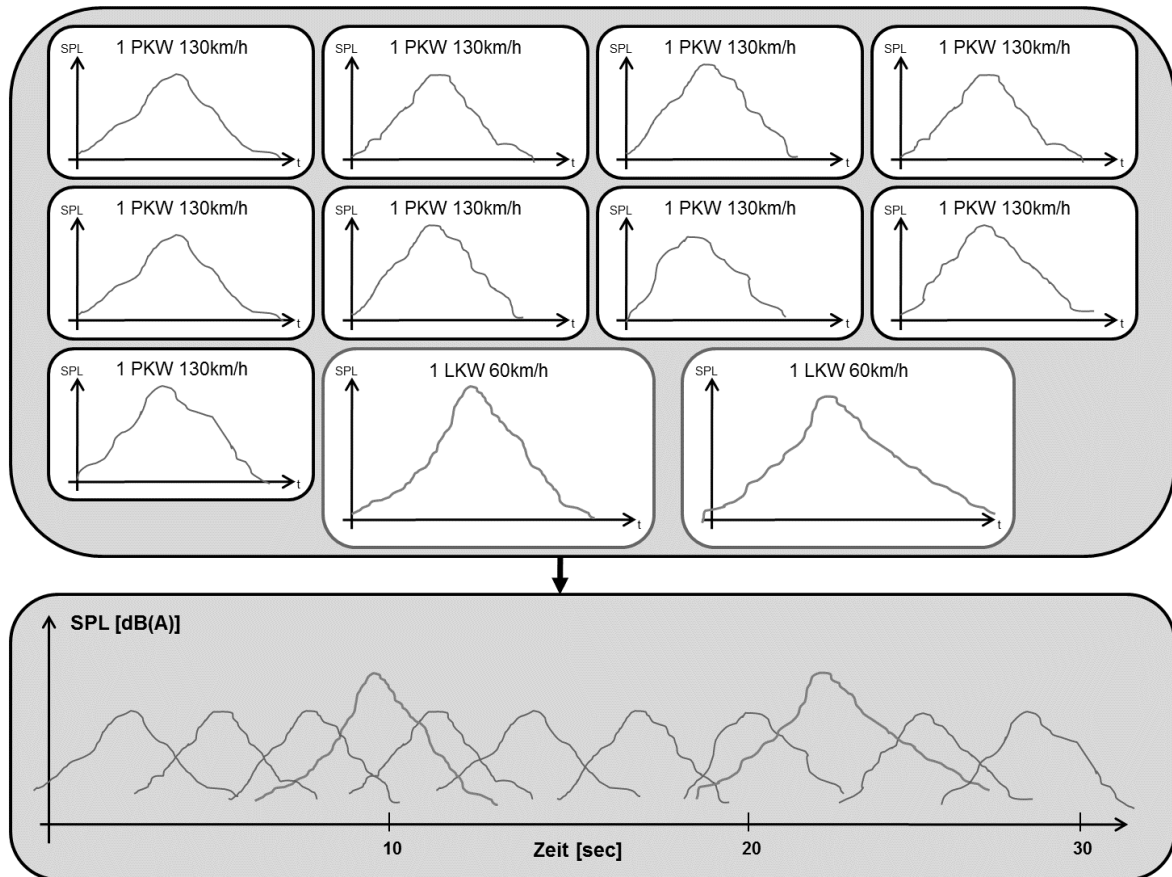


Abbildung 18: Synthetisch erzeugtes Straßenverkehrslärmsample mit einer Dauer von 30 Sekunden

Aus der gesamten Messdatenbank und den daraus generierten synthetisch erzeugten Geräuschsamples wurden im Anschluss für den Straßen- und Schienenverkehr repräsentative Beispiele ausgewählt und in den Hörversuchen weiterverwendet. In der nachfolgenden Tabelle wird exemplarisch die Zusammensetzung der einzelnen Lärmsamples für die Studienphase 3 beschrieben. Zum Beispiel besteht das Lärmsample mit der Bezeichnung „PZ_A“ aus einer Zugvorbeifahrt mit einer Lokomotive plus 4 Wagons und einer Vorbeifahrtsgeschwindigkeit von 75 km/h. Das Straßensample „SMA_C“ besteht aus 10 PKW mit einer Geschwindigkeit von 130 km/h und 2 LKW mit einer Geschwindigkeit von 90 km/h.

Tabelle 1: Beschreibung der verwendeten Straßen- und Schienenlärmverkehrssamples der Studienphase 3

Samplename	Typ	Beschreibung
PZ_A	Personenzug	Lokomotive + 4 Wagons / 75 km/h
PZ_B	Personenzug	Lokomotive + 5 Wagons / 116 km/h
PZ_C	Personenzug	Lokomotive + 4 Wagons / 120 km/h
PZ_D	Personenzug	Lokomotive + 4 Wagons / 80 km/h
GZ_A	Güterzug	2 Lokomotiven + 29 Wagons / 75 km/h
GZ_B	Güterzug	Lokomotive + 12 Wagons / 80 km/h
GZ_C	Güterzug	2 Lokomotiven + 22 Wagons / 75 km/h
GZ_D	Güterzug	Lokomotive + 22 Wagons / 80 km/h
SMA_A	Kfz-Ensemble	10 PKW 80 km/h / 2 LKW 60 km/h
SMA_B	Kfz-Ensemble	10 PKW 100 km/h / 2 LKW 90 km/h
SMA_C	Kfz-Ensemble	10 PKW 130 km/h / 2 LKW 90 km/h
SMA_D	Kfz-Ensemble	10 PKW 130 km/h / 2 LKW 90 km/h
Beton_A	Kfz-Ensemble	10 PKW 130 km/h / 2 LKW 90 km/h
Beton_B	Kfz-Ensemble	10 PKW 100 km/h / 2 LKW 90 km/h
Beton_C	Kfz-Ensemble	18 PKW 100 km/h / 4 LKW 90 km/h
Beton_D	Kfz-Ensemble	10 PKW 80 km/h / 2 LKW 60 km/h
Straße_55dB	Kfz-Ensemble	10 PKW 130 km/h / 2 LKW 90 km/h / SMA
Straße_65dB	Kfz-Ensemble	10 PKW 80 km/h / 2 LKW 60 km/h / Beton
Straße_75dB	Kfz-Ensemble	18 PKW 130 km/h / 4 LKW 90 km/h / Beton
Schiene_55dB	Personenzug	Lokomotive + 5 Wagons / 116 km/h
Schiene_65dB	Güterzug	Lokomotive + 12 Wagons / 80 km/h
Schiene_75dB	Güterzug	2 Lokomotiven + 26 Wagons / 80 km/h

3.3 Experimentelles Versuchsdesign

Um die verschiedenen Lärmarten (Straßen- und Schienenverkehrslärm) bewerten zu können, wurde auf Basis der vorher beschriebenen methodischen Konzepte verschiedene Hörversuche entwickelt und durchgeführt. Nachfolgend werden allgemeine Grundlagen zum Thema Hörversuch, experimentelle Versuchsplanerstellung und in weiterer Folge die Entwicklung der angewendeten Skalenniveaus und Befragungstechniken beschrieben.

Der Hörversuch im Allgemeinen

Mitte des 19. Jahrhunderts stellte sich Gustav Theodor Fechner die Frage, wie innere Empfindungen gemessen werden könnten. Er führte eine wohl erstmals bewusste Operationalisierung in diesem Bereich ein, die besagte, dass Versuchspersonen bei Vorliegen einer inneren Bedingung eine Operation ausführen müssen, wie zum Beispiel "ja" sagen, einen Regler verstellen oder einen Knopf drücken. Auf diese Weise können die physikalischen Maßeinheiten der entsprechenden Reize als Maßeinheiten für Empfindungen verwendet werden. Diesen Ansatz nannte Fechner Psychophysik. Das Teilgebiet der Psychophysik, das elementare akustische und auditive Vorgänge auf diese Weise in Beziehung setzt, wird heute als Psychoakustik bezeichnet [Maempel et al. 2011].

Der Begriff "Hörversuch" bezieht sich auf eine planmäßige, wiederholbare und unter kontrollierten Bedingungen durchgeführte Untersuchung mit Probanden, denen akustische Reize präsentiert werden. Die Probanden beurteilen diese Reize nach entsprechender Instruktion [Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. 2008]. Das Ziel von Hörversuchen ist entweder die Gewinnung wissenschaftlicher Erkenntnisse oder sie dienen im industriellen Bereich der Qualitätsbewertung eines Produkts im Hinblick auf das Verbraucherverhalten.

Hörversuche sind grundsätzlich experimentelle Verfahren. Eine vermutete Einflussgröße (unabhängige Variable) wird gezielt durch Manipulation oder Selektion verändert, und die Ausprägung einer anderen Größe (abhängige Variable) wird gemessen, zum Beispiel der Lautstärkeindruck. Ein zielgerichtetes Vorgehen erfordert eine begründete Vermutung über den Wirkungszusammenhang und den Umgang mit anderen Einflussgrößen (moderierenden Variablen), sei es durch Nichtbeachtung (Störvariablen), Messung (Kontrollvariablen), Ausschaltung oder Konstanz [Maempel et al. 2011].

Die Klassische Testtheorie (KTT) legt drei Testgütekriterien fest [Lord et al. 1968]:

- **Objektivität:** unverzerrte, unbeeinflusste, reale Beschreibung des Untersuchungsgegenstands bei der Messung.
- **Validität:** Erfassung der Merkmale, die beansprucht werden, durch die Messung.
- **Reliabilität:** Wiederherstellbarkeit eines Messergebnisses unter denselben Bedingungen, unter der Annahme hoher Messgenauigkeit [Maempel et al. 2011].

Im Folgenden wird eine detaillierte Beschreibung der drei Testgütekriterien gegeben:

Objektivität

Psychologische Messmethoden weisen im Vergleich zu physikalisch-technischen Methoden eine bemerkenswerte Vielfalt individueller Wahrnehmungen auf. Diese Subjektivität steht zunächst im Widerspruch zum wissenschaftlichen Anspruch der Objektivität. Allerdings wird nach dem Prinzip des kritischen Rationalismus auch in den Natur- und Ingenieurwissenschaften die Objektivität als ein unerreichbares Ideal betrachtet, da selbst dieses Kriterium von subjektiven Einschätzungen abhängt. Daher wird Objektivität in den empirischen Wissenschaften eher als Intersubjektivität verstanden und hergestellt. Im Kontext menschlicher Wahrnehmungen kann diese Intersubjektivität durch die Gruppierung einer Vielzahl von Individuen zu einem einzigen Messinstrument erreicht werden, das bei korrekter Anwendung eine ähnlich hohe Objektivität aufweist wie technische Messinstrumente. Die verblei-

bende Subjektivität des Versuchsleiters spielt bei standardisierten und klar ablesbaren Erhebungsinstrumenten in beiden Bereichen eine vernachlässigbare Rolle. Die im Sprachgebrauch häufig verwendete Bezeichnung "subjektive Messung" ist insofern irreführend, da es sich um eine weitgehend objektive Messung auf Basis mehrerer Subjekte handelt. Zudem suggeriert sie fälschlicherweise eine geringere wissenschaftliche Robustheit, eine Einschätzung, die nichtzutreffend ist [Maempel et al. 2011].

Validität

Die Nutzung einer umfangreicheren Gruppe von Individuen in Verbindung mit einem sorgfältig entwickelten Erhebungsinstrument weist zwangsläufig eine weitaus höhere Validität für die Erfassung auditiver Phänomene auf als technische Messungen. Bei der Messung der einfachen Wahrnehmungseigenschaft, wie beispielsweise Lautheit, kann ein technisches Verfahren selbst unter Berücksichtigung von Maskierungseffekten den Wahrnehmungseindruck nur unzureichend schätzen. Im Gegensatz dazu haben die von Menschen angegebenen Werte maximale Gültigkeit, da sie nicht nur natürliche Maskierungseffekte, sondern auch die Akustik der Abhörsituation und die Bedeutung des Audioinhalts berücksichtigen. Dies gilt erst recht für komplexere Klangmerkmale wie beispielsweise Transparenz, die von Modellen nur noch unzureichend erklärt werden können. In diesem Sinne können physikalisch-technische Messungen immer nur als Indikatoren für Wahrnehmungsinhalte dienen. Die Gründe für ihren Einsatz liegen vielmehr in ihrer Praktikabilität, der Zeit- und Kostenersparnis, der Anwendbarkeit physikalischer Maßeinheiten und der hohen Reliabilität [Maempel et al. 2011].

Reliabilität

Da die perzeptive Messung eines Merkmals stets die Beteiligung des ganzheitlich arbeitenden Wahrnehmungsapparates erfordert, werden die Messwerte nicht nur durch die Messbedingungen, sondern auch durch andere Faktoren beeinflusst. Dies trägt einerseits zur hohen Validität bei, mindert jedoch andererseits die Reliabilität: Die Ergebnisse perzeptiver Messungen lassen sich nicht so präzise reproduzieren wie die von technischen Messungen. Dies verdeutlicht, dass im Bereich der Wahrnehmung, insbesondere in den Lebenswissenschaften, keine quantitativ-deterministischen Zusammenhänge ermittelbar sind (und möglicherweise auch nicht gelten), sondern eher probabilistische. Vorhersagen auf der Grundlage von Hörversuchsdaten werden daher zwangsläufig eine gewisse Ungenauigkeit aufweisen [Maempel et al. 2011].

Als erstes stellt sich die Frage, was ist der Gegenstand des Hörversuchs?

In einem Hörversuch können die Urteile entweder verbal ausgedrückt oder durch motorische Reaktionen, wie beispielsweise Tastendruck, abgegeben werden. Die Urteile beziehen sich in der Regel darauf [Hellbrück et al. 2008]:

- ob ein akustischer Reiz hörbar ist oder nicht,
- ob sich zwei akustische Reize hörbar voneinander unterscheiden oder nicht,

- welchen Ausprägungsgrad ein akustischer Reiz in Bezug auf eine Wahrnehmungsdimension, beispielsweise die wahrgenommene Lautstärke, aufweist,
- welche Position ein akustischer Reiz in einem mehrdimensionalen Wahrnehmungsraum, etwa im Hinblick auf den Wohlklang, einnimmt.

Fragestellung

Ein Hörversuch gründet auf einer Fragestellung, die prinzipiell empirisch beantwortbar sein muss. Spekulative Fragen sind kein Gegenstand von Hörversuchen.

Hypothesen

Hörversuche basieren, wie alle Experimente, auf vorher aufgestellten Hypothesen. Hypothesen sind mögliche Antworten auf die untersuchte Fragestellung. Sie müssen mit dem bestehenden Wissen und den geltenden Theorien in Einklang stehen oder logisch davon abgeleitet werden können. Die Begründung sollte dem aktuellen Stand der Forschung entsprechen und die Erreichbarkeit des Untersuchungsziels klar darlegen. Durch eine methodische Vorgehensweise, die planmäßig erfolgt, wird eine statistisch abgesicherte Entscheidung bezüglich der möglichen Antworten (Hypothesen) angestrebt. Die statistische Beweisführung, die am Ende der Untersuchung steht, geht von der Nullhypothese aus. Diese besagt beispielsweise, dass zwei oder mehr Stichproben von Messwerten derselben Grundgesamtheit entstammen. Der Nullhypothese wird eine Alternativhypothese gegenübergestellt, die sich aus der Untersuchungsfrage ableitet und die Alternative zur Nullhypothese darstellt. Die Alternativhypothese bezieht sich auf die gleichen Parameter wie die Nullhypothese. Bei der Frage, ob zwei oder mehr Stichproben aus derselben oder verschiedenen Grundgesamtheiten stammen, wird in der Regel auf einen bestimmten Verteilungsparameter bezogen, normalerweise den Mittelwert der Verteilung der Messwerte. Es gibt ungerichtete und gerichtete Alternativhypothesen. Eine ungerichtete (oder zweiseitige) Alternativhypothese besagt, dass die Stichproben aus Grundgesamtheiten mit unterschiedlichen Mittelwerten stammen. Wenn die Alternativhypothese jedoch besagt, dass der Mittelwert aus Grundgesamtheit A größer ist als der von Grundgesamtheit B, handelt es sich um eine gerichtete (oder einseitige) Alternativhypothese. Dies bezieht sich auf die Fragestellung, ob die Mittelwerte verschieden oder nur in eine Richtung unterschiedlich sind (siehe oben). Nach der Formulierung von Null- und Alternativhypothesen wird die Untersuchung durchgeführt, und es stellt sich die Frage nach der Versuchsplanung [Hellbrück et al. 2008].

Versuchsplanung

Ein Versuchsplan ist ein Untersuchungsschema, das Hypothesen, Versuchsaufbau und -durchführung sowie die statistische Datenanalyse und statistische Entscheidung logisch miteinander verknüpft. Es existieren zahlreiche standardisierte Versuchspläne, wobei das Zufallsprinzip (Randomisierung) eine bedeutende Rolle spielt.

Die Frage, ob jede Versuchsperson unter jeder experimentellen Bedingung getestet werden soll (verbundene Stichprobe) oder unter verschiedenen Bedingungen unterschiedliche Versuchspersonengruppen, die zufällig aus einer Gesamtstichprobe ausgewählt werden (Zufallsgruppenplan), stellt sich

häufig. Ein Messwiederholungsplan (auch „Within-subject-Design“) bezieht sich auf verbundene Stichproben und berücksichtigt die natürliche Varianz zwischen den Versuchspersonen. Im Gegensatz dazu erfordert ein Zufallsgruppenplan (auch „Between-subject-Design“) wesentlich mehr Versuchspersonen, um den Zufallsfehler aufgrund individueller Unterschiede zu minimieren. Der Vorteil des Zufallsgruppenplans liegt in der höheren Repräsentativität und besseren Generalisierbarkeit der Ergebnisse.

In Hörversuchen beurteilen Versuchspersonen oft mehrere akustische Stimuli einzeln, was auf einen typischen Messwiederholungsplan hinweist. Hierbei ist darauf zu achten, dass Sequenzeffekte keine systematischen Auswirkungen haben.

Ein Hörversuch basiert auf systematischen Beobachtungen und empirischen Tatbeständen. Messungen, die Relationen zwischen empirischen Tatbeständen in numerischen Relationen abbilden, unterliegen prinzipiell Messfehlern. Wiederholte Messungen werden durchgeführt, um eine möglichst genaue Schätzung des wahren Messwerts zu erhalten. Der Mittelwert oder der Median werden als beste Schätzwerte für den wahren Messwert betrachtet.

Fehler können auch durch die Auswahl und Zuordnung der Versuchspersonen entstehen. Die Auswahl sollte repräsentativ für die Population sein, und die Zufallszuordnung zu den experimentellen Bedingungen ist ein wichtiges Kriterium für einen experimentellen Plan. Bei fehlender Zufallszuordnung spricht man von einem quasi-experimentellen Plan.

Im Kontext eines Hörversuchs bezieht sich der Begriff "Variable" auf die Ausprägung eines Merkmals, das mindestens zwei Werte annehmen kann. Die gesetzte Bedingung im Experiment wird als unabhängige Variable bezeichnet, während die gemessenen Reaktionen der Versuchspersonen die abhängige Variable darstellen. Versuchspersonen müssen über ein normales Hörvermögen verfügen, und ihre Auswahl und Zuordnung zu den Bedingungen erfolgt zufällig, um unerwünschte Einflüsse zu minimieren [Hellbrück et al. 2008].

Versuchsplanerstellung auf Basis des orthogonalen Versuchsdesigns in der Psychoakustik

Die Erstellung eines Versuchsplans auf Basis eines orthogonalen Versuchsdesigns im Bereich der Psychoakustik erfordert eine sorgfältige Planung, um die Auswirkungen verschiedener akustischer Parameter systematisch zu untersuchen. In der Psychoakustik werden oft Experimente durchgeführt, um die Wahrnehmung von Klängen und Geräuschen zu erforschen. Nachfolgend ist der schrittweise Ablauf dargestellt, wie bei der Erstellung des Versuchsplans in dieser Arbeit vorgegangen wurde. Die Beschreibung stellt auch eine allgemeine Herangehensweise für ein solches Experiment dar:

Schritt 1: Definition der Untersuchungsziele und -parameter

- Bevor Sie mit der Planung beginnen, müssen Sie die Ziele Ihres Psychoakustik-Experiments klar definieren. Welche akustischen Parameter oder Klangeigenschaften möchten Sie untersuchen? Welche Aspekte der auditiven Wahrnehmung interessieren Sie? Dies könnte Lautstärke, Tonhöhe, Schärfe, Klangqualität usw. umfassen.

Schritt 2: Auswahl der Variablen und ihrer Ebenen

- Wählen Sie die unabhängigen Variablen (Faktoren) aus, die Sie untersuchen möchten. Dies könnten beispielsweise die Tonhöhe, die Lautstärke und die Dauer eines Klangs sein. Bestimmen Sie die verschiedenen Ebenen (Stufen) jeder dieser Variablen. Zum Beispiel könnten Sie für die Tonhöhe die Ebenen "tief", "mittel" und "hoch" wählen.

Schritt 3: Erstellung der Matrix

- Erstellen Sie eine Matrix, um die verschiedenen Kombinationen der Ebenen der Faktoren zu organisieren. Im Bereich der Psychoakustik sollte die Matrix so erstellt werden, dass die Faktoren orthogonal zueinander sind, um sicherzustellen, dass sie unabhängig voneinander untersucht werden können.

Schritt 4: Bestimmen der Versuchswiederholungen

- Entscheiden Sie, wie oft Sie jeden Versuch in der Matrix wiederholen möchten, um statistisch zuverlässige Ergebnisse zu erhalten. Die Anzahl der Wiederholungen beeinflusst die Genauigkeit der Ergebnisse.

Schritt 5: Versuchsdesign optimieren

- Es kann notwendig sein, das Versuchsdesign zu optimieren, indem Sie die Anzahl der Wiederholungen anpassen oder zusätzliche Faktoren hinzufügen, um sicherzustellen, dass Sie alle relevanten Variationen erfassen.

Schritt 6: Versuchsdurchführung und Datenanalyse

- Führen Sie die geplanten Experimente gemäß Ihrem Versuchsplan durch und sammeln Sie die erforderlichen Daten. Verwenden Sie geeignete psychoakustische Tests und Verfahren, um die Daten zu erfassen. Anschließend wenden Sie statistische Methoden an, um die Daten zu analysieren und Schlüsse über die Wahrnehmung der untersuchten akustischen Parameter zu ziehen.

Schritt 7: Interpretation der Ergebnisse

- Interpretieren Sie die Ergebnisse, um Schlussfolgerungen darüber zu ziehen, wie die unabhängigen Variablen die Wahrnehmung von Klängen beeinflussen. Diskutieren Sie die praktischen Implikationen Ihrer Erkenntnisse und mögliche Anwendungen im Bereich der Psychoakustik.

Messverfahren und Skalierung überschwelliger Größen

Die Skalierung von psychoakustischen Größen und Klangeigenschaften ist ein wichtiger Schritt in der Erforschung des menschlichen Gehörs und der Wahrnehmung von Klängen. Es gibt verschiedene Ansätze zur Skalierung, darunter direkte und indirekte Methoden, die im Detail betrachtet wurden [Hellbrück et al. 2008]:

Direkte Skalierungsmethoden:

- **Verhältnisskalen:** Bei Verhältnisskalen bewerten Probanden psychoakustische Größen direkt auf einer Zahlen- oder Punkteskala. Diese Skalen können von linearen, z.B. von 1 bis 10, bis zu logarithmischen, wie die Dezibelskala, reichen. Ein Beispiel für eine Verhältnisskala ist die Bewertung der Lautheit, wobei Probanden auf einer Skala von 1 bis 10 die relative Lautstärke eines Klangs beurteilen.

- **Kategorienskalen:** Hierbei werden Probanden gebeten, Klänge in vordefinierte Kategorien einzustufen. Dies kann beispielsweise bedeuten, dass ein Klang als "leise", "mittel" oder "laut" eingestuft wird. Kategorienskalen sind oft einfacher zu handhaben und ermöglichen eine grobe, qualitative Bewertung.

Indirekte Skalierungsmethoden:

- **Cross-Modality-Matching:** Bei dieser Methode wird die psychoakustische Größe oder Klangeigenschaft indirekt über eine andere Sinnesmodalität gemessen. Zum Beispiel könnten Probanden aufgefordert werden, die Helligkeit einer visuellen Lichtquelle so einzustellen, dass sie der Lautstärke eines Geräusches entspricht. Dies erlaubt indirekte Vergleiche zwischen verschiedenen Sinnesmodalitäten.
- **Paarvergleichsmethoden:** Hierbei werden den Probanden zwei Klänge oder Geräusche gleichzeitig präsentiert, und sie werden gebeten, den lautesten, leisesten, angenehmsten oder unangenehmsten der beiden auszuwählen. Durch wiederholte Paarvergleiche können statistische Analysen durchgeführt werden, um Rangordnungen oder Intensitätsunterschiede zwischen Klängen zu ermitteln.
- **Rangordnungsverfahren:** In Rangordnungsverfahren werden Probanden aufgefordert, eine Liste von Klängen oder Geräuschen nach bestimmten Kriterien zu ordnen. Beispielsweise könnten sie die Klänge nach ihrer Lautheit ordnen, wobei der lauteste an erster Stelle steht und der leiseste an letzter Stelle. Dies ermöglicht eine relative Einschätzung der Klänge.

Diese Skalierungsmethoden dienen dazu, psychoakustische Größen wie Lautheit, Schärfe, Tonhöhe und andere Klangeigenschaften zu bewerten und zu quantifizieren. Die Wahl der Methode hängt von der spezifischen Forschungsfrage, den verfügbaren Ressourcen und den zu untersuchenden Parametern ab. Oftmals werden mehrere Methoden kombiniert, um ein umfassendes Verständnis der menschlichen Wahrnehmung von Klängen zu erlangen.

In den in dieser Arbeit durchgeführten Hörversuchen kamen drei verschiedene Methoden zum Einsatz:

Personal Noise Ranking Scale (PNRS)

Bei der Bewertung mittels PNRS wurde eine Kombination einer direkten Größenschätzung mit einem Paarvergleich für die Bewertung der Straßen- und Schienenverkehrslärmsamples gewählt. Die Methoden zur Messung von Empfindungsgrößen lassen sich, wie vorher allgemein beschrieben, grob in zwei Gruppen einteilen, je nachdem ob die Versuchsperson selbst aktiv in die Messung eingreift, oder ob sie vom Versuchsleiter die Reizgrößen dargeboten bekommt, die sie anschließend beurteilen muss. Beim hier durchgeführten Hörversuch wurde eine softwaremäßige Versuchsanordnung entwickelt und angewendet (Abbildung 19). Die Versuchsperson kann durch Anklicken eines Startsymbols an dem dafür installierten Monitor selbst den Versuchsablauf steuern. So hat die Versuchsperson die Möglichkeit, jede der zu testenden Größen miteinander zu vergleichen, für sich selbst eine Rangordnung festzulegen, gegebenenfalls eine Testgröße mehrmals anzuhören und die dabei wahrgenommene Lästigkeit durch das Anklicken eines Markers in der PNRS zu bewerten. Diese Bewertungen können zu jedem Zeitpunkt innerhalb einer Bewertungsgruppe verändert werden.

Das Skalenniveau der PNRS wurde auf einer Intervallskala von 11 Stufen dargestellt. Es wurden nur die Bereiche „wenig lästig“ bis „sehr lästig“ definiert. Die weitere Einteilung des Lästigkeitsurteils wurde jedem Probanden selbst überlassen, um so wenig wie möglich Einfluss auf die Testperson zu nehmen. Diese 11-teilige PNRS wurde in Anlehnung an die 11-teilige ICBEN (International Commission on the Biological Effects of Noise) -Skala [Fields et al. 2001] für die hier benötigten Bedürfnisse adaptiert und angewendet.

Abbildung 19: Personal Noise Ranking Scale (PNRS)

Handkraftdynamometer

Die Kraftmessung mittels Handdynamometer (siehe Abbildung 20) wurde in dieser Arbeit als Bewertungsinstrument getestet. Dies sollte ermöglichen, die Stärke der durch die Straßen- und Schienenlärmsamples ausgelösten Lästigkeitsempfindung experimentell zu messen. Dabei sollten die Untersuchungsteilnehmer ein eigens angefertigtes Handkraftmessgerät (Dynamometer) umso stärker drücken, je lästiger das Geräusch wahrgenommen wurde. Dieses Verfahren wurde erstmals von Steven [Stevens 1975] eingesetzt, um Zusammenhänge zwischen der Intensität physikalischer Reize und der korrespondierenden Empfindungsstärke zu bestimmen. Es handelt sich dabei um eine aus der wissenschaftlichen Disziplin der Psychophysik stammende Methode des Cross-Modality-Matching bei dem die Intensität einer Sinnesempfindung - in diesem Fall die Stärke des Drucks der auf das Dynamometer

ausgeübt wird - die Intensität einer zweiten Sinnesempfindung (in diesem Fall die subjektiv empfundene Lästigkeit) beschreiben soll.



Abbildung 20: Handkraftdynamometer

Multidimensional Scale (auch Multidimensionale Skalierung)

Die multidimensionale Skalierung (MDS) ist ein multivariates statistisches Verfahren, welches dazu entwickelt wurde, Objekte in einem zu bestimmenden Wahrnehmungsraum miteinander zu vergleichen. Zur Positionierung der Objekte in diesem Wahrnehmungsraum stehen zwei Möglichkeiten der Datengewinnung zur Verfügung:

- Eigenschaftsbeurteilungen der Objekte
- Beurteilung der Ähnlichkeiten bzw. Unähnlichkeiten zwischen den Objekten

Punkt 2 hat das grundsätzliche Ziel, diese Objekte räumlich so anzuordnen, dass die Abstände (Distanzen) zwischen den Objekten im Raum möglichst exakt den erhobenen Un- bzw. Ähnlichkeiten entsprechen. Je weiter die Objekte voneinander entfernt sind, desto unähnlicher sind sie und je näher sie aneinander sind, desto ähnlicher sind sie. Daraus werden Informationen über Paare von Objekten erhoben und in metrischer Form dargestellt. Diese Methoden finden auch im Bereich der Klangforschung Anwendung. Dabei wird untersucht, welche Teilcheneigenschaften (wie Masse und Ladung) sind welchen Klangeigenschaften (etwa Tonhöhe, Lautstärke, Rhythmus) zuzuordnen. Aus den Ergebnissen leitet sich eine Art Klangkarte für Teilchen ab [Vogt 2010].

In dieser Arbeit wird diese Methode verwendet, um die Ähnlichkeit der Geräuschsamples durch die Probanden mittels Ratingverfahren bewerten zu lassen.

Dazu wurde folgende Skalierungsform verwendet, in Anlehnung an die PNRs:

Ratingmethode - Skala:

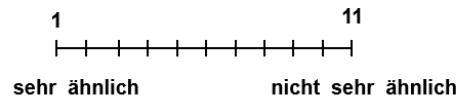


Abbildung 21: Multidimensionale Skalierung (MDS) Ratingmethode Skala

Daraus ergibt sich dann als Ergebnis eine Unähnlichkeitsmatrix, bei welcher das sogenannte „Badness-of-fit“-Kriterium minimal ist. Dieses Kriterium entspricht der sogenannten Anpassungsgüte und gibt an, „wie gut“ ein geschätztes Modell eine Menge von Beobachtungen erklären kann. In diesem finalen Unähnlichkeitsraum, werden dann die einzelnen Psychoakustikparameter integriert und dann unterschiedliche Regressionsanalysen durchgeführt. Das Ziel war es, zu untersuchen, ob die Modellergebnisse durch diesen Vorverarbeitungsschritt der Zuordnung im MDS-Urteilraum zu anderen Ergebnissen bei den statistischen Analysen führen.

3.4 Hörversuch im Labor und Feld

Hörversuch im Labor

Der gesamte Laborhörversuch mit allen relevanten Parametern wurde im Labor für Psychoakustik im Verkehrswesen am Institut für Straßen- und Verkehrswesen durchgeführt.

Insbesondere für Arbeiten im Bereich der experimentellen Audiologie, für die Abhaltung psychoakustischer Experimente, werden „Reflexionsarme Räume“ benötigt. Um den psychoakustischen Hörversuch mit den Freifeldaufnahmen unter Laborbedingungen durchführen zu können, wurde im Rahmen der Studienphase 1 ein reflexionsarmer Abhörraum (Hörversuchslabor) am Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Technischen Universität Graz eingerichtet (siehe Abbildung 22). Um die gering nachteiligen, geometrischen Gegebenheiten zu kompensieren, war es notwendig, einige akustische Anpassungen zur Erfüllung der Richtlinien der European Broadcasting Union [EBU] und der International Telecommunication Union [ITU] bezogen auf die Nachhallzeit und die Hintergrundgeräusche für Abhörräume vorzunehmen. Zur Optimierung der Akustik (Verbesserung der Nachhallzeit und Reduktion des Schalldruckpegels) wurde die Fensterfront (doppelte Ausführung von hoch dämmenden Schallschutzfenstern) des Raumes mit einem Akustik-Vorhang (hoch absorbierender Vorhang) ausgestattet. Die Seitenwände und die Decke wurden mit schallabsorbierenden Akustik-Dekorplatten (Material: absorbierender Melaminharzschäum) eingerichtet. Zur zusätzlichen Dämmung von auftretenden Raummoden wurden Stellwände mit Akustik-Dekorplatten erstellt und in Verwendung gebracht. Weiters wurden im Hörversuchslabor ein Interface (Monitor und Maus) und eine Beschallungsanlage installiert. Über das Interface erfolgt die selbstständige Steuerung des Hörversuches durch den Probanden. Die zusätzlichen technischen Apparaturen wurden neben dem Hörversuchslabor in einem Regieraum (Assistentenraum) untergebracht, so dass nur das notwendige Ausrüstung (Interface und die Lautsprecher) im Labor vorhanden ist, um weiteren Lärm- und Reflexionsquellen vorzubeugen.



Abbildung 22: Labor für Psychoakustik im Verkehrswesen am Institut für Straßen- und Verkehrswesen der TU Graz – Konzept, Bau und operative Umsetzung durch M. Cik

Vor Beginn der Datenerhebung wurde allen Probanden ein ausführliches Informationsblatt über den Zweck und den genauen Ablauf der Untersuchung vorgelegt. Die Kenntnisnahme dieser Information und die Einwilligung zur Teilnahme an der Studie wurden daraufhin von den Untersuchungsteilnehmern schriftlich bestätigt.

Im Anschluss daran wurden von den Probanden, wie in Abbildung 23 mit dem Hörversuchsablauf dargestellt, Persönlichkeitsdaten in Form eines mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragebogens (MDBF) und eines Fragebogens mit dem Synonym „Lästigkeitsindex“ erhoben.

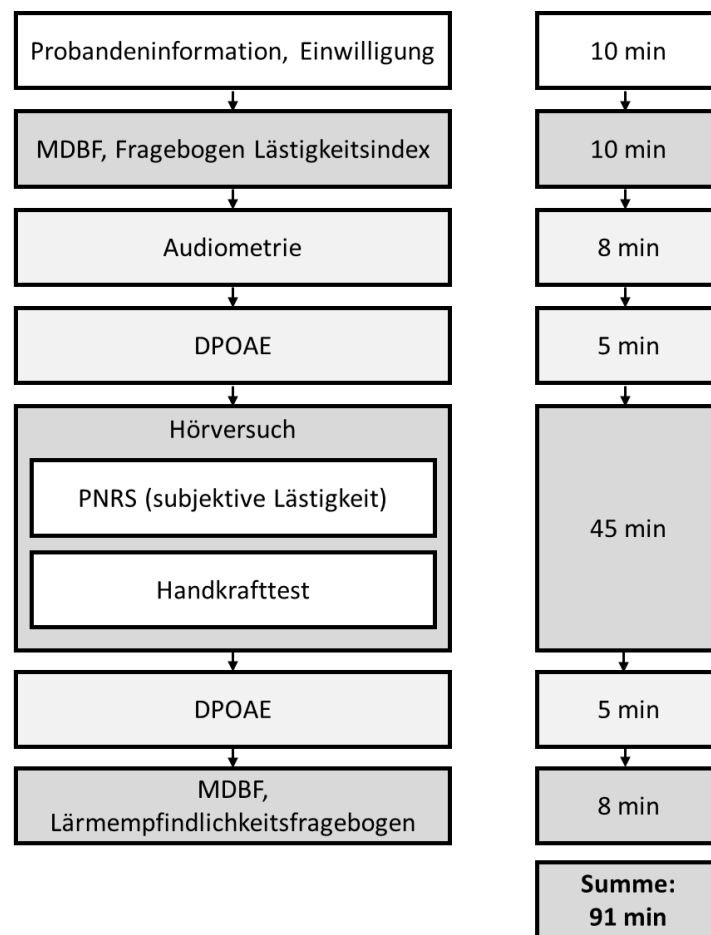


Abbildung 23: Exemplarischer Ablauf des gesamten Hörversuchs in der Studienphase 3 inkl. der geplanten Zeitdauer

Fragebogen „Lästigkeitsindex“

Bei dem Fragebogen „Lästigkeitsindex“ handelt es sich um ein selbst entwickeltes Verfahren, das aus 16 rating-skalierten Fragen besteht. Erhoben werden dabei unter anderem die wahrgenommene Stärke der Lärmbelastung im Wohngebiet, die Belästigung durch Verkehrslärm in unterschiedlichen Lebenssituationen und persönliche Einstellungen gegenüber Lärm (Fragebogen siehe Anhang).

Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen (MDBF)

Der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen (MDBF) [Steyer et al. 1997] ist ein Instrument zur Erfassung dreier bipolar konzipierter Dimensionen der aktuellen psychischen Befindlichkeit: Gute-Schlechte Stimmung (GS), Wachheit-Müdigkeit (WM) und Ruhe-Unruhe (RU). Das Instrument erfasst den momentanen Zustand der Person in der aktuellen Situation hinsichtlich ihrer Befindlichkeit. Der MDBF besteht insgesamt aus 24 einfachen Adjektiven wie z.B. „wohl“ oder „müde“, welche auf einer fünfstufigen Antwortskala mit den Endpunkten „überhaupt nicht“ und „sehr“ bewertet werden (Fragebogen siehe Anhang).

Danach wurden die Teilnehmer zur Audiometrie in das Hörversuchslabor gebeten.

Audiometrie

Als Aufnahmekriterium für alle Probanden galt ein normales Hörvermögen. Mittels Tonaudiometrie wurde das individuelle Hörvermögen jedes Probanden bestimmt. Die Audiometrie wurde mittels Kopfhörer in Pegelschritten von 5 dB durchgeführt. Das Einschlusskriterium waren ein mittlerer Hörverlust an den Frequenzen 0.5, 1, 2, und 4 kHz, ≤ 20 dB, bei gleichzeitig nicht bestehendem Hörverlust ≥ 30 dB an den einzelnen Frequenzen. Zusätzlich wurde eine Messung der otoakustischen Emissionen durchgeführt (DPOAE - Distorsionsprodukte otoakustischer Emissionen), um eine detaillierte Analyse des Hörvermögens der Probanden für weitere physiologische Untersuchungen zu bekommen.

Für die darauffolgende Lästigkeitsbewertung der Geräuschsamples wurden die Untersuchungsteilnehmer gebeten, auf einem Stuhl im Sweet Spot der Audiowiedergabeeinrichtung Platz zu nehmen. Vor ihnen stand ein Computer-Monitor mit einer grafischen Benutzeroberfläche und direkt neben ihnen ein kleiner Tisch auf dem das Handkraftdynamometer und die Computer-Maus platziert waren.

Jeder Proband bekam eine standardisierte, mündliche Instruktion von den Untersuchungsleitern und musste danach vier Testsamples absolvieren. Nach Abklärung möglicher Fragen durch den Untersuchungsleiter, wurden die Probanden für die Durchführung der Bewertung allein gelassen.

Jede einzelne Bewertung wurde von den Probanden selbst gestartet. Durch Mausklick konnte das jeweilige Geräusch über die Audiowiedergabeeinrichtung abgespielt werden. Im Anschluss daran wurden jeweils die Handkraftbewertung, die Lästigkeitsbewertung mittels Personal Noise Ranking Scale (PNRS) oder die Unähnlichkeitsbewertung mittels Multidimensional Scale aktiviert. Die Probanden konnten dabei zwar die Durchführung des Experiments selbst steuern, nicht jedoch die Reihenfolge der Geräusche, die im Vorhinein durch den Versuchsplan in der jeweiligen Studienphase definiert wurde. Zur besseren Übersicht wurde das Experiment z.B. in Studienphase 3 in sechs Bewertungsgruppen eingeteilt. Nach Bearbeitung einer Gruppe konnte der Proband selbstständig zur nächsten Gruppe übergehen. Weiters gab es für die Probanden die Möglichkeit durch Betätigung des „Messung unterbrechen“ Buttons eine kurze Pause einzulegen.

Die Lästigkeitsbewertung mittels PNRS und Handkraftdynamometer wurden in Studienphase 3 in einem gemeinsamen Hörversuch abgegeben. Vor Durchführung der Lästigkeitsbewertungen mittels PNRS wurden die Probanden nach Betätigung des „Play“-Buttons über die Wiedergabeeinrichtung dazu aufgefordert, sich zuerst ein nicht lästiges und danach ein stark lästiges Geräusch vorzustellen und jeweils dazu eine Kraftbewertung abzugeben. Dies sollte den Probanden dabei helfen, ihre Bewertungen im Experiment besser einordnen zu können. Nach Abgabe aller Lästigkeitsbewertungen mittels PNRS wurden die Probanden über die Wiedergabeeinrichtung gebeten, das Handkraftdynamometer drei Mal nacheinander so fest als möglich zu drücken. Der höchste dieser drei Werte wurde dann für die Auswertung der Kraftbewertung als Maximalkraft des jeweiligen Probanden angenommen.

Nach Abschluss der Lästigkeitsbewertungen wurden die Untersuchungsteilnehmer gebeten, ein zweites Mal den MDBF und danach den sogenannten Lärmempfindlichkeitsfragebogen zu bearbeiten.

Lärmempfindlichkeitsfragebogen

Zur Erfassung der Lärmempfindlichkeit der Untersuchungsteilnehmer wurde ein standardisierter Kurzfragebogen vorgegeben [Zimmer et al. 1998b]. Dieses Verfahren besteht aus 9 Items, die Reaktionen auf Lärmsituationen abfragen wie z.B. „Ich wache beim geringsten Geräusch auf“. Aufgrund der guten psychometrischen Eigenschaften ist dieses Verfahren geeignet, zwischen hoch und niedrig lärmempfindlichen Personen zu unterscheiden (Fragebogen siehe Anhang).

Ergänzende Ähnlichkeitsstrukturanalyse auf Basis der Multidimensionalen Skalierung (MDS)

Mit einem ausgewählten Anteil der Probanden ($N = 30$) aus der Studienphase 3 wurde zusätzlich eine Ähnlichkeitsstrukturanalyse auf Basis der Methode der Multidimensionalen Skalierung durchgeführt. Der allgemeine Ablauf dieser Bewertungsform [Mathar 1997] sieht wie folgt aus:

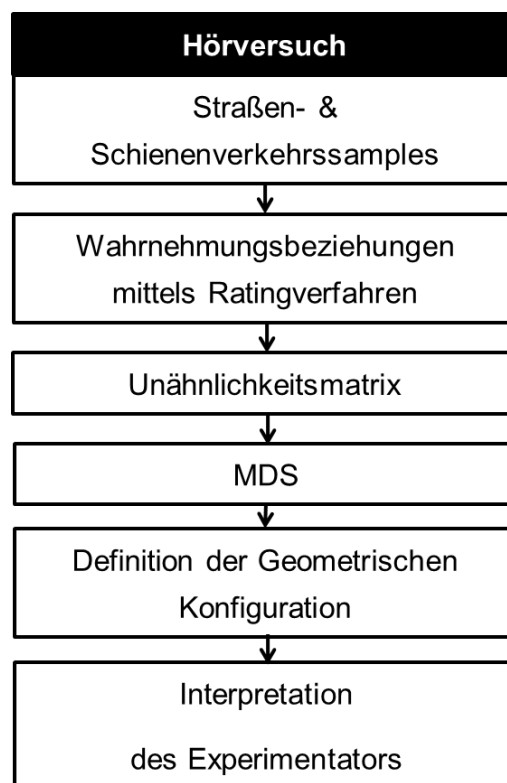


Abbildung 24: Exemplarischer Ablauf des Hörversuchs auf Basis der Multidimensionalen Skalierung in der Studienphase 3

Die Ergebnisse der Unähnlichkeitsmatrix, die dazu notwendigen Gütemasse und die Verknüpfung mit den psychoakustischen Parametern sind im Kapitel 5 beschrieben.

Hörversuch im Feld

Wie schon vorher kurz beschrieben, war das Ziel der Hörversuche im Feld, die Ergebnisse der Laborstudienphasen mit empirischen Erhebungen im Feld statistisch zu evaluieren und auch in einen korrelativen Zusammenhang zu bringen. Der gesamte Feldhörversuch mit allen relevanten Erhebungen und Messungen der Parameter wurde jeweils bei den einzelnen Probanden in deren privater Wohnumgebung (im Schlafrum und vor der Fensterfront) durchgeführt.

Nachfolgend exemplarisch eine allgemeine systematische Darstellung des gesamten Versuchsablaufes im Feld:

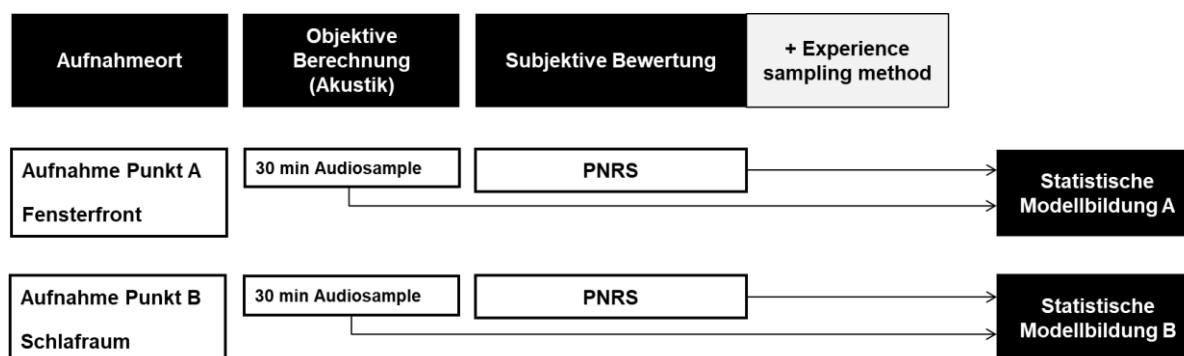


Abbildung 25: Systematische Darstellung des Ablaufs des gesamten Hörversuchs in der Studienphase 4 im Feld

Der Hörversuch hat sich im Wesentlichen in 3 Komponenten gegliedert. Im ersten Teil wurden die Messungen und Hörversuche bei den Probanden an zwei unterschiedlichen lärmdominierten Gebieten durchgeführt - einmal der Bereich schienenverkehrs-lärmdominiert und einmal der Bereich straßenverkehrs-lärmdominiert. Die detaillierten Audioaufnahmen wurden an der Fensterfront und im Schlafrum der Probanden getätigt. Parallel wurden die subjektiven Bewertungen der Probanden mit der PNRS erhoben. Zusätzlich fand die sogenannte „Experience Sampling Methode (ESM)“ Anwendung. Diese Methode ist ein Forschungsverfahren, mit dem aktuelle Zustände des Menschen (d.h. was er tut, fühlt und denkt) im alltäglichen Leben untersucht werden können. Diese neue Methode bei der Nutzung in der Lärmwirkungsforschung dient als zusätzlicher Aspekt bei der Einordnung der Ergebnisse dieser Arbeit. Im Nachgang wurden die akustischen Parameter auf Basis der Audioaufnahmen berechnet und eine statischen Modellbildung mit den subjektiven Erhebungen gemacht [Larson et al. 1983].

Mit den unterschiedlichen Hörversuchen in Bezug auf Untersuchungsort (Ort des Hörversuches), Lärmart der Quelle und Anzahl der Probanden wurde eine umfangreiche Grundlage für die weiteren statistischen Analysen geschaffen. Ein allgemeiner Überblick zu den Studienphasen ist in Tabelle 2 mit einer Gesamtsumme von 402 durchgeführten Hörversuchen zu finden.

Tabelle 2: Gliederung der 4 Studienphasen nach Untersuchungsort, Lärmart der Quelle, Aufnahmetechnik und Probandenanzahl

	Studienphase 1	Studienphase 2	Studienphase 3	Studienphase 4
Untersuchungsort	Labor	Labor	Labor	Feld
Lärmart	Straße	Straße	Straße und Schiene	Straße und Schiene
Aufnahmetechnik	Binaural	Binaural und Monaural	Binaural	Binaural
Anzahl der Probanden (N)	135	50	171+30	16

Nachfolgend werden die einzelnen Studienphasen in Bezug auf Datenerhebung und Versuchsplanerstellung detailliert beschrieben.

3.5 Studienphase 1 - Straßenverkehrslärm (Labor)

Wie vorher beschrieben, wurde ein verkehrlich relevantes Auswahlverfahren für die unterschiedlichen Messorte definiert. In den ersten beiden Studienphasen lag der Fokus auf dem Straßenverkehr am hochrangigen Netz. Auf Basis der vorhandenen Merkmale wurden mittels orthogonaler Versuchsplanung Kombinationen für synthetische Fahrzeugsamples (bzw. Fahrzeugensembles) gebildet, um ein Design für den psychoakustischen Hörversuch zu erstellen.

Tabelle 3: Verkehrsbezogener Merkmalsraum inkl. Anzahl an Ausprägungen für mögliche Kombinationen der synthetischen Fahrzeugensembles in der Studienphase 1

Merkmals	Anzahl	Definition
DTV	2	9PKW/2LKW; 5PKW/1LKW
Fahrbahnzustand	2	trocken/nass
Fahrbahndecke	3	Beton, SMA, Asphaltbeton
Geschwindigkeitsprofile	3	130/90 km/h, 100/60 km/h, 80/60 km/h
Lärmschutzwand LSW	2	nur bei SMA mit 130/90, Trocken und Nass

Daraus lässt sich eine theoretische Anzahl von zu untersuchenden Fahrzeugsamples generieren. Aufgrund von messtechnischen Einschränkungen bei den realen Messungen ergab sich die nachfolgende Grundlage für den späteren Hörversuch.

Gesamtanzahl Fahrzeugensembles:

$$2 \text{ (DTV)} * 2 \text{ (Zustand)} * 3 \text{ (Decke)} * 3 \text{ (v)} = 36 + 2 \text{ LSW} = 38 \text{ Fahrzeugensembles}$$

Grundsätzliche Annahme:

29 Ensembles in 5 Bewertungsgruppen, wobei eine Bewertungsgruppe als Referenzgruppe herangezogen wird, d.h. in Gruppe 3 befinden sich 4 Ensembles, entspricht in den anderen Gruppen jeweils einem gleichen und einem zusätzlichen Referenzensemble d.h. aus allen möglichen Kombinationen sind 24 Ensembles zu bilden (+ 5 Referenzensembles = 29).

Rahmenbedingungen auf Basis der empirischen Messungen:

- Geschwindigkeitsprofil 80/60 km/h nur bei SMA (Trocken und Nass) und Asphaltbeton (Trocken und Nass) -> 4 Ensembles anstelle von 6 -> Gesamtanzahl: $38 - 2 = 36$;
- 36 Ensembles minus 6 Ensembles (9LKW/2 PKW bei 80/60 km/h auf allen 2 Belägen), minus 1 Ensemble (Beton 9/2 bei 100/60, nass), minus 2 Ensembles (Asphaltbeton 9/2 bei 100/60, trocken und nass), minus 4 Ensembles (Asphaltbeton nass) = $36 - 6 - 1 - 2 - 4 = 24$ Fahrzeugensembles
- Als Einführung für die Probanden wurde eine Testgruppe mit je 4 Ensembles hinzugefügt, welche die gesamte 11-teilige Lästigkeitsskala abdecken.

In der nachfolgenden Tabelle sind die ausgewählten Fahrzeugsamples mit den unterschiedlichen Merkmalen in den unterschiedlichen Bewertungsgruppen dargestellt. Exemplarisch sind in der ersten Bewertungsgruppe 6 unterschiedliche Fahrzeugsamples. Zwei davon finden sich auch in den anderen Bewertungsgruppen als sogenannte Reproduzierbarkeitssamples wieder. Diese dienen dazu, um im Hörversuch die Reproduzierbarkeit der Bewertungen der Probanden zu überprüfen. Ebenso dient es im Gesamtkontext dazu, die Reliabilität des gesamten Hörversuches in Bezug auf seine Qualität und wissenschaftliche Aussagekraft zu beurteilen. Das Erste zu bewertende Fahrzeugsample besteht somit aus 5 PKW mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h und einem LKW mit einer Geschwindigkeit von 90 km/h auf einer trockenen Fahrbahndecke mit einer Asphaltbeton-Fahrbahndecke.

Tabelle 4: Experimenteller Versuchsplan der Studienphase 1 mit 5 Bewertungsgruppen und 29 definierten Geräuschsamples

1. Bewertungsgruppe	2. Bewertungsgruppe	3. Bewertungsgruppe	4. Bewertungsgruppe	5. Bewertungsgruppe
5 PKW (100 km/h) 1 LKW (60 km/h) Asphaltbeton Trocken	5 PKW (100 km/h) 1 LKW (60 km/h) Beton Trocken	5 PKW (130 km/h) Re 1 LKW (90 km/h) Beton Trocken	9 PKW (130 km/h) 2 LKW (90 km/h) SMA Trocken	9 PKW (130 km/h) Re 2 LKW (90 km/h) SMA Nass
5 PKW (130 km/h) 1 LKW (90 km/h) SMA Nass	5 PKW (80 km/h) Re 1 LKW (60 km/h) Asphaltbeton Trocken	5 PKW (130 km/h) Re 1 LKW (90 km/h) Asphaltbeton Trocken	5 PKW (130 km/h) 1 LKW (90 km/h) Beton Nass	5 PKW (100 km/h) 1 LKW (60 km/h) Beton Nass
9 PKW (100 km/h) 2 LKW (60 km/h) SMA Trocken	5 PKW (100 km/h) 1 LKW (60 km/h) SMA Nass	5 PKW (80 km/h) 1 LKW (60 km/h) SMA Nass	5 PKW (80 km/h) 1 LKW (60 km/h) SMA Trocken	9 PKW (100 km/h) 2 LKW (60 km/h) Asphaltbeton Trocken
5 PKW (130 km/h) Re 1 LKW (90 km/h) Asphaltbeton Trocken	5 PKW (130 km/h) Re 1 LKW (90 km/h) Beton Trocken	5 PKW (130 km/h) Re 1 LKW (90 km/h) SMA Trocken	9 PKW (130 km/h) 2 LKW (60 km/h) Beton Nass	5 PKW (130 km/h) 1 LKW (90 km/h) SMA – LSW Trocken
5 PKW (130 km/h) Re 1 LKW (90 km/h) SMA Trocken	5 PKW (100 km/h) 1 LKW (60 km/h) SMA Trocken	9 PKW (130 km/h) 2 LKW (90 km/h) Asphaltbeton Trocken	5 PKW (100 km/h) 1 LKW (60 km/h) SMA – LSW Trocken	5 PKW (80 km/h) Re 1 LKW (60 km/h) Asphaltbeton Trocken
9 PKW (130 km/h) 2 LKW (90 km/h) Beton Trocken	9 PKW (100 km/h) 2 LKW (60 km/h) Beton Trocken	9 PKW (130 km/h) Re 2 LKW (90 km/h) SMA Nass		9 PKW (100 km/h) 2 LKW (60 km/h) SMA Nass

In der Studienphase 1 lag der Fokus beim Hörversuch in Bezug auf die Bewertung mit der PNRS und dem ergänzenden Fragenbogen „Lästigkeitsindex“.

3.6 Studienphase 2 - Straßenverkehrslärm (Labor) – Erweiterung LKW

In der Studienphase 2 lag der Schwerpunkt in der detaillierten Betrachtung der LKWs auf dem höher-rangigen Straßennetz um diesen Einfluss auf die Lärmwirkung bei Menschen, welche grundsätzlich aus der Literatur bekannt ist, zu quantifizieren. Ein wesentlicher Aspekt liegt hierbei auf einer Vergleichbarkeit in Bezug auf den Versuchsplan und der Ergebnisse mit der Studienphase 1. In dieser Studienphase wurden zusätzliche Erhebungen an den LKWs an speziellen Ausleitstellen (Raststationen, Parkplätze) durchgeführt. In Summe wurden dafür 48 mitarbeitende Personen, neben ASFINAG-Mitarbeitern und Polizei eingesetzt, welche dieses Projekt als Erhebungspersonal unterstützten. An den Ausleitstellen wurden die LKW-Befragungen (definierter Befragungsbogen siehe Anhang) zu folgenden Punkten durchgeführt:

- Dokumentation der Bereifung (Profiltiefe, Fotos)
- Dokumentation der LKW-Art (Fotos von Silhouette und Front)
- Dokumentation der akustisch relevanten Fahrzeugkenndaten (Bauart, Motorleistung, Beladung, Zulassungszeitpunkt, usw.)

Tabelle 5: Verkehrsbezogener Merkmalsraum bei LKWs inkl. Anzahl an Ausprägungen für mögliche Kombinationen der synthetischen LKW-Samples in der Studienphase 2

Merkmal	Anzahl	Definition
Fahrbahnzustand	2	trocken/nass
Fahrbahndecke	3	Beton, SMA, Asphaltbeton
Geschwindigkeitsprofile	2	90 km/h, 60 km/h
Profiltiefe (PT)	2	kleiner (kl) <10 mm; größer (gr) >= 10 mm
Lärmschutzwand LSW	2	nur bei SMA mit 90 und 60 km/h, trocken, PT gr

Daraus lässt sich eine theoretische Anzahl von zu untersuchenden LKW-Samples generieren. Aufgrund von messtechnischen Einschränkungen bei den realen Messungen ergab sich die nachfolgende Grundlage für den späteren Hörversuch.

Gesamtanzahl LKW-Vorbeifahrten:

$2 \text{ (Zustand)} * 3 \text{ (Decke)} * 2 \text{ (v)} * 2 \text{ (PT)} = 24 + 2 \text{ LSW} = 26$ plus 3 Referenzvorbeifahrten = 29 LKWs

Grundsätzliche Annahme:

25 LKW-Vorbeifahrten in 4 Bewertungsgruppen, wobei Bewertungsgruppe 3 als Referenzgruppe herangezogen wird, d.h. in Gruppe 3 befinden sich 3 LKW-Vorbeifahrten, welche auch in den anderen Bewertungsgruppen als Reproduzierbarkeitsensembles vorkommen, d.h. aus allen möglichen Kombinationen sind 22 LKW-Vorbeifahrten zu bilden (+ 3 Referenzvorbeifahrten = 25)

Allgemeine Information zu Einteilung der Profiltiefe:

Gesetzliche Bestimmungen zur Profiltiefe für Fahrzeuge >3,5 t Gesamtgewicht (NFZ)

- Sommerreifen - Mindest-Reifenprofiltiefe 2 mm
- Winterreifen - Mindest-Reifenprofiltiefe – Diagonal 6 mm / Radial 5 mm

In der nachfolgenden Tabelle sind die ausgewählten LKW-Samples mit den unterschiedlichen Merkmalen in den 4 unterschiedlichen Bewertungsgruppen dargestellt. Ebenso sind die Reproduzierbarkeitsamples extra ausgewiesen. Auch in der Studienphase 2 lag der Fokus beim Hörversuch in Bezug auf die Bewertung auf der PNRS und dem ergänzenden Fragenbogen „Lästigkeitsindex“.

Tabelle 6: Experimenteller Versuchsplan der Studienphase 2 mit 4 Bewertungsgruppen und 25 definierten Geräuschsamples

1. Bewertungsgruppe	2. Bewertungsgruppe	3. Bewertungsgruppe	4. Bewertungsgruppe
1 LKW (90 km/h) Beton Trocken PT gr	1 LKW (90 km/h) Beton Trocken PT kl	1 LKW (60 km/h) Re Asphaltbeton Trocken PT gr	1 LKW (90 km/h) SMA Trocken PT gr
1 LKW (90 km/h) Asphaltbeton Trocken PT gr	1 LKW (60 km/h) SMA Trocken PT gr	1 LKW (90 km/h) Re SMA Nass PT gr	1 LKW (60 km/h) Beton Nass PT kl
1 LKW (60 km/h) SMA-LSW Trocken PT gr	1 LKW (90 km/h) Re SMA Nass PT gr	1 LKW (60 km/h) SMA Nass PT gr	1 LKW (60 km/h) SMA Trocken PT kl
1 LKW (90 km/h) Re Beton Nass PT gr	1 LKW (60 km/h) Beton Trocken PT gr	1 LKW (60 km/h) Beton Trocken PT kl	1 LKW (60 km/h) Beton Nass PT gr
1 LKW (60 km/h) Asphaltbeton Trocken PT kl	1 LKW (90 km/h) SMA - LSW Trocken PT gr	1 LKW (90 km/h) Re Beton Nass PR gr	1 LKW (60 km/h) Re Asphaltbeton Trocken PT gr
1 LKW (90 km/h) SMA Trocken PT kl	1 LKW (90 km/h) Beton Nass PT kl	1 LKW (90 km/h) SMA Nass PT kl	1 LKW (90 km/h) Asphaltbeton Trocken PT kl
	1 LKW (60 km/h) SMA Nass PT kl		

3.7 Studienphase 3 - Straßen- und Schienenverkehrslärm (Labor)

Die Studienphase 3 stellt das zentrale Element dieser Arbeit dar. Die Gründe dafür sind vielfältig. Auf der einen Seite wurden Messungen im Bereich der Straße und der Schiene durchgeführt. Auf der anderen Seite war die größte Anzahl an Probanden pro Studienphase involviert. Zusätzlich wurden alle drei vorher beschriebenen Bewertungsmethoden (PNRS, Handkraftdynamometer und MDS) angewendet und die Aspekte in Bezug auf die Befragungen wurden deutlich erweitert. In der nachfolgenden Tabelle ist der Versuchsplan mit den 6 unterschiedlichen Bewertungsgruppen nach den Kategorien Straße und Schiene im Detail abgebildet. Zusätzlich wurde zwei spezielle Aspekte in diesen Versuchsplan integriert. Erstens wurden neutrale Geräuschsamples aus dem Bereich des weißen Rauschens mit definierten Schalldruckpegeln in den Hörversuch integriert und zweitens wurden in der Bewertungsgruppe 6 direkte Paarvergleich von Straßen- und Schienensamples mit gleichen Schalldruckpegeln als Bewertungsgrundlage in das Hörversuchsexperiment einbezogen. Das weiße Rauschen dient als neutrales Geräusch ohne negative Wirkung in Bezug auf Verkehrslärm, und der direkte Vergleich von Straße und Schiene bei gleichem Schalldruckpegel wurde in Bezug auf den sogenannten Schienenbonus in weiterer Folge analysiert. Als Schienenbonus sind in der Literatur im Verkehrswesen unterschiedliche Sachverhalte bekannt. Zum einen wird so eine Berechnungsmethode bei der Bewertung von Verkehrslärm bezeichnet, die unter der Annahme einer geringeren Lästigkeit von Schienenverkehrslärm diesen

im Vergleich mit dem Straßenverkehr etwas besserstellt. Zum anderen wird als Schienenbonus die Annahme einer höheren Akzeptanz schienengebundener Verkehrsmittel durch die Fahrgäste im Vergleich mit dem Bus bei ansonsten gleichen Angebotsparametern bezeichnet.

Tabelle 7: Experimenteller Versuchsplan der Studienphase 3 mit 6 Bewertungsgruppen und 31 definierten Geräuschsamples

Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5	Gruppe 6
Schiene PZ - A	Straße SMA - B	Schiene PZ - B	Schiene GZ - C - Re Repro	Straße Beton - D	Straße 55 dB
Straße SMA - A	Schiene GZ - B	Rauschen 60 dB	Straße Beton - C	Rauschen 70 dB	Schiene 55 dB
Straße Beton - A	Straße Beton - B	Schiene GZ - C	Schiene PZ - C	Straße SMA - C - Re Repro	Straße 65 dB
Schiene GZ - A	Rauschen 50 dB	Rauschen 80 dB	Straße SMA - D	Schiene PZ - D	Schiene 65 dB
Schiene PZ - A - Re Repro	Straße SMA - C	Schiene GZ - D	Straße Beton - C - Re	Rauschen 70 dB - Re Repro	Straße 75 dB
					Schiene 75 dB

3.8 Studienphase 4 - Straßen- und Schienenverkehrslärm (Feld)

Die Studienphase 4 unterscheidet sich grundlegend von den Phasen 1 bis 3. Das Ziel dieser Phase war es, die Erkenntnisse aus dem Labor in das reale Feld zu übertragen und in weiterer Folge die Ergebnisse statistisch zu vergleichen. Die unterschiedlichen Methoden stellen jedoch eine große Herausforderung in Bezug auf die Komplexität bei der Interpretation der Ergebnisse dar. Dies ist in weitere Folge bei der Modellbildung von großer Relevanz. Grundsätzlich wurden auch in dieser Phase die Aufnahmen mit der binauralen Kopftechnik an straßen- und schienendominierten Verkehrswegen durchgeführt.

Auch der gesamte Feldhörversuch mit allen relevanten Erhebungen und Messungen der Parameter wurde jeweils bei den einzelnen Probanden in deren privater Wohnumgebung (im Schlaf- bzw. Wohnraum und vor der Fensterfront) durchgeführt. Alle Messungen wurden in einer Entfernung von der

Fensterfront bis zum Straßen- bzw. Schienenobjekt von bis zu 50 Metern getätigt. Es wurden in Summe bei 16 Probanden (8 Frauen und 8 Männer) an jeweils 3 Messtagen (Morgen- und Abendzeitraum) die Aufnahmen durchgeführt. Die Probanden mussten in diesen Zeiträumen explizit den Verkehrslärm mittels PNRS subjektiv in 30 Minuten Intervallen bewerten. Zusätzlich wurden zeitnahe Aktivitäten und Orte in der Wohnumgebung nach der „Experience Sampling Method“ während dieser definierten Zeiträume dokumentiert. Als Basisfragen der gesamten Hörversuchsreihe im Feld wurden die gleichen Fragebögen, wie bei den Laborstudien, am Beginn des Experiments abgefragt. Ein repräsentatives Abbild in Bezug auf die Gesamtbevölkerung ist jedoch aufgrund der kleinen Stichprobe nicht möglich. Der wesentlichen Aspekte lagen jedoch im Vergleich der Ergebnisse zwischen Labor und Feld und zusätzlich auch darin, eine neue Erhebungsmethode im Bereich Verkehrslärm in eine reale Umsetzung zu bringen. In der nachfolgenden Abbildung sind grundlegende Informationen der Felduntersuchungen inkl. einem zeitlichen Ablauf und Merkmalsausprägung dargestellt.

Dateninformation	Beginn der Versuchsreihe	Befragungen im Morgen- und Abendzeitraum
<ul style="list-style-type: none"> Stichprobe Probanden N = 16 Abend: 19 bis 22 Uhr Morgen: 6 bis 8 Uhr 3 Messnächte und Tage 30 Bewertungen pro Proband 	Basisfragebogen <ul style="list-style-type: none"> Geschlecht Alter Ausbildung Wohnbedingungen gegenüber Verkehrslärm Wohndauer Lärmempfindlichkeit 	PNRS – Fragebogen <ul style="list-style-type: none"> Subjektive Lästigkeitsurteile auf Basis der PNRS halbstündliche Befragung Experience sampling method: Beurteilung für zeitnahe Erlebnisse in Zusammenhang mit aktueller Aktivität & Ort

Abbildung 26: Detaillierte Beschreibung der Studienphase 4 im Feld mit grundsätzlichen Informationen und dem zeitlichen Ablauf

4 Ergebnisse der subjektiven und objektiven Parameter

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Hörversuche aus den einzelnen Studienphasen beschrieben. Dabei erfolgt eine Unterscheidung in objektive und subjektive Parameter, um für die nachfolgende Modellbildung eine Grundlage zu schaffen. Aufgrund des großen Ergebnisumfanges der einzelnen Studienphasen werden für die Studienphase 3 die Ergebnisse im Detail nachfolgend ausgeführt und für die restlichen Studienphasen erfolgt eine allgemeine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse. Des Weiteren sind für alle Studienergebnisse die grundlegenden Datensätze in der gleichen Form aufbereitet und die Ergebnisse im Anhang dieser Arbeit in konsolidierter Form dargestellt. Die Studienphase 3 wurde aufgrund der hohen Stichprobenanzahl der ProbandInnen und Repräsentativität der erhobenen Datensätze als zentrales Element der Darstellung ausgewählt.

4.1 Ergebnisse Studienphase 3 der subjektiven Hörversuche

In diesem Unterkapitel sind alle subjektiven Ergebnisse der Studienphase 3 von der Bewertung mittels PNRS (entspricht dem Parameter Lästigkeit), über das Handkraftdynamometer und die verschiedenen Fragebögen angeführt. Die subjektiven Ergebnisse aus der MDS-Untersuchung ($N = 30$) sind in Kapitel 5 integrativer Bestandteil der dazu gehörigen Modellergebnisse.

In der nachfolgenden Abbildung 27 werden alle Ergebnisse der Lästigkeitsurteile, auf Basis der PNRS, der Probanden nach Bereinigung der Rohdaten ($N = 171$) für alle 31 Hörversuchssamples (26 definierte Soundsamples inkl. der 5 Reproduzierbarkeitssamples) dargestellt. Man kann anhand der Verteilung in den Boxplots sehen, dass grundsätzlich der gesamte Bereich der Lästigkeitsskala von den Probanden bewertet wird. Einzelne Lärmsamples haben eine sehr hohe Varianz in den subjektiven Bewertungen.

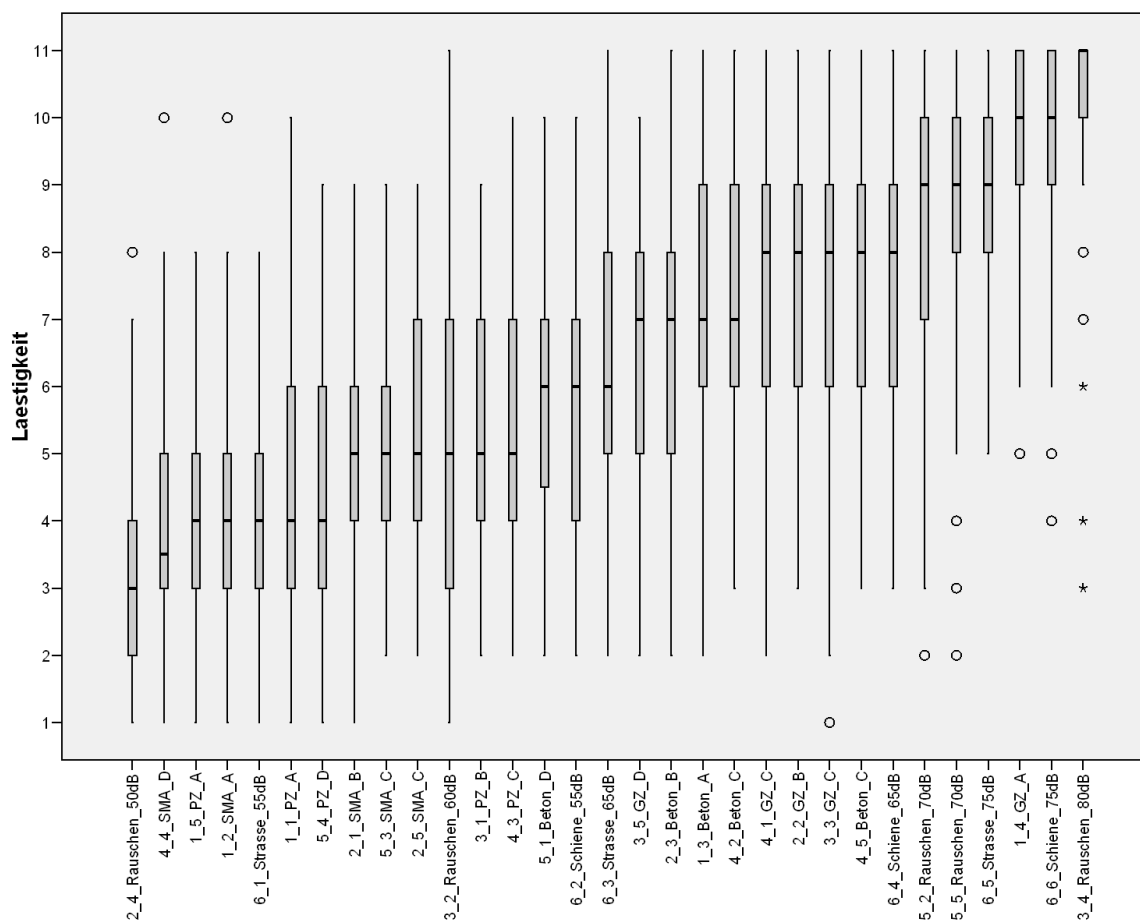


Abbildung 27: Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf alle 31 definierten Soundsamples (Studienphase 3, N=171)

In der Tabelle 8 sind die $L_{A,eq}$ -Werte der einzelnen Lärmsamples über den Zeitbereich von 60 Sekunden ausgewiesen, um die Bandbreite des Schalldruckpegels der bewerteten Vorbeifahrten in Abhängigkeit der Lärmquelle (Straße, Schiene und Rauschen als Vergleichsgröße) einzuordnen.

Tabelle 8: Beschreibung aller 26 Soundsamples und Zuordnung zu den einzelnen Kategorien und dem A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{A,eq}$

Samplename	Verkehrsart	$L_{A,eq}$ [dB]
PZ_A	Schiene	51,1
PZ_B	Schiene	55,27
PZ_C	Schiene	57,72
PZ_D	Schiene	53,69
GZ_A	Schiene	72,06
GZ_B	Schiene	65,01
GZ_C	Schiene	69,03
GZ_D	Schiene	63,79
SMA_A	Straße	57,89
SMA_B	Straße	60,39
SMA_C	Straße	61,17
SMA_D	Straße	55,17
Beton_A	Straße	69,66
Beton_B	Straße	68,64
Beton_C	Straße	71,46
Beton_D	Straße	64,64
Straße_55dB	Straße	55
Straße_65dB	Straße	65
Straße_75dB	Straße	75
Schiene_55dB	Schiene	55
Schiene_65dB	Schiene	65
Schiene_75dB	Schiene	75
Rauschen_50dB	Rauschen	50
Rauschen_60dB	Rauschen	60
Rauschen_70dB	Rauschen	70
Rauschen_80dB	Rauschen	80

In den nachfolgenden Abbildungen ist der Verlauf des Schalldruckpegels L_A [dB] aller 26 Soundsamples über die definierte Dauer von 60 Sekunden dargestellt.

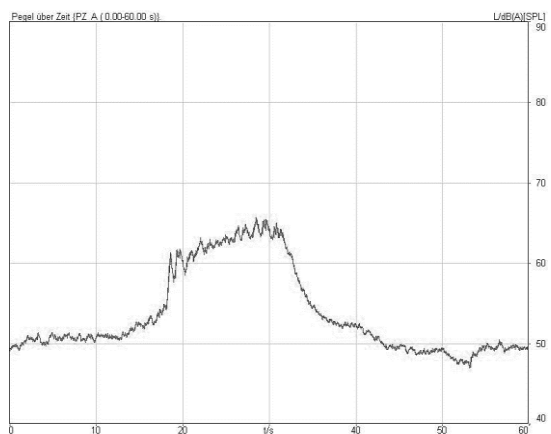


Abbildung 28: PZ_A: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 51,1$ dB)

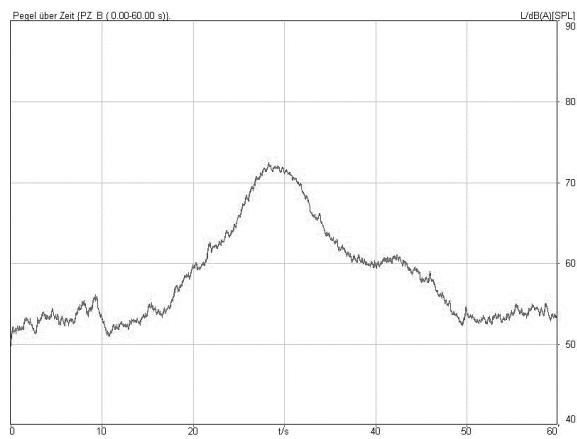


Abbildung 29: PZ_B: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 55,27$ dB)

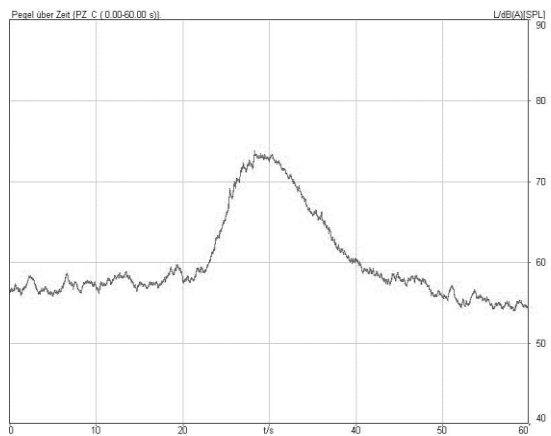


Abbildung 30: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 57,72$ dB)

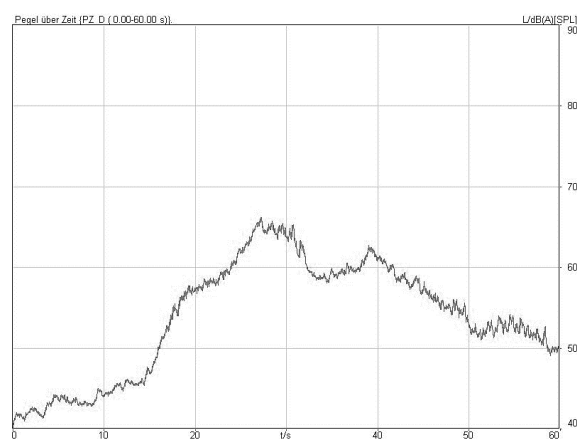


Abbildung 31: PZ_D: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 53,69$ dB)

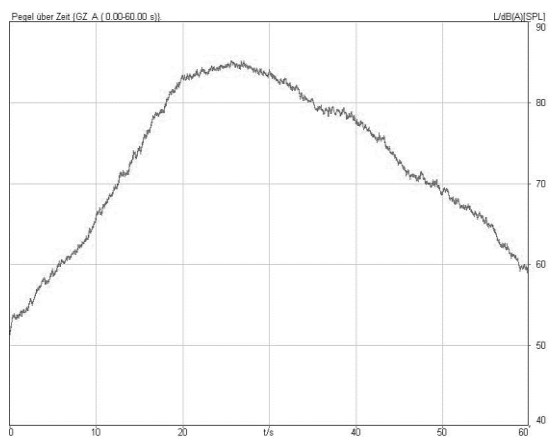


Abbildung 32: GZ_A: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 72,06$ dB)

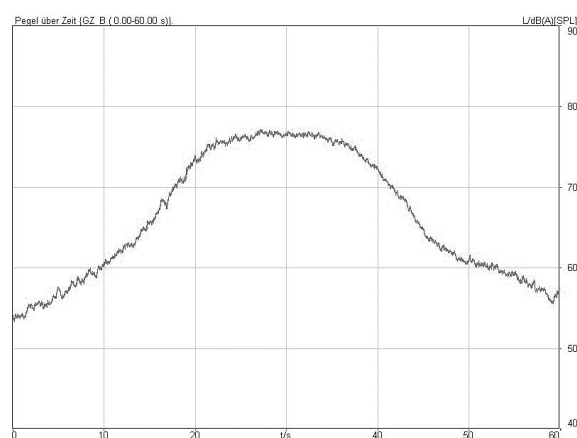


Abbildung 33: GZ_B: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 65,01$ dB)

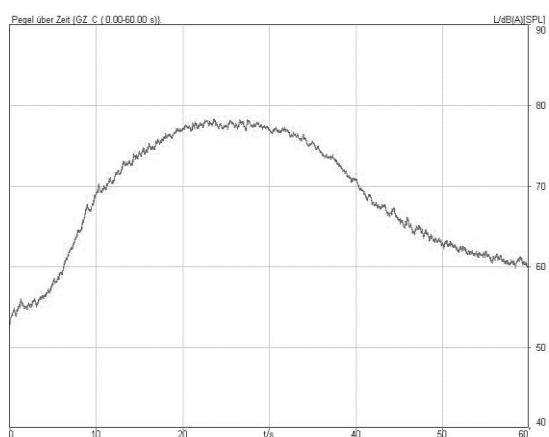


Abbildung 34: GZ_C: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 69,03$ dB)

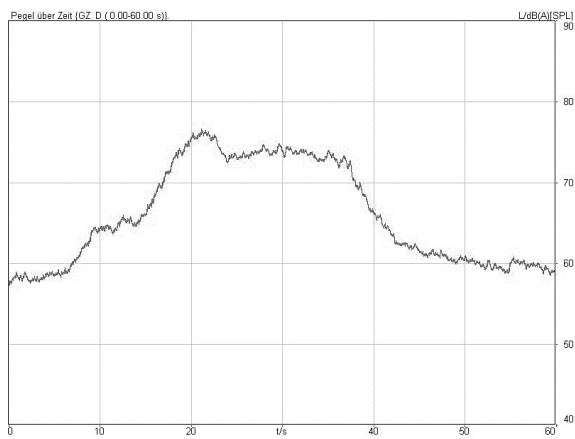


Abbildung 35: GZ_D: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 63,79$ dB)

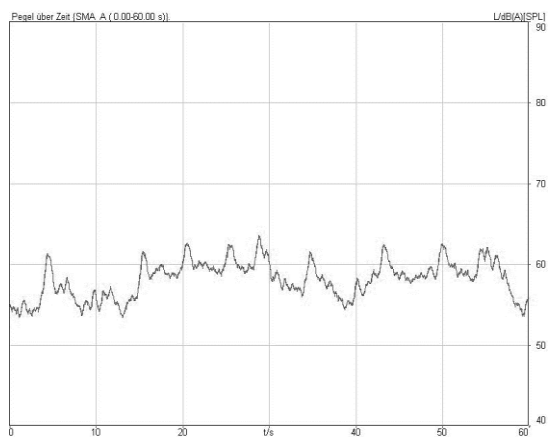


Abbildung 36: SMA_A: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 57,89$ dB)

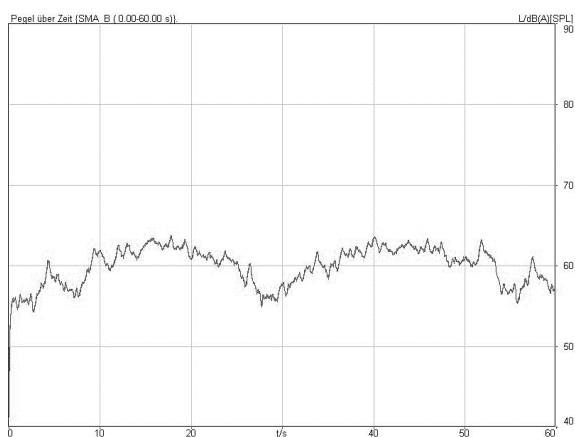


Abbildung 37: SMA_B: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 60,39$ dB)

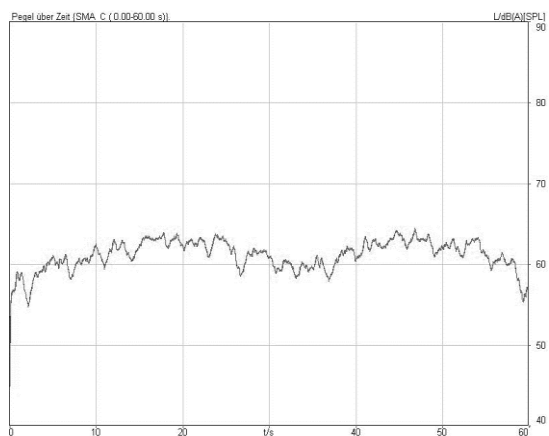


Abbildung 38: SMA_C: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 61,17$ dB)

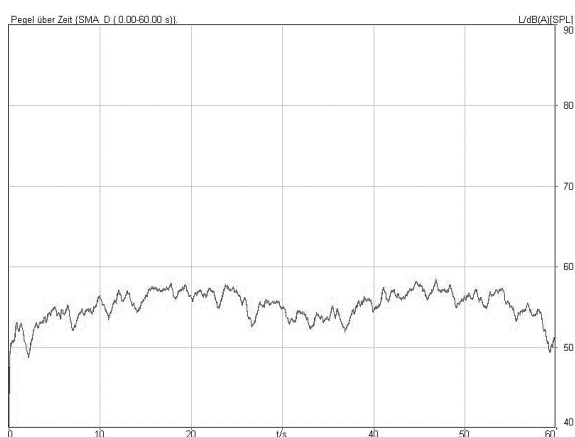


Abbildung 39: SMA_D: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 55,17$ dB)

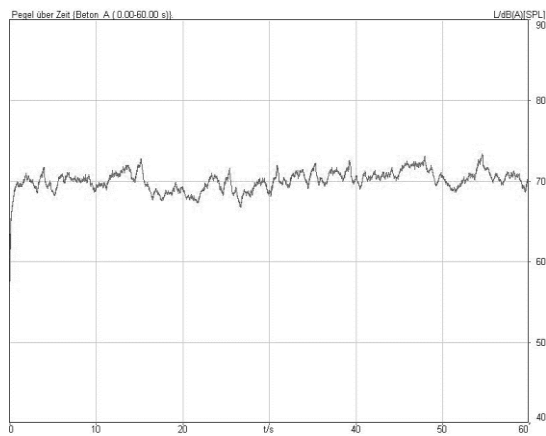


Abbildung 40: Beton_A: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 69,66$ dB)

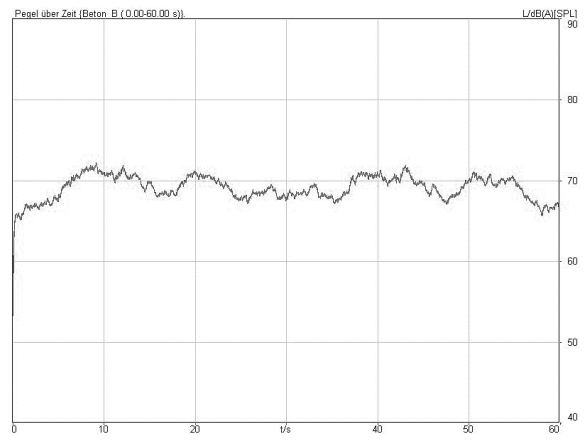


Abbildung 41: Beton_B: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 68,64$ dB)

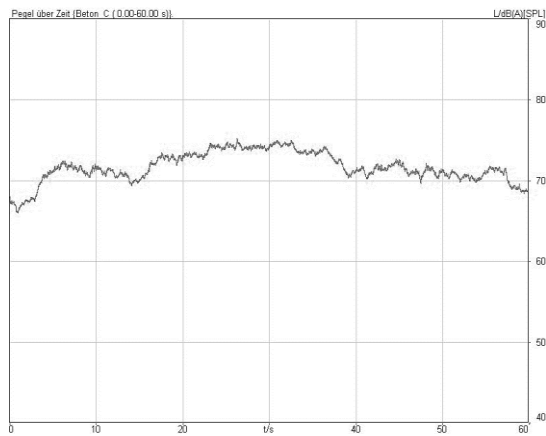


Abbildung 42: Beton_C: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 71,46$ dB)

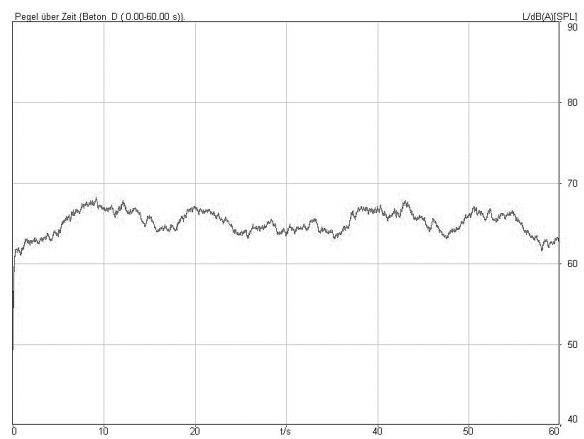


Abbildung 43: Beton_D: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 64,64$ dB)

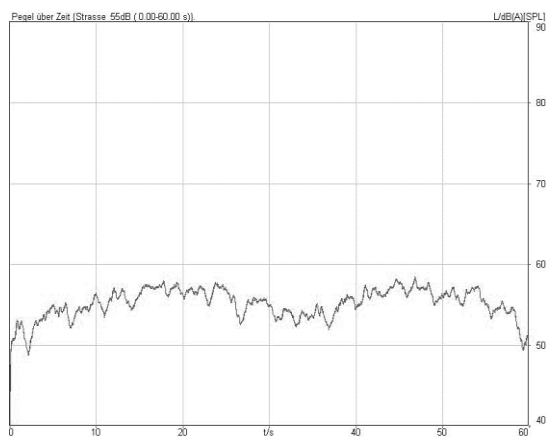


Abbildung 44: 2.1.17:Strasse_55dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 55$ dB)

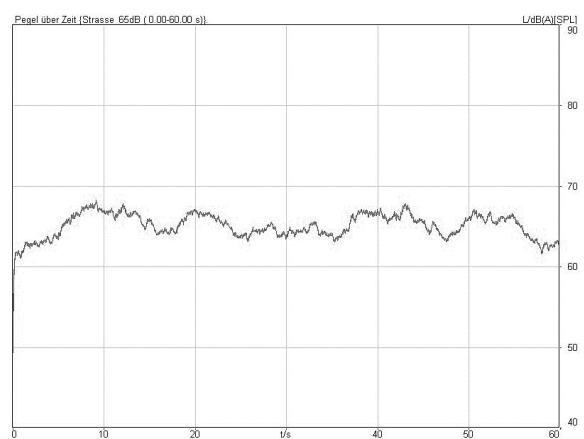


Abbildung 45: Strasse_65dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 65$ dB)

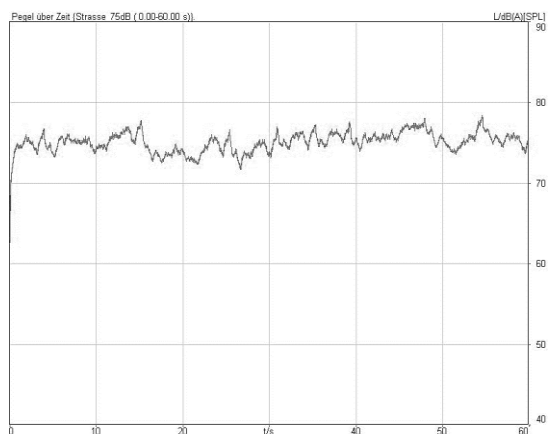


Abbildung 46: Strasse_75dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 75$ dB)

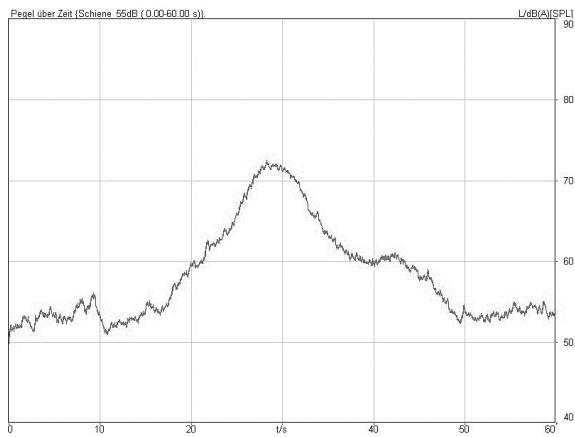


Abbildung 47: Schiene_55dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 55$ dB)

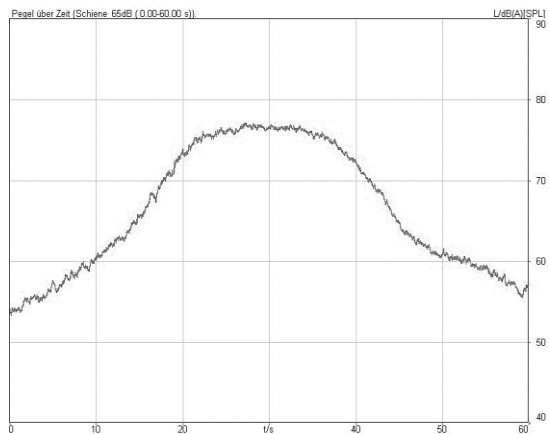


Abbildung 48: Schiene_65dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 65$ dB)

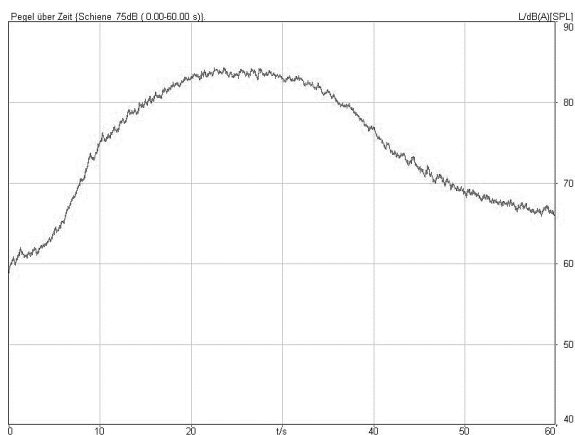


Abbildung 49: Schiene_75dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 75$ dB)

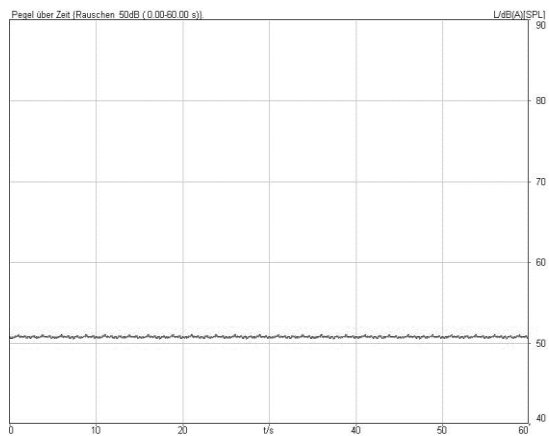


Abbildung 50: Rauschen_50dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 50$ dB)

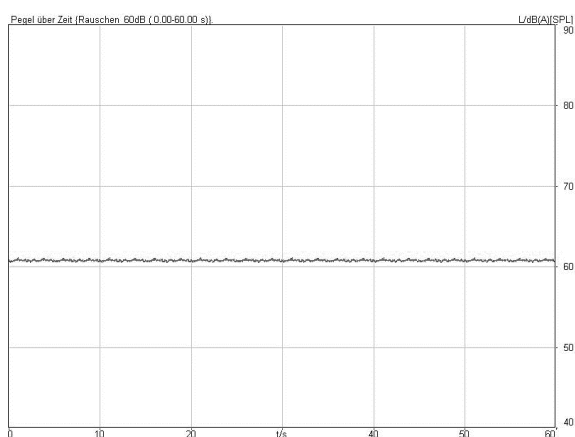


Abbildung 51: Rauschen_60dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 60$ dB)

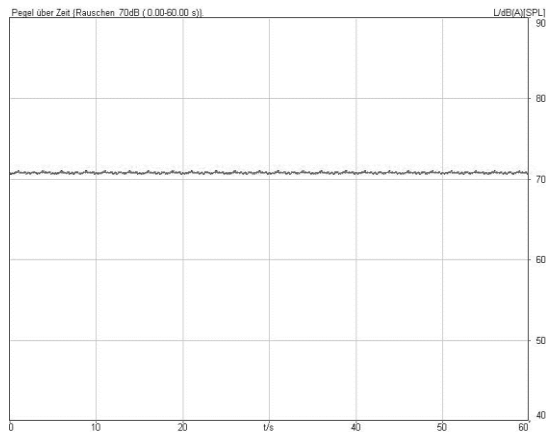


Abbildung 52: Rauschen_70dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 70$ dB)

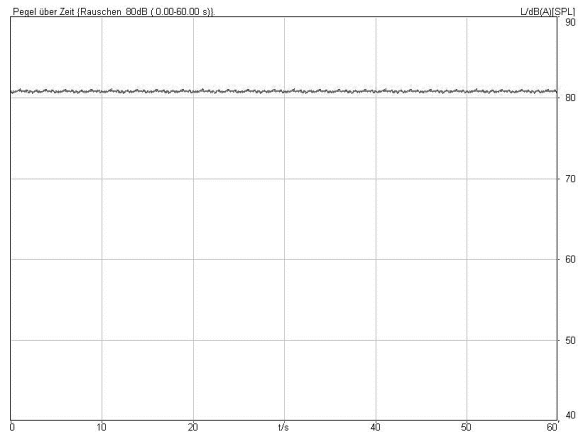


Abbildung 53: Rauschen_80dB: Pegel über Zeit ($L_{A,eq} = 80$ dB)

Pro UntersuchungsteilnehmerIn wurde über alle Skalenbewertungen der Lästigkeit der Mittelwert gebildet. Diese neu errechnete Variable wird im Folgenden als „mittlere Lästigkeitsbeurteilung“ bezeichnet. Weiters wurden die mittleren Lästigkeitsbewertungen getrennt für Straßen- und Schienenverkehrslärm und für das Rauschen berechnet.

Die Variable „mittlere Lästigkeitsbeurteilung“ weist einen Mittelwert \bar{x} von 6,59 und eine Standardabweichung s von 1,17 auf. Die minimale mittlere Lästigkeitsbeurteilung liegt bei 4,16 während das Maximum bei 9,22 liegt.

Die „mittlere Lästigkeitsbewertung“ von Straßenverkehrslärm zeigt im Mittel einen Wert von 6,15 ($s = 1,45$), wobei der niedrigste Wert 2,92 und der Höchste 9,77 beträgt.

Die Variable „mittlere Lästigkeitsbeurteilung“ von Schienenverkehrslärm hat einen Mittelwert von 6,72 und eine Standardabweichung von 1,40. Ihr Minimum liegt bei 3,69, ihr Maximum bei 9,92.

Der Mittelwert der Variable „mittlere Lästigkeitsbewertung“ von Rauschen liegt bei 7,43. Ihre Standardabweichung beträgt 1,57. Der niedrigste Wert liegt bei 2,20 während der maximale Wert 10,80 beträgt.

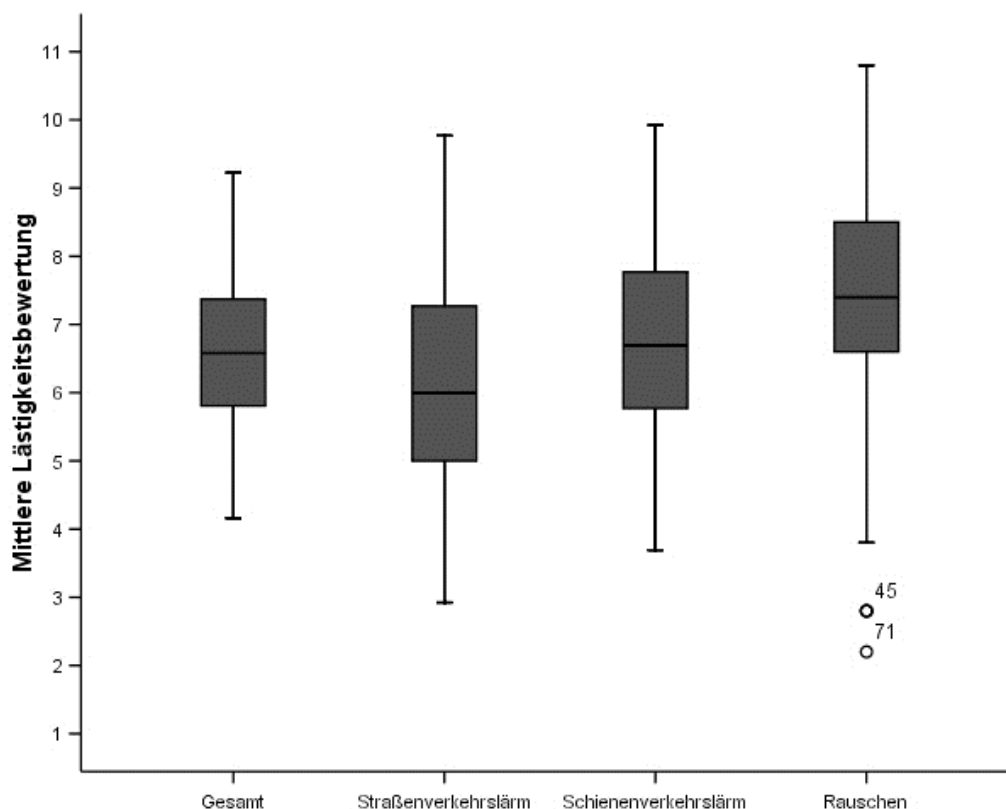


Abbildung 54: Boxplot der mittleren Lästigkeitsbeurteilung über alle Bewertungen (Gesamt), die Bewertungen für Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen (Studienphase 3, N=171)

Wie in Abbildung 54 zu sehen ist, zeigen die mittleren Lästigkeitsbeurteilungen auf der Personal Noise Ranking Scale bei deutlich unterschiedlichen Mittelwerten sehr ähnliche Standardabweichungen. Nach Bereinigung der Rohdaten zeigen sich nur mehr bei den Lästigkeitsurteilen der Samples mit weißem Rauschen zwei einzelne Datenpunkte, die mehr als zwei Standardabweichungen vom Mittelwert der Gruppe entfernt liegen. Diese Werte decken sich mit den Berichten einiger ProbandInnen, die die 55 dB Rauschen mit Wasserfallgeräuschen assoziierten und somit als besonders angenehm empfanden. Diese einzelnen Ausreißer wurden für die weitere Auswertung in der Stichprobe belassen, da auf Grund der großen Stichprobenzahl keine starken Auswirkungen auf die Ergebnisse zu erwarten sind.

4.1.1 Vergleich Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen

Der Unterschied in der Bewertung der Lästigkeit von Straßenverkehrsgeräuschen, Schienenverkehrsgeräuschen und Rauschen wurde mittels einfaktorieller Varianzanalyse berechnet. Es zeigte sich ein sehr signifikanter Unterschied in den Lästigkeitsbewertungen zwischen den drei Lärmquellen ($F = 77,3$; $p < 0,001$). Dieser Gesamteffekt wurde mittels Scheffe-Posttests auf Einzelunterschiede zwischen den 3 Gruppen überprüft. Auch hier konnten alle drei Geräuschgruppen signifikant unterschieden werden ($p < 0,001$). Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die drei Geräuschgrup-

pen im Mittel nicht exakt den gleichen $L_{A,eq}$ haben. Während die Gruppe der Straßenverkehrsräusche einen mittleren $L_{A,eq}$ von 64,4 dB aufweist, liegen die Schienenverkehrssamples im Mittel bei einem $L_{A,eq}$ 61,3 dB und die Rauschen-Samples bei einem $L_{A,eq}$ von 66 dB.

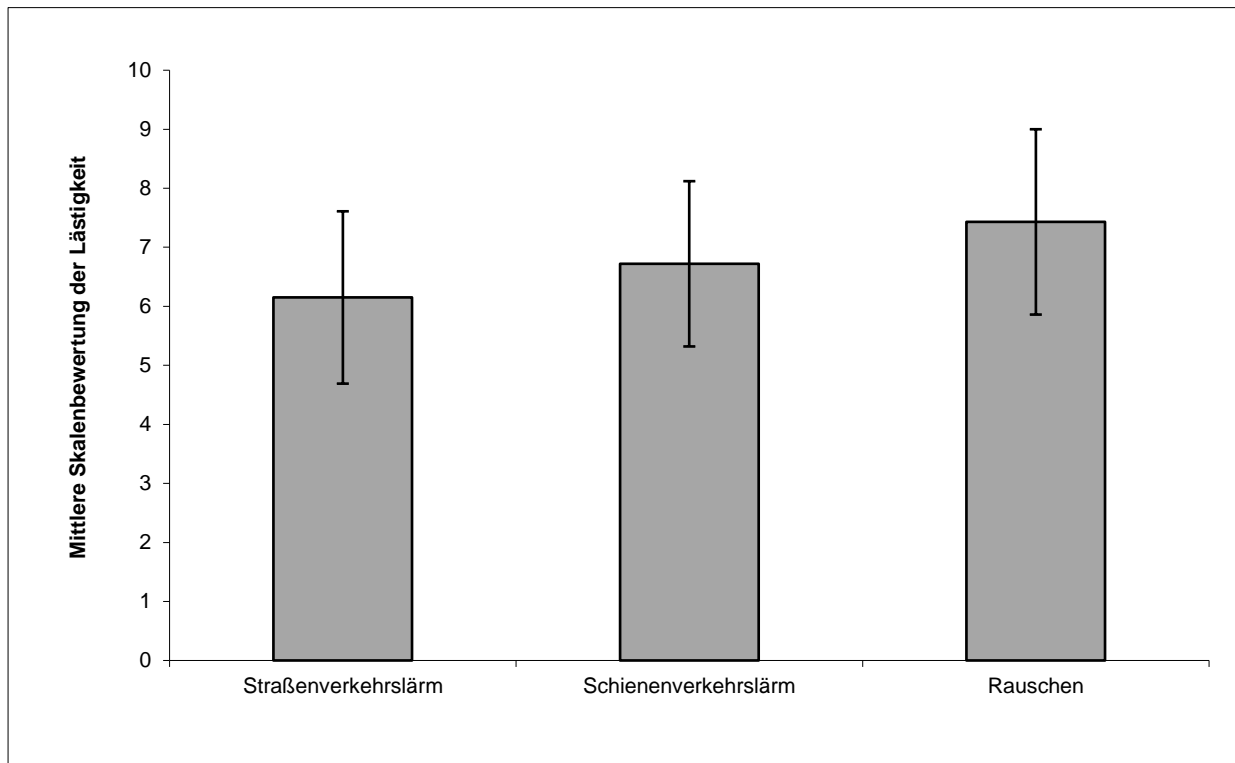


Abbildung 55: Mittlere Skalenbewertung der Lästigkeit von Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen (Studienphase 3, N=171)

Abbildung 55 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der mittleren Lästigkeitsbeurteilung für Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen. Das Rauschen wurde von den UntersuchungsteilnehmerInnen als signifikant lästiger beurteilt als die Schienenverkehrsgeräusche und diese wurden auf der Personal Noise Ranking Scale wiederum lästiger eingestuft als die Straßenverkehrsgeräusche.

4.1.2 Zusammenhang zwischen dem $L_{A,eq}$ und PNRS

Der Zusammenhang zwischen dem $L_{A,eq}$ der Geräuschsamples und den Bewertungen auf der Personal Noise Ranking Scale wurde mittels Korrelationskoeffizient r berechnet. Über alle Bewertungen zeigte sich ein hoch signifikanter Zusammenhang von .629 ($p = .00$). Je größer der $L_{A,eq}$ der Geräusche war, desto lästiger wurden sie von den UntersuchungsteilnehmerInnen wahrgenommen. Die Höhe dieses Zusammenhangs ändert sich stark, wenn die Geräuschquellen separat betrachtet werden. Hierbei zeigt sich ein etwas geringerer Koeffizient von .604 ($p < 0,001$) bei den Straßenverkehrsgeräuschen. Für die Schienenverkehrsgeräusche wurde ein Zusammenhang zwischen dem $L_{A,eq}$ und der Bewertung auf der Personal Noise Ranking Scale von .629 ($p < 0,001$) berechnet und für das Rauschen ein deutlich höherer Zusammenhang von .756 ($p < 0,001$).

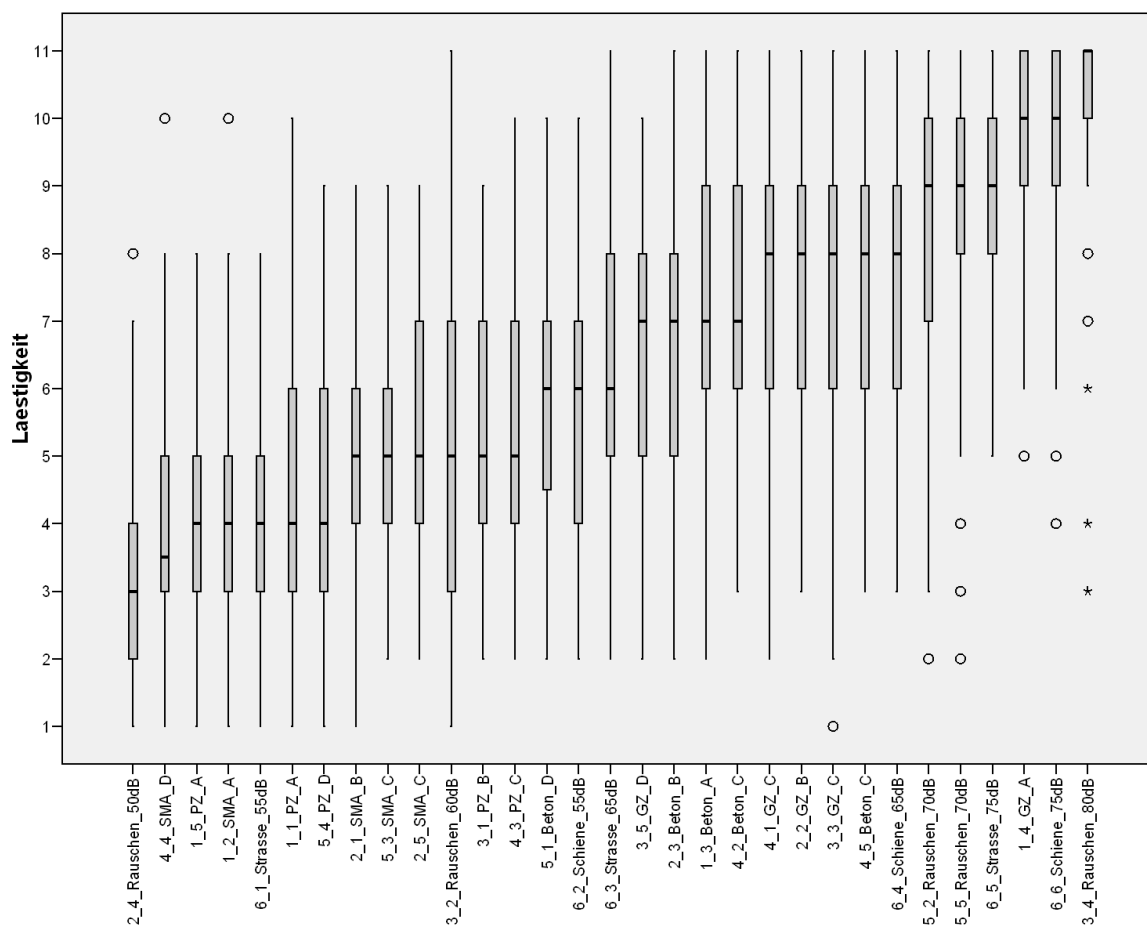


Abbildung 56: Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf die definierten Gesamt-Soundsamples mit gerundeten $L_{A,eq}$ - Angaben (Studienphase 3, N=171)

In der oben angeführten Boxplot-Darstellung (Abbildung 56) sind die Lästigkeitsurteile aller 31 Sound-samples (26 definierte Soundsamples sowie 5 Reproduzierbarkeitssamples) mit $L_{A,eq}$ -Angaben dargestellt (detaillierte Werte siehe Tabelle 8). Die ähnlichen Ergebnisse der Reprosamples zeigen die gute Reproduzierbarkeit innerhalb des Probandenkollektivs.

Die Ergebnisse der Personal Noise Ranking Scale können prinzipiell in drei Gruppen unterteilt werden. Beispiele mit einem $L_{A,eq}$ bis ca. 60 dB werden als wenig lästig empfunden, zwischen 60 dB und 70 dB liegen die Bewertungen im mittleren- und über 70 dB im oberen Bereich der 11-teiligen Intervallskala.

Besonders auffällig sind die sehr hohen Bewertungen der letzten drei Samples „1_4_GZ_A_72dB“, „6_6_Schiene_75dB“ und „3_4_Rauschen_80dB“, und dass grundsätzlich Schienenverkehrssamples lästiger empfunden werden als Straßenverkehrssamples bei gleichem $L_{A,eq}$ (vgl. „6_1_Strasse_55dB“ mit „6_2_Schiene_55dB“, „6_3_Strasse_65dB“ mit „6_4_Schiene_65dB“ und „6_5_Strasse_75dB“ mit „6_6_Schiene_75dB“).

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Lästigkeitsurteile der Probanden für die Teilbereiche Straße, Schiene und Rauschen gesondert dargestellt:

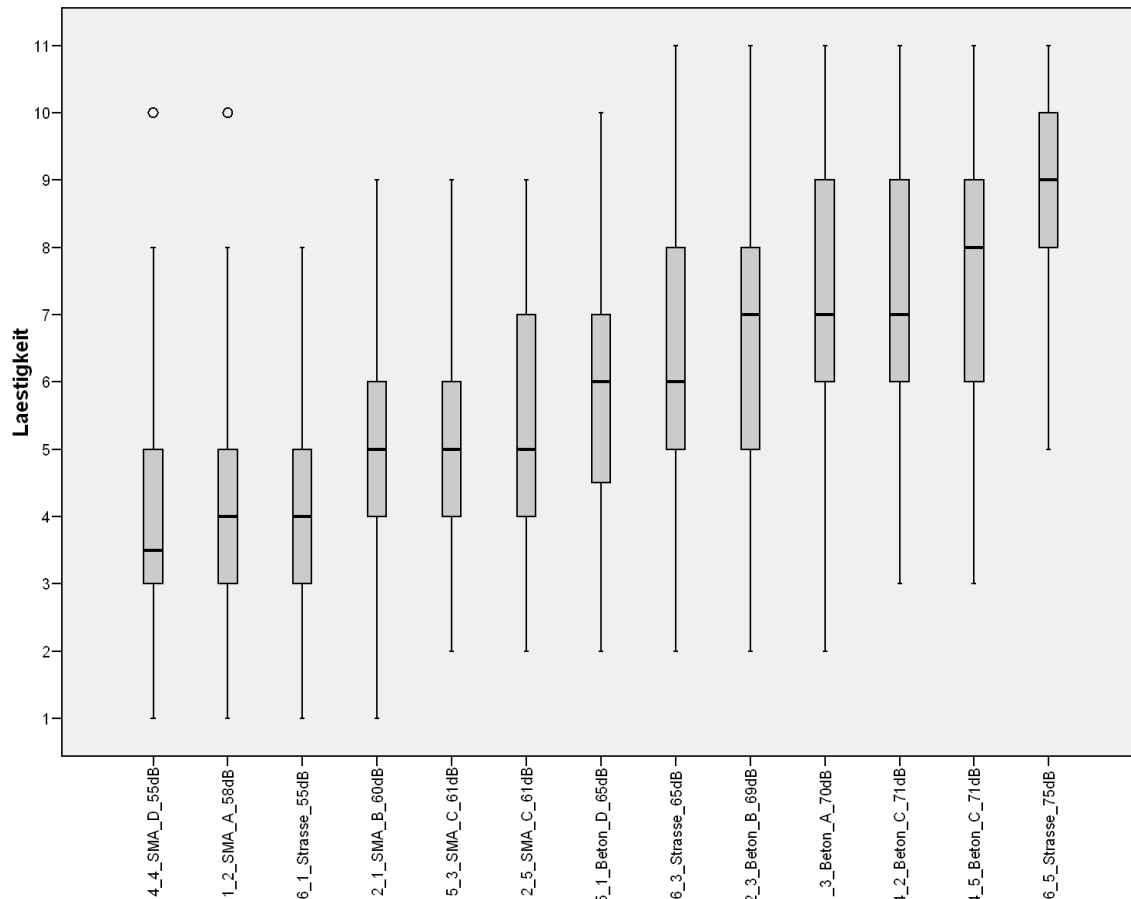


Abbildung 57: Boxplot der Personal Noise Ranking Scale in Bezug auf die definierten Straßen-Soundsamples mit den $L_{A,eq}$ - Angaben (Studienphase 3, N=171)

In diesem Boxplot sind 11 Straßenverkehrssamples und die 2 Reprosamples dargestellt. Die Ergebnisse der ersten drei Beispiele („4_4_SMA_D_55dB“, „1_2_SMA_A_58dB“ und „6_1_Strasse_55dB“) zeigen, dass verschiedene Kfz-Ensembles mit einem $L_{A,eq}$ unter 60 dB gleich bewertet und als wenig lästig empfunden werden. Ein erster Anstieg der Lästigkeitsurteile ist bei Soundsamples mit einem $L_{A,eq}$ von 60 dB bis 65 dB zu erkennen. Die Streuung der Ergebnisse nimmt in diesem Bereich ebenfalls zu. Ein weiterer deutlicher Anstieg, bei gleichbleibender Streuung, liegt im Bereich von 70 dB. Ein letzter deutlicher Anstieg ist beim Sample „6_5_Strasse_75dB“ zu sehen. Die Streuung nach oben hin ist jedoch geringer, assoziierbar mit der nach oben hin begrenzten Skala.

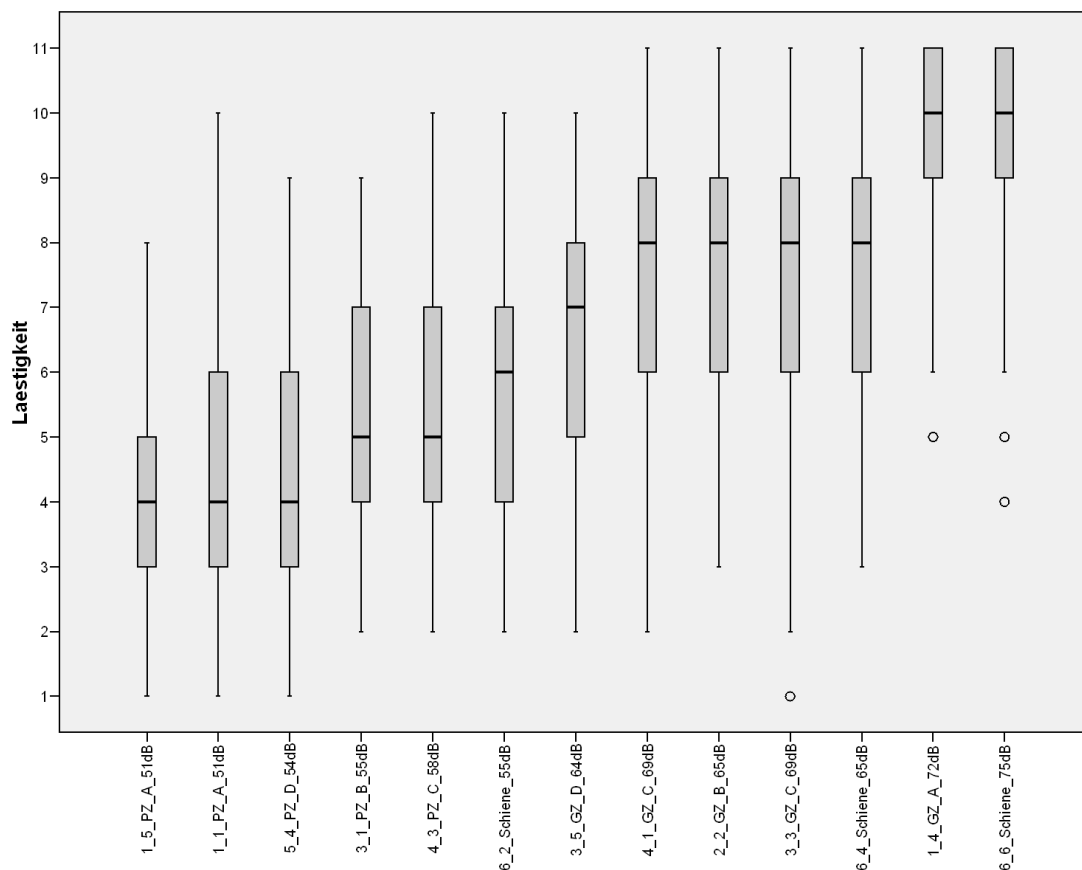


Abbildung 58: Boxplot der Personal Noise Ranking Scale in Bezug auf die definierten Schienen-Soundsamples mit den $L_{A,eq}$ - Angaben (Studienphase 3, N=171)

In der Abbildung 58 sind die 11 Soundsamples und die 2 Reprosamples der Gruppe „Schiene“ dargestellt. Interessant ist zu sehen, dass die Lästigkeitsurteile der Soundsamples mit einem $L_{A,eq}$ von unter 60 dB im Gegensatz zur Straße unterschiedlich sind. So sind bereits bei Samples mit einem $L_{A,eq}$ im Bereich von 55 dB bis 60 dB die Lästigkeitsurteile höher als im Bereich zwischen 50 dB bis 55 dB. Ein deutlicher Anstieg der Lästigkeit ist bei den Samples mit einem $L_{A,eq}$ zwischen 65 dB und 70 dB zu erkennen. Auffallend ist die besonders hohe Bewertung der Samples „1_4_GZ_A_72dB“ und „6_6_Schiene_75dB“ und deren niedrige Streuung.

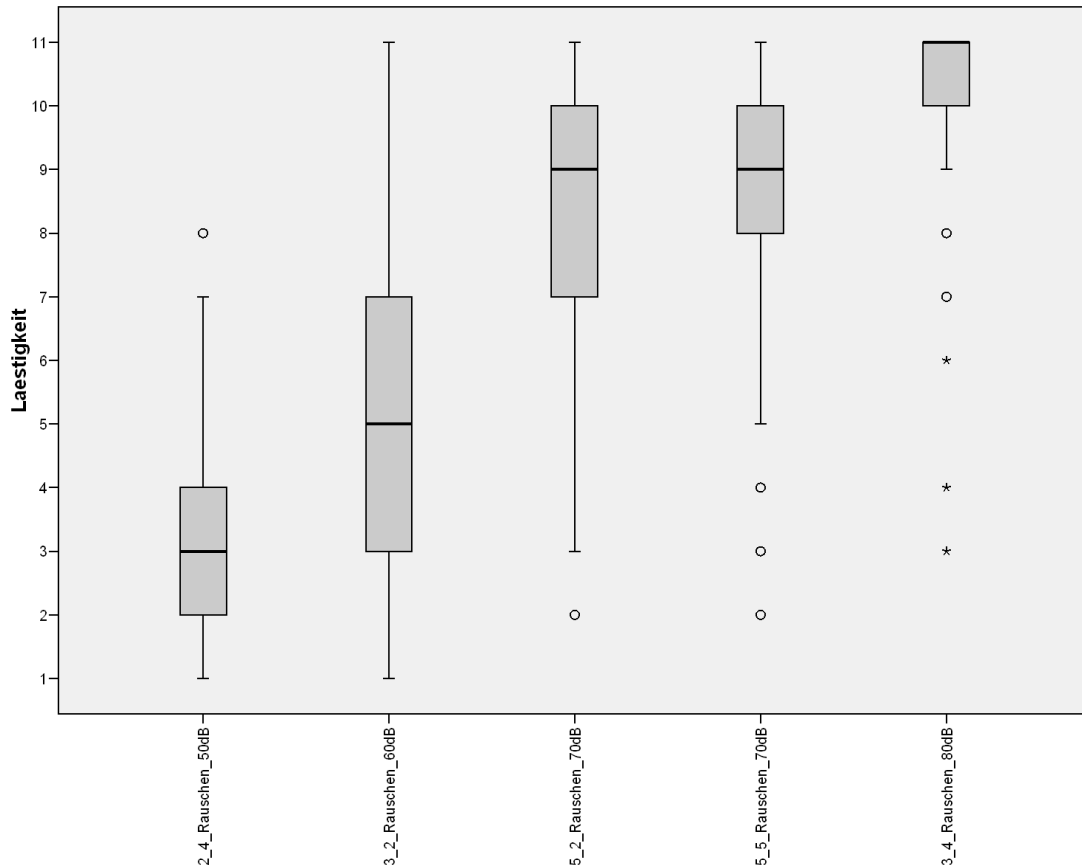


Abbildung 59: Boxplot der Personal Noise Ranking Scale in Bezug auf die definierten Rauschen-Soundsamples mit den $L_{A,eq}$ - Angaben (Studienphase 3, N=171)

In der Abbildung 59 sind die 4 Soundsamples und das Reprosample der Gruppe „Rauschen“ dargestellt. Die Abbildung zeigt deutlich den großen Anstieg der Lästigkeit zwischen den Beispielen „3_2_Rauschen_60dB“ und „5_2_Rauschen_70dB“ wobei auffällt, dass die Streuung des Samples „3_2_Rauschen_60dB“ sehr groß ist. Besonders interessant an diesem Boxplot sind die sehr hohen Bewertungen des Beispiels „3_4_Rauschen_80dB“ mit der geringen Streuung und der gleiche Medianwert der Reproduzierbarkeitssamples.

4.1.3 Paarvergleiche zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm

Um die Verkehrsgeräusche einem direkten Vergleich unterziehen zu können, wurden im letzten Block des Experiments Straßen- und Schienenverkehrssamples mit gleichem $L_{A,eq}$ von 55 dB, 65 dB bzw. 75 dB dargeboten. Somit waren statistische Vergleiche mittels t-Test möglich. Da in diesem Fall, durch die Durchführung von 3 statistischen Prüfungen, die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers erster Art (Irrtumswahrscheinlichkeit bei statistisch signifikantem Ergebnis) kumuliert wird, wurde eine Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Dabei wurde die ursprünglich abgenommene Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% durch die Anzahl der statistischen Prüfungen dividiert. Somit wurde für die nachfolgenden Paarvergleiche der Lästigkeit von Straßen- und Schienenverkehrsgeräuschen eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $5/3 = 1,67\%$ festgelegt.

Paarvergleich zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei einem $L_{A,eq}$ von 55 dB

Wie in Abbildung 60 grafisch dargestellt ist, wurden die Straßenverkehrsgeräusche mit einem $L_{A,eq}$ von 55 dB auf der Personal Noise Ranking Scale im Mittel mit 4,42 und einer Standardabweichung von 1,89 bewertet, während die Schienenverkehrsgeräusche mit $L_{A,eq}$ 55 dB von den Untersuchungsteilnehmern etwas höher ($\bar{x} = 6,00$; $s = 2,11$) eingestuft wurden.

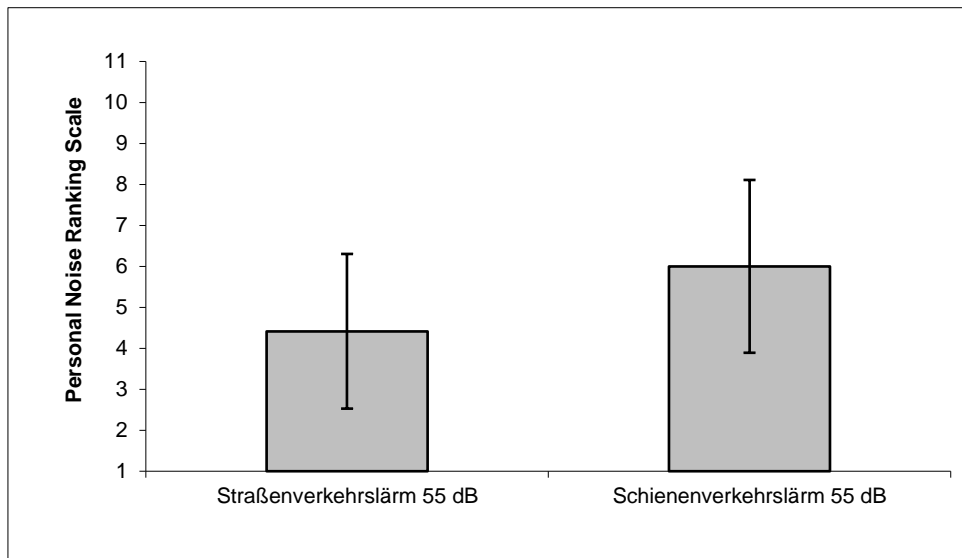


Abbildung 60: Unterschied zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei 55 dB $L_{A,eq}$

Dieser Unterschied wurde mittels t-Test überprüft und ist statistisch bedeutsam ($p < 0,001$). Schienenverkehrsgeräusche werden somit bei einem $L_{A,eq}$ von 55 dB auf der Personal Noise Ranking Scale signifikant lästiger beurteilt als Straßenverkehrsgeräusche.

Paarvergleich zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei einem $L_{A,eq}$ von 65 dB

Bei einem $L_{A,eq}$ von 65 dB wurde die Lästigkeit von Straßenverkehrslärm im Mittel mit 6,53 bei einer Standardabweichung von 2,06 eingestuft. Schienenverkehrsgeräusche wurden wiederum deutlich höher bewertet, mit einem Mittelwert von 7,81 und einer Standardabweichung von 1,90 (siehe Abbildung 61).

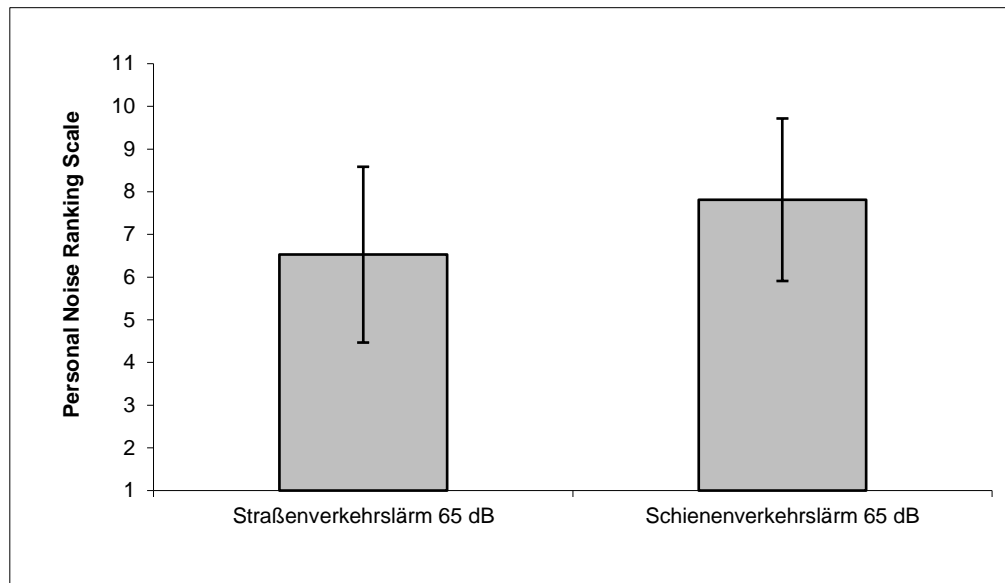


Abbildung 61: Unterschied zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei 65 dB $L_{A,eq}$

Dieser Unterschied zwischen der Lästigkeitsbewertung von Straßen- und Schienenverkehrslärm bei 65 dB $L_{A,eq}$ ist statistisch signifikant. Schienenverkehrsgeräusche werden somit bei einem $L_{A,eq}$ von 65 dB als deutlich lästiger wahrgenommen als Straßenverkehrsgeräusche.

Paarvergleich zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei einem $L_{A,eq}$ 75 dB

Abbildung 62 zeigt Mittelwert und Standardabweichung von Straßen- und Schienenverkehrslärm bei einem $L_{A,eq}$ von 75 dB. Auch in diesem Bereich wird Straßenverkehrslärm auf der Personal Noise Ranking Scale deutlich niedriger ($\bar{x} = 9,11$; $s = 1,44$) eingestuft als Schienenverkehrslärm ($\bar{x} = 9,79$; $s = 1,45$). Dieser Unterschied ist wiederum statistisch signifikant ($p < 0,001$).

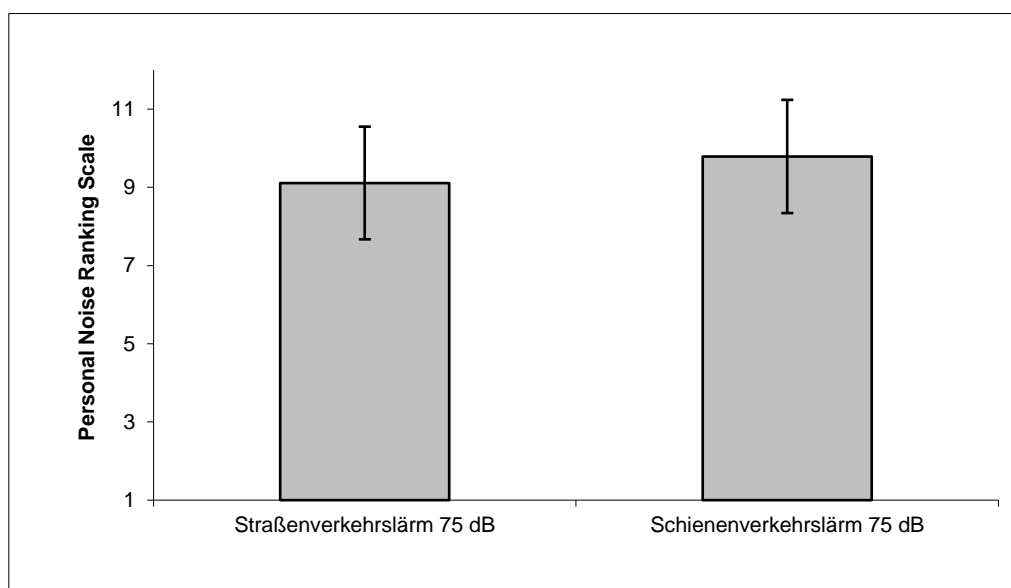


Abbildung 62: Unterschied zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei 75 dB $L_{A,eq}$

Die drei Paarvergleiche zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei 55 dB, 65 dB und 75 dB $L_{A,eq}$ zeigten statistisch hoch signifikante Unterschiede in der Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale.

Bei einem direktem Vergleich von Straßen- und Schienenverkehrslärm bei gleichem $L_{A,eq}$, wurde in diesem definierten Versuchsdesign Schienenverkehrslärm von den ProbandInnen als lästiger empfunden.

4.1.4 Handkraftbewertung der Lästigkeit

Auch für die Handkraftbewertungen der Lästigkeit der Geräusch-Samples wurde der Mittelwert über alle Bewertungen, über die Bewertungen der Straßenverkehrsgeräusche, der Schienenverkehrsgeräusche und des Rauschens gebildet.

Die mittlere relative Kraftbewertung der Lästigkeit über alle Geräusche weist einen Mittelwert von 0,56 und eine Standardabweichung von 0,19 auf. Ihr Minimum liegt bei 0,13, während der maximale mittlere Wert bei 1,00 liegt.

Die auf die Maximalkraft relativierte Handkraftbewertung der Lästigkeit der Straßenverkehrsgeräusche liegt im Mittel bei 0,54 ($s = 0,20$). Der kleinste Wert beträgt 0,10 und der Größte 1,01.

Bei den Schienenverkehrsgeräuschen liegt der Mittelwert der Kraftbewertung der Lästigkeit bei 0,57, bei einer Standardabweichung von 0,20. Das Minimum beträgt 0,14 und das Maximum 1,03.

Die Lästigkeit der Rauschen-Samples wurde von den UntersuchungsteilnehmerInnen im Mittel einer relativen Handkraft von 0,62 und einer Standardabweichung von 0,20 bewertet. Das Minimum dieser Variable liegt bei 0,07 und das Maximum bei einem Wert von 1,06.

Bei diesen Werten mag auffallend sein, dass die maximalen mittleren Werte bei 1,00 oder höher – also bei über 100% der Maximalkraft – liegen. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass die Maximalkraft am Ende des Experiments erhoben wurde und deshalb durch Müdigkeit bereits verringert war.

Abbildung 63 zeigt die Boxplots der mittleren relativen Kraftbewertung der Lästigkeit über alle Geräuschsamples, die Straßenverkehrsgeräusche, Schienenverkehrsgeräusche und das Rauschen. Auch hier werden – wie bei den Bewertungen auf der Personal Noise Ranking Scale - Unterschiede deutlich, die jedoch weniger stark ausgeprägt sind.

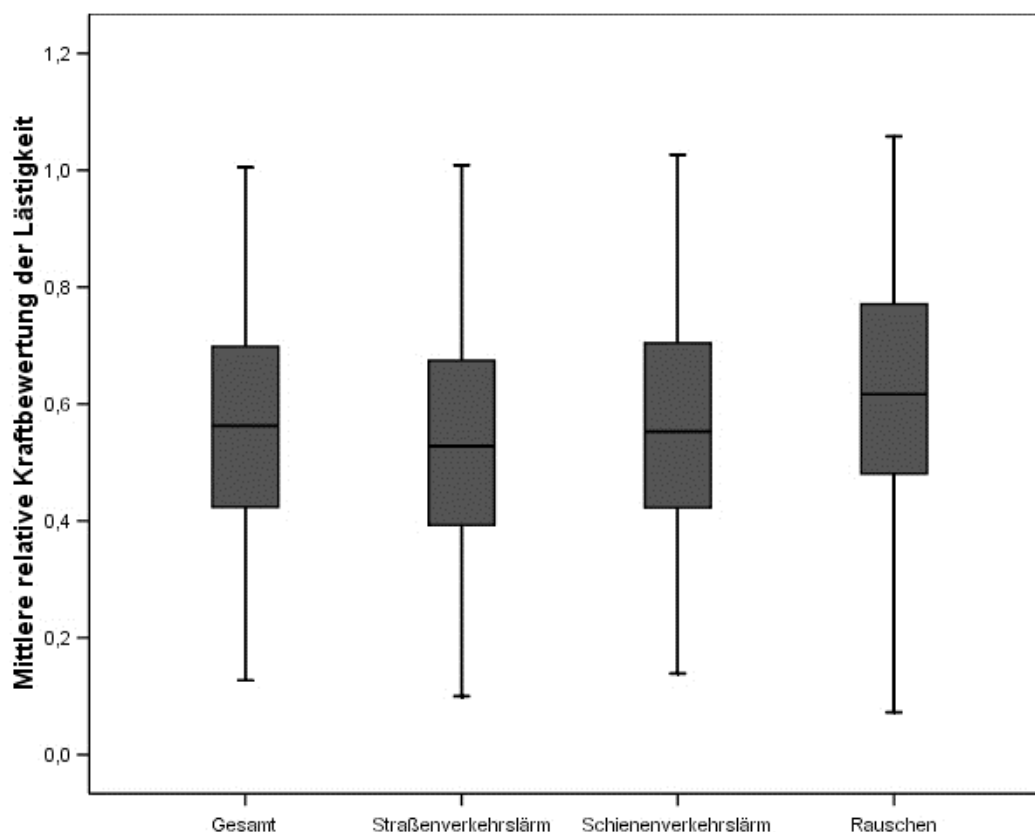


Abbildung 63: Boxplot der mittleren relativen Kraftbeurteilung der Lästigkeit über alle Bewertungen (Gesamt), die Bewertungen für Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen (Studienphase 3, N=171)

Vergleich Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen

Zum statistischen Vergleich der Handkraftbewertung der Lästigkeit von Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse berechnet. Es konnte ein statistisch signifikanter Gesamteffekt gezeigt werden ($F = 28,3$; $p < 0,001$). Weiters wurden Scheffe-Post-test durchgeführt, um diesen Gesamteffekt auf Einzelunterschiede zwischen den 3 Gruppen zu überprüfen. Sowohl der Unterschied in der Kraftbewertung von Straßen- und Schienenverkehrslärm, als auch der Unterschied zwischen Schienenverkehrslärm und Rauschen konnte hierbei statistisch signifikant nachgewiesen werden ($p < 0,001$ bzw. $p < 0,01$). Auch in diesem Fall ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten, dass die drei Geräuschgruppen im Mittel nicht den gleichen $L_{A,eq}$ aufweisen.

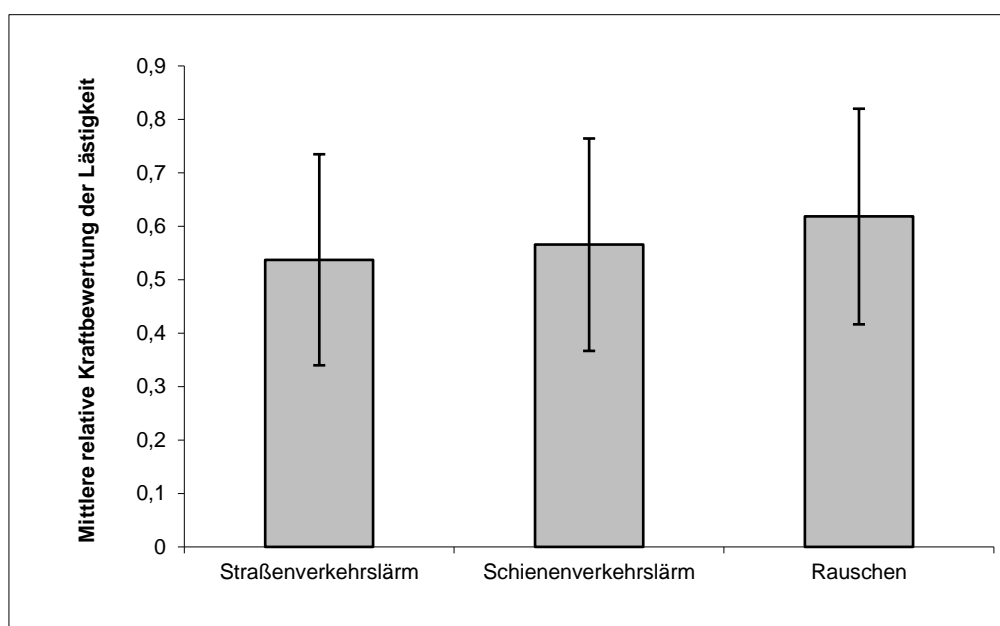


Abbildung 64: Mittlere relative Kraftbewertung der Lästigkeit von Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen (Studienphase 3, N=171)

Abbildung 64 zeigt die relativen Handkraftbewertungen der Lästigkeit von Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen. Wie schon zuvor bei den Lästigkeitsurteilen auf der Personal Noise Ranking Scale gezeigt werden konnte, wurde Straßenverkehrslärm von den ProbandInnen als deutlich weniger lästig eingestuft als Schienenverkehrslärm und dieser wurde wiederum weniger lästig wahrgenommen als das Rauschen.

Zusammenhang zwischen dem $L_{A,eq}$ und der Handkraftbewertung der Lästigkeit

Die Korrelation zwischen dem $L_{A,eq}$ der Geräuschsamples und der Handkraftbewertung der Lästigkeit beträgt 0,38 ($p < 0,001$). Dieser Zusammenhang variiert wiederum deutlich je nach Art der Geräuschsamples. Während der Korrelationskoeffizient bei Straßen- und Schienenverkehrsgeräuschen sehr ähnlich ist ($r = 0,31$, $p < 0,001$ bzw. $r = 0,35$, $p < 0,001$), ist der Zusammenhang zwischen dem $L_{A,eq}$ und der Kraftbewertung bei den Rauschen-Samples mit einem Wert von 0,54 ($p < 0,001$) deutlich höher.

Die Berechnung der linearen Regression über alle Geräusche ergab einen Zusammenhang von 0,14. Somit werden 14% der Varianz der Kraftbewertungen der Lästigkeit vom $L_{A,eq}$ der Geräusche erklärt. Dieser Wert liegt für Straßenverkehrsgeräusche bei 10%, für Schienenverkehrsgeräusche bei 12% und für das Rauschen bei 29%. Die Regression ist somit deutlich geringer ausgeprägt als bei den Lästigkeitsbewertungen auf der Personal Noise Ranking Scale, weicht jedoch statistisch signifikant vom Zufall ab ($p < 0,001$).

Paarvergleiche zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm

Zum direkten Vergleich der Straßen- und Schienenverkehrsgeräusche bei einem $L_{A,eq}$ von 55 dB, 65 dB und 75 dB wurden auch für die Handkraftbewertungen der Lästigkeit Paarvergleiche mittels t-Test berechnet. Um statistische Fehlentscheidungen aufgrund kumulierter Irrtumswahrscheinlichkeiten zu vermeiden, wurde das Alpha-Niveau auch für diese Prüfungen auf 1,67% herabgesetzt.

Paarvergleich zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei einem $L_{A,eq}$ von 55 dB

Bei einem $L_{A,eq}$ von 55 dB betrug die relative Kraftbewertung der Lästigkeit von Straßenverkehrsgeräuschen im Mittel 0,46 ($s = 0,23$). Beim Schienenverkehrslärm weist die Bewertung einen Mittelwert von 0,52 und eine Standardabweichung von 0,25 auf (siehe Abbildung 65).

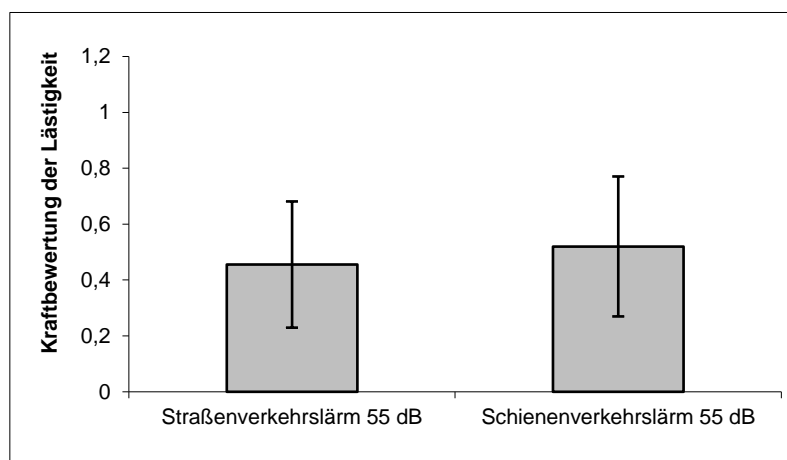


Abbildung 65: Unterschied zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei 55 dB $L_{A,eq}$

Es besteht ein signifikanter Unterschied in der Handkraftbewertung der Lästigkeit zwischen den beiden Verkehrslärmarten ($p < 0,001$). Schienenverkehrsgeräusche wurden bei einem $L_{A,eq}$ von 55 dB von den ProbandInnen deutlich lästiger eingestuft als Straßenverkehrsgeräusche.

Paarvergleich zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei einem $L_{A,eq}$ von 65 dB

Abbildung 66 zeigt Mittelwert und Standardabweichung der Kraftbewertung von Straßen- und Schienenverkehrslärm bei einem $L_{A,eq}$ von 65 dB. Während die Bewertung des Straßenverkehrslärms einen Mittelwert von 0,56 ($s = 0,24$) aufweist, wurde die Lästigkeit des Schienenverkehrslärms im Mittel mit einer relativen Handkraft von 0,63 ($s = 0,24$) bewertet.

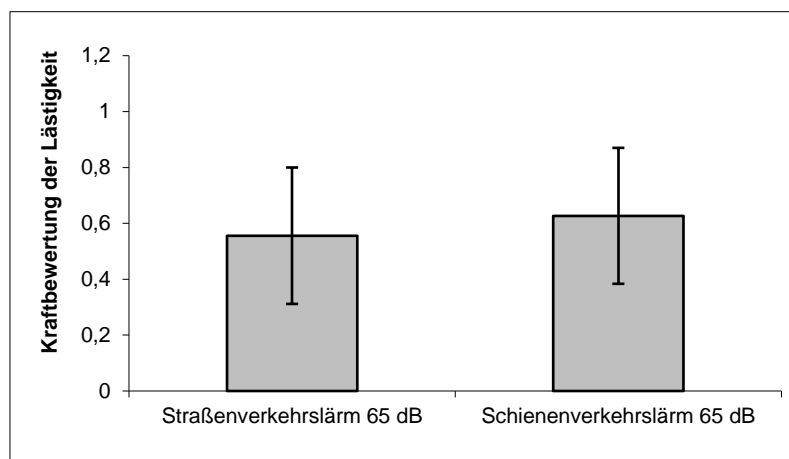


Abbildung 66: Unterschied zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei 65 dB $L_{A,eq}$

Auch bei einem $L_{A,eq}$ von 65 dB ist der Unterschied in der Lästigkeitsbewertung von Straßen- und Schienenverkehrslärm hoch signifikant ($p < 0,001$). Schienenverkehrslärm wurde wiederum lästiger bewertet als Straßenverkehrslärm.

Paarvergleich zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei einem $L_{A,eq}$ von 75 dB

Bei einem $L_{A,eq}$ von 75 dB zeigt die Bewertung von Straßenverkehrslärm einen Mittelwert von 0,70 und eine Standardabweichung von 0,25. Schienenverkehrslärm weist bei einer sehr ähnlich großen Standardabweichung ($s = 0,26$) einen deutlich höheren Mittelwert von 0,76 auf (siehe Abbildung 67).

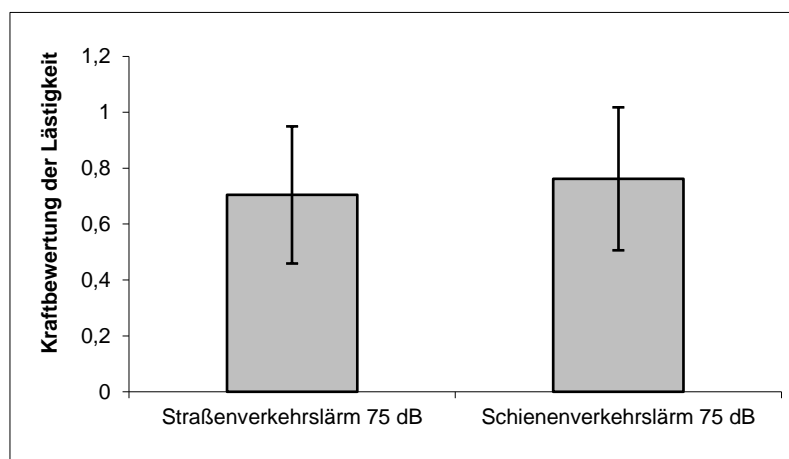


Abbildung 67: Unterschied zwischen Straßen- und Schienenverkehrslärm bei 75 dB $L_{A,eq}$

Auch dieser Unterschied kann als statistisch bedeutsam bezeichnet werden. Schienenverkehrslärm wurde also auch bei einem $L_{A,eq}$ von 75 dB als signifikant lästiger eingestuft als Straßenverkehrslärm ($p < 0,001$).

Aufgrund der eindeutigen Signifikanz der berechneten statistischen Prüfungen mittels t-Test kann davon ausgegangen werden, dass bei gleichem $L_{A,eq}$ ein Unterschied im Lästigkeitsempfinden zwischen

Straßen- und Schienenverkehrslärm besteht. Schienenverkehrslärm wird zumindest im Bereich zwischen 55 und 75 dB $L_{A,eq}$ als lästiger eingestuft als Straßenverkehrslärm.

4.1.5 Zusammenhang zwischen der PNRS und der Handkraftbewertung der Lästigkeit

Aufgrund der Tatsache, dass die Lästigkeitsbewertungen auf der Personal Noise Ranking Scale und der Kraftbewertung mittels Dynamometer identische statistische Ergebnisse liefern, kann davon ausgegangen werden, dass beide Bewertungsinstrumente gut geeignet sind um die durch Verkehrslärm erlebte Belästigung zu erfassen.

Obwohl jedoch mit beiden Bewertungsinstrumenten die erlebte Lästigkeit ausgelöst durch Verkehrslärm und Rauschen eingestuft werden sollte und die statistischen Analysen dieselben Ergebnisse lieferten, besteht zwischen den Skalen- und Handkraftbewertungen lediglich eine Korrelation 0,56. Dieser eher niedrige Zusammenhang kann darauf hindeuten, dass die beiden Bewertungsinstrumente unterschiedliche Aspekte der Lästigkeit von Geräuschquellen widerspiegeln. Eine weiterführende wissenschaftliche Untersuchung dieser Annahme erscheint daher sinnvoll.

4.1.6 Lärmempfindlichkeit

Anhand der Ergebnisse des Kurzfragebogens zur Lärmempfindlichkeit [Zimmer et al. 1998] wurden die ProbandInnen in die Gruppen der „niedrig“ und „hoch“ Lärmempfindlichen eingeteilt. Dabei wurden die Personen mit den 30% kleinsten Werten auf der Lärmempfindlichkeitsskala der Gruppe der „niedrig Lärmempfindlichen“ und die UntersuchungsteilnehmerInnen mit den 30% größten Werten der Gruppe der „hoch Lärmempfindlichen“ zugewiesen. Dieses Vorgehen entspricht vorangegangenen wissenschaftlichen Arbeiten zur Bedeutung der Lärmempfindlichkeit [Weinstein, 1978].

Um die Skalenbewertungen der Lästigkeit auf der Personal Noise Ranking Scale zwischen „niedrig“ und „hoch“ lärmempfindlichen Testpersonen statistisch zu vergleichen, wurden t-Tests berechnet. Verglichen wurden dabei die mittleren Skalenbewertungen der Lästigkeit über alle Bewertungen, die Bewertungen von Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen. Auch in diesem Fall wurde eine Bonferroni-Korrektur vorgenommen, um eine statistische Fehlentscheidung aufgrund kumulierter Irrtumswahrscheinlichkeiten zu vermeiden. Somit wurde die Irrtumswahrscheinlichkeit für diese vier statistischen Vergleiche mit $0,5/4 = 0,0125$ (1,25%) festgelegt.

Wie in Abbildung 68 zu sehen ist, stufen lärmempfindliche Testpersonen die Lästigkeit über alle Geräusche, die Straßenverkehrsgeräusche, Schienenverkehrsgeräusche und das Rauschen im Mittel höher ein als niedrig Lärmempfindliche. Diese Unterschiede wurden mittels t-Test statistisch geprüft.

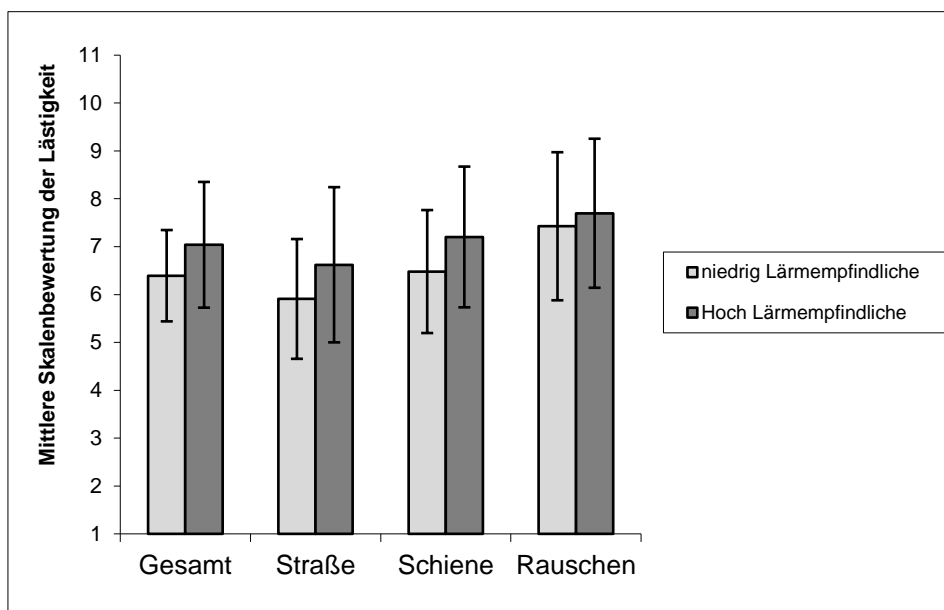


Abbildung 68: Mittlere Skalenbewertung der Lästigkeit bei niedrig und hoch lärmempfindlichen Testpersonen

Über alle Skalenbewertungen der Lästigkeit konnte ein signifikanter Unterschied zwischen niedrig ($\bar{x} = 6,4$) und hoch Lärmempfindlichen ($\bar{x} = 7,0$) festgestellt werden ($p = 0,007$).

Auch für den Schienenverkehrslärm konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen gezeigt werden (niedrig Lärmempfindliche: $\bar{x} = 6,5$; hoch Lärmempfindliche Testpersonen: $\bar{x} = 7,2$; $p = 0,013$).

Beim Straßenverkehrslärm unterscheiden sich niedrig lärmempfindliche Testpersonen ($\bar{x} = 5,9$) und hoch Lärmempfindliche Testpersonen ($\bar{x} = 6,4$) nicht signifikant in ihre Bewertung der Lästigkeit ($p = 0,018$).

Auch für die Bewertung der Rauschen-Samples konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen gezeigt werden (niedrig Lärmempfindliche Testpersonen: $\bar{x} = 7,4$; hoch Lärmempfindliche Testpersonen: $\bar{x} = 7,7$; $p = 0,396$).

Auch für die Kraftbewertung der Lästigkeit wurden statistische Vergleiche zwischen niedrig und hoch lärmempfindlichen Testpersonen durchgeführt. Es wurden wiederum t-Tests berechnet und das Signifikanzniveau wurde mit 0,0125 festgelegt.

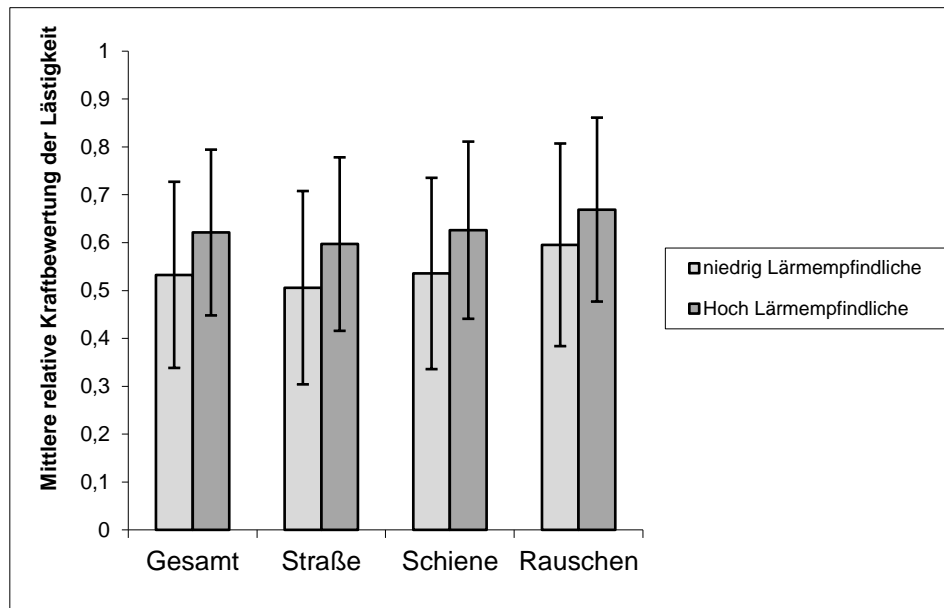


Abbildung 69: Mittlere relative Kraftbewertung der Lästigkeit bei niedrig und hoch lärmempfindlichen Testpersonen

Abbildung 69 zeigt die mittleren relativen Kraftbewertungen der Lästigkeit über alle Bewertungen, die Bewertungen von Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und das Rauschen. Während bei der grafischen Darstellung ein deutlicher Trend in Richtung höherer Kraftbewertung bei hoch lärmempfindlichen Testpersonen zu erkennen ist, wurde keine der statistischen Prüfungen bei einem korrigierten Alpha-Niveau von 0,0125 signifikant. Es besteht also kein statistisch signifikanter Unterschied in der Kraftbewertung der Lästigkeit zwischen hoch und niedrig lärmempfindlichen Testpersonen hinsichtlich der Bewertungen über alle Geräusche ($p = 0,021$), über die Straßenverkehrsgeräusche ($p = .023$), die Schienenverkehrsgeräusche ($p = 0,024$) und das Rauschen ($p = 0,079$).

Weiters war von Interesse, ob die Lärmempfindlichkeit die Vorhersagequalität des $L_{A,eq}$ der Geräusche auf die Lästigkeitsbewertung im linearen Regressionsmodell verbessern kann. Dazu wurde sowohl für die Skalenbewertungen, als auch für die Handkraftbewertungen der Lästigkeit eine weitere lineare Regression berechnet, in der die Lärmempfindlichkeit als zusätzliche Prädiktorvariable eingegeben wurde.

Der lineare Regressionskoeffizient zwischen dem $L_{A,eq}$ der Geräusche und den Bewertungen auf der Personal Noise Ranking Scale konnte durch Einschluss der Variable Lärmempfindlichkeit von 0,498 auf 0,507 erhöht werden. Dies bedeutet zwar nur eine Verbesserung der Varianzaufklärung um knapp 1%, kann jedoch als statistisch bedeutsamer Einfluss bezeichnet werden ($p < 0,001$).

Auch die Varianzaufklärung der Kraftbewertung der Lästigkeit durch den $L_{A,eq}$ der Geräusche konnte durch Einschluss der Lärmempfindlichkeit in dem linearen Regressionsmodell signifikant verbessert werden ($p = .00$). Der Regressionskoeffizient wurde dadurch wiederum nur leicht, von 0,142 auf 0,150 gesteigert.

Die Lärmempfindlichkeit hat somit einen statistisch bedeutsamen, jedoch sehr geringen Einfluss auf die Lästigkeitsbewertungen mittels der Personal Noise Ranking Scale und der Handkraftmethode.

Diskriminanzanalyse zur Vorhersage der Lärmempfindlichkeit

Ziel der Diskriminanzanalyse ist es, die Werte einer abhängigen (zu erklärenden) Variable durch die Werte einer oder mehrerer unabhängigen (erklärenden) Variablen zu erklären. Dabei sollen nicht nur Zusammenhänge zwischen den Variablen entdeckt, sondern auch unbekannte Werte der abhängigen Variablen anhand der Werte aus den erklärenden Variablen vorhergesagt werden. Insoweit stimmt das Ziel der Diskriminanzanalyse mit dem einer Regressionsanalyse überein. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Verfahren besteht in der Art der Werte der abhängigen Variablen. Während mit einer Regressionsanalyse nur abhängige Variablen mit Intervallskalenniveau untersucht werden können, versucht die Diskriminanzanalyse, eine Zuordnung von Fällen zu einer von mehreren alternativen Gruppen vorzunehmen. Die Werte der abhängigen Variablen geben also lediglich eine Gruppenzugehörigkeit an und besitzen damit Nominal- oder Ordinalskalenniveau.

In diesem Fall wurde eine Diskriminanzanalyse durchgeführt, um die Gruppierung in hoch und niedrig lärmempfindliche Personen durch andere Variablen vorhersagen zu können. Als Zielvariable für die Diskriminanzanalyse diente die Zuteilung der ProbandInnen in die Gruppen der hoch und niedrig lärmempfindlichen. Potentielle Merkmalsvariablen waren die mittleren Lästigkeitsurteile für Verkehrslärm und Rauschen auf der *Personal Noise Ranking Scale* und der Handkraftskala. Weiters wurden alle Fragen des „Lästigkeitsindex“ (außer die Frage „*Ich glaube, ich bin ziemlich geräuschempfindlich*“) als potentiell erklärende Variablen berücksichtigt.

Nach Ausschluss ungeeigneter Variablen wurden die mittlere relative Kraftbewertung der Lästigkeit von Verkehrsgeräuschen (Straßen- und Schienenverkehrslärm zusammengefasst) und die beiden Fragen des Lästigkeitsindex „*Ich fühle mich durch Verkehrslärm gestört beim Entspannen im Freien*“ und „*Ich finde, dass ich mich leicht an Lärm gewöhnen kann*“ in die Analyse einbezogen. Diese trennten signifikant zwischen den beiden Subpopulationen ($p < 0,001$). Die geschätzte Diskriminanzfunktion ist mit einem Eigenwert von 0,439 und einem Kanonischen Korrelationskoeffizienten von 0,552 hoch signifikant (Wilks' Lambda = .694; $p < 0,001$). Trotz des statistisch signifikanten Ergebnisses bedeutet dies, dass nur ca. 30% der Gesamtvarianz durch die Unterschiede zwischen den Gruppen erklärt werden.

Anhand dieser Diskriminanzfunktion konnten 75,5% der Fälle richtig klassifiziert werden. Da aufgrund zufälliger Zuordnung nur 50% richtige Klassifikationen erfolgt wären, kann durch die Diskriminanzfunktion mit den Variablen „*Mittlere relative Kraftbewertung von Verkehrsgeräuschen*“, „*Ich fühle mich durch Verkehrslärm gestört beim Entspannen im Freien*“ und „*Ich finde, dass ich mich leicht an Lärm gewöhnen kann*“ eine deutlich bessere Zuteilung zu den Gruppen der hoch und niedrig lärmempfindlichen Personen stattfinden.

4.1.7 Fragebogen „Lästigkeitsindex“

Der Fragebogen „Lästigkeitsindex“ wurde hinsichtlich zweierlei Aspekte ausgewertet. Einerseits sollte die deskriptive Auswertung jeder einzelnen Frage Aufschluss darüber geben, wie stark das ProbandInnenkollektiv dieser Studienphase Verkehrs- bzw. Umweltlärm ausgesetzt ist und wie sehr sie sich dadurch belästigt fühlen. Weiters wurden Korrelationen zwischen jeder einzelnen Frage und den mittleren Lästigkeitsbewertungen auf der *Personal Noise Ranking Scale* und mittels Handkraftdynamometer berechnet. Die Analyse dieser Zusammenhänge sollte Aufschluss darüber bringen, ob bestimmte,

vorbestehende persönliche Einstellungen gegenüber Lärm die Bewertungen beeinflussen. In der nachfolgenden Tabelle sind alle Ergebnisse der verschiedenen Fragen zusammengefasst.

Tabelle 9: Ergebnisse des Fragebogens „Lästigkeitsindex“ der Studienphase 3 (N=171)

Fragen „Lästigkeitsindex“	trifft nicht zu/nicht be- lästigt bzw. gestört [%]	trifft eher zu/mittelmä- ßig belästigt bzw. gestört [%]	trifft sehr zu/sehr be- lästigt bzw. gestört [%]
1) Wohnen Sie in der Nähe einer stark befahrenen Straße?	49	33	18
3) Fühlen Sie sich tagsüber durch Verkehrslärm belästigt?	63	34	3
4) Fühlen Sie sich nachts durch Verkehrslärm belästigt?	73	25	2
5a) Ich fühle mich durch Verkehrslärm gestört beim Entspannen in der Wohnung.	66	29	5
5b) Ich fühle mich durch Verkehrslärm gestört beim Entspannen im Freien.	29	56	15
5c) Ich fühle mich durch Verkehrslärm gestört beim Entspannen in der Wohnung.	86	11	3
5d) Ich fühle mich durch Verkehrslärm gestört beim Entspannen im Freien.	48	42	10
5e) Ich fühle mich durch Verkehrslärm gestört beim Arbeiten, Lesen und Konzentrieren.	47	38	15
5f) Ich fühle mich durch Verkehrslärm gestört beim Radiohören, Fernsehen.	75	21	4
5g) Ich fühle mich durch Verkehrslärm gestört beim Schlafen.	59	31	10
6) Fühlen Sie sich durch Nachbarschaftslärm belästigt?	52	42	6
7) Ich glaube, ich kann mich gut gegen Lärm schützen.	22	62	16
8) Ich glaube, ich bin ziemlich geräuschempfindlich.	41	49	10
9) Bewohner von lärmbelasteten Gebieten werden eher krank.	5	72	23
10) Ich finde, dass ich mich leicht an Lärm gewöhnen kann.	9	60	31

Die Frage „Wohnen Sie in der Nähe einer stark befahrenen Straße.“ wurde von 49% der UntersuchungsteilnehmerInnen mit „trifft nicht zu“ beantwortet, 33% antworteten mit „trifft eher zu“ und 18% mit „trifft sehr zu“. Die Berechnung der Korrelation zwischen dieser Frage und den mittleren Lästigkeitsbewertungen zeigte keinerlei statistisch signifikanten Zusammenhänge ($p > 0,05$). Es besteht somit

scheinbar kein Zusammenhang zwischen der subjektiv wahrgenommenen Verkehrsbelastung im eigenen Wohngebiet und dem Lästigkeitserleben ausgelöst durch Verkehrsgerausche und Rauschen in der Laborsituation.

Auf die Frage „*Welche Räume in ihrer Wohnung liegen zur Straße hin?*“ nannte eine Vielzahl der ProbandInnen das Wohn- und das Schlafzimmer. Auch Küche und Arbeitszimmer scheinen relativ häufig zur Straße hin ausgerichtet zu sein. Abbildung 70 zeigt die Anzahl der Nennungen pro Raum.

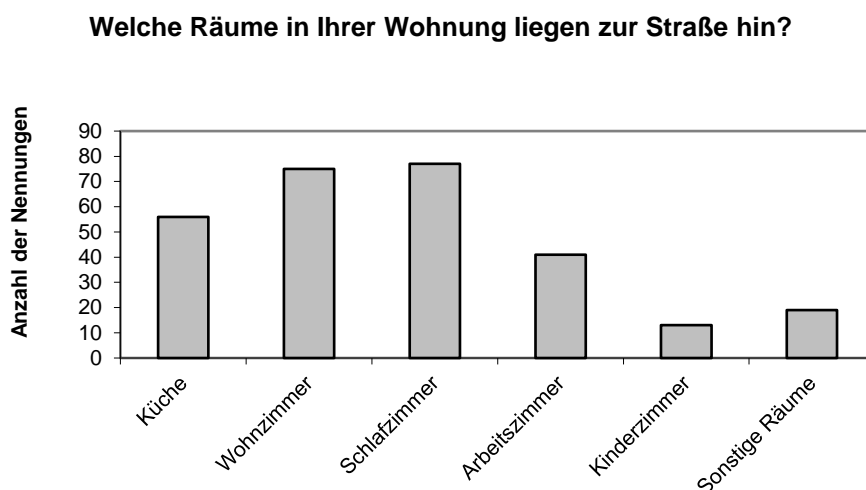


Abbildung 70: Fragebogen Lästigkeitsindex: Welche Räume in ihrer Wohnung liegen zur Straße hin?

Bei der Frage „*Fühlen Sie sich tagsüber durch Verkehrslärm belästigt?*“ gab ein Großteil der UntersuchungsteilnehmerInnen (63%) an, sich nicht belästigt zu fühlen, 34% fühlen sich mittelmäßig belästigt und nur 3% fühle sich tagsüber durch Verkehrslärm sehr belästigt. Die Korrelationsanalysen zeigten wiederum keinerlei signifikante Zusammenhänge ($p > 0,05$). Weiters gaben 73% der ProbandInnen an, sich nachts durch Verkehrslärm nicht belästigt zu fühlen, 25% fühlen sich mittelmäßig und nur 2% sehr belästigt. Es besteht auch hier kein signifikanter Zusammenhang zwischen den Lästigkeitsbeurteilungen im Experiment und der nächtlichen Belastung durch Verkehrslärm.

Das Statement „*Ich fühle mich durch Verkehrslärm gestört beim Entspannen in der Wohnung.*“ beantworteten 66% der UntersuchungsteilnehmerInnen mit „nicht gestört“, 29% fühlen sich mittelmäßig gestört und 5% sehr gestört. Auch in diesem Fall bestehen keine korrelativen Zusammenhänge zwischen der Beantwortung der Frage und den Lästigkeitsbewertungen im Experiment.

Andere Ergebnisse zeigen sich bei den Antworten auf die Frage „*Ich fühle mich durch Verkehrslärm gestört beim Entspannen im Freien.*“. Während sich nur 29% der Personen nicht gestört fühlen, geben 56% an sich mittelmäßig und 15% sehr gestört zu fühlen. Auch hier zeigte die Korrelationsanalyse keine statistisch signifikanten Zusammenhänge.

Beim Unterhalten in der Wohnung fühlt sich ein Großteil der ProbandInnen (86%) nicht durch Verkehrslärm gestört. 11% geben an sich mittelmäßig gestört zu fühlen und nur 3% fühlen sich sehr gestört. Beim Statement „*Ich fühle mich durch Verkehrslärm gestört beim Unterhalten im Freien.*“ gaben 48% der Befragten an, sich nicht gestört zu fühlen, 42% fühlen sich mittelmäßig gestört und 10% sehr gestört. Die Analyse beider Zusammenhänge zwischen den Lästigkeitsbewertungen und der Beantwortung dieser Frage brachte keine statistisch signifikanten Ergebnisse.

47% der ProbandInnen geben an, sich durch Verkehrslärm beim Arbeiten, Lesen und Konzentrieren nicht gestört zu fühlen, 38% fühlen sich mittelmäßig gestört und 15% fühlen sich sehr gestört. Nur sehr wenige Personen (4%) fühlen sich durch Verkehrslärm gestört beim Radiohören und Fernsehen. 21% geben an, sich mittelmäßig gestört zu fühlen und 75% fühlen sich nicht gestört. Auch in diesem Fall bestehen keine korrelativen Zusammenhänge zwischen der Beantwortung dieses Statements und den Lästigkeitsbewertungen im Experiment.

Bei der Frage „*Ich fühle mich durch Verkehrslärm gestört beim Schlafen.*“ zeigen sich folgende Ergebnisse. 59% der UntersuchungsteilnehmerInnen gaben an, sich nicht gestört zu fühlen, 31% fühlen sich mittelmäßig gestört und 9% sehr gestört. Es besteht eine signifikante Korrelation von 0,18 zur mittleren Lästigkeitsbewertung auf der PNRS ($p = 0,03$). Je mehr sich die Personen durch Verkehrslärm beim Schlafen gestört fühlen, desto lästiger wurden die Verkehrsgeräusche auf der PNRS eingestuft.

Beim Thema Nachbarschaftslärm fühlen sich 52% der Befragten durch diese Lärmart nicht belästigt. Während immerhin 42% angeben, sich mittelmäßig belästigt zu fühlen, fühlen sich 6% der Personen sehr belästigt. Die Frage „*Ich glaube, ich kann mich gut gegen Lärm schützen.*“ beantworteten 22% der Befragten mit „trifft nicht zu“, 62% antworteten mit „trifft eher zu“ und 16% mit „trifft sehr zu“. Auch hier konnten keine statistisch bedeutsamen Korrelationen festgestellt werden.

41% der TeilnehmerInnen in dieser Studie gaben an, nicht besonders geräuschempfindlich zu sein. 49% beantworteten die Frage „*Ich glaube, ich bin ziemlich geräuschempfindlich.*“ mit „trifft eher zu“ und 10% mit „trifft sehr zu“. In diesem Fall ergaben sich interessante Korrelationen zu den Lästigkeitsbewertungen im Experiment. Es besteht ein Zusammenhang von 0,18 zu den mittleren Lästigkeitsbewertungen über alle Geräusche, von 0,15 zu den Lästigkeitsbewertungen von Schienenverkehrslärm und 0,19 zu den Handkraftbewertungen der Lästigkeit von Rauschen. Da es sich bei dieser Frage um die subjektiv eingeschätzte Lärmempfindlichkeit der Personen handelt und hierzu auch ein vollständiger Lärmempfindlichkeitsfragebogen vorgegeben wurde, ist der Zusammenhang zwischen diesen beiden Erhebungsmethoden von Interesse. Dadurch könnte die Frage geklärt werden, ob ein einziges Item die Lärmempfindlichkeit der Personen ebenso gut aufzeigen kann wie die längere Lärmempfindlichkeitsskala. Der Zusammenhang zwischen der Frage „*Ich glaube, ich bin ziemlich geräuschempfindlich.*“ und des Gesamtscores auf der Lärmempfindlichkeitsskala beträgt 0,46. Dieser Zusammenhang weicht zwar hoch signifikant vom Zufall ab, ist jedoch inhaltlich gesehen eher gering, da mit beiden Verfahren dasselbe Konstrukt gemessen werden soll. Da die Lärmempfindlichkeitsskala auch höhere Korrelationen zu den Lästigkeitsbewertungen im Experiment zeigte ist davon auszugehen, dass diese besser im Stande ist die Lärmempfindlichkeit zu messen und zwischen hoch und niedrig lärmempfindlichen Personen zu unterscheiden.

23% der Befragten beantworteten das Statement „*Bewohner von lärmbelasteten Gebieten werden eher krank.*“ mit „trifft sehr zu“, 72% mit „trifft eher zu“ und nur 5% mit „trifft nicht zu“. Auffällig ist bei

dieser Frage, dass keine bedeutsamen Korrelationen zu den Bewertungen auf der Personal Noise Ranking Scale, jedoch relativ hohe Korrelationen zu den Kraftbewertungen der Lästigkeit bestehen. So besteht zur mittleren Kraftbewertung der Lästigkeit über alle Geräusche, über die Straßenverkehrsgeräusche und über die Schienenverkehrsgeräusche eine Korrelation von 0,26 ($p < 0,01$). Auch zur mittleren Kraftbewertung von Rauschen konnte ein signifikanter Zusammenhang von 0,20 gefunden werden ($p < 0,01$).

Die Frage „*Ich finde, dass ich mich leicht an Lärm gewöhnen kann.*“ beantworteten 31% der Befragten mit „trifft sehr zu“ und 60% mit „trifft eher zu“. Nur 9% der UntersuchungsteilnehmerInnen können dieser Aussage vollständig zustimmen. Es ergaben sich eine signifikant negative Korrelation zu den Lästigkeitsbewertungen im psychoakustischen Experiment. Die Frage „*Ich finde, dass ich mich leicht an Lärm gewöhnen kann.*“ korreliert zu -0,22 ($p < 0,01$) mit der mittleren Lästigkeitsbewertung über alle Geräusche, zu -0,23 ($p < 0,01$) mit der mittleren Lästigkeitsbewertung von Straßenverkehrslärm und zu -0,18 ($p < 0,05$) mit der mittleren Lästigkeitsbewertung von Schienenverkehrslärm. Weiters bestehen signifikant negative Zusammenhänge zur mittleren relativen Kraftbewertung über alle Geräusche ($r = -0,16$; $p < 0,05$) und über die Straßenverkehrsgeräusche ($r = -0,18$; $p < 0,05$). Diese negativen Zusammenhänge sind so zu interpretieren, dass je stärker die UntersuchungsteilnehmerInnen dem Statement „*Ich finde, dass ich mich leicht an Lärm gewöhnen kann.*“ zustimmen konnten, desto weniger lästig stuften sie die Geräusche im Experiment ein. Somit hat anscheinend die subjektiv wahrgenommene Adaptationsfähigkeit gegenüber Lärm einen Einfluss auf das persönliche Lästigkeitsempfinden.

Zusammenfassend kann durch das Antwortschema des Fragebogens „Lästigkeitsindex“ die Schlussfolgerung gezogen werden, dass es sich bei dem ProbandInnenkollektiv dieser Studie um Personen handelt, die sich im Alltagsleben eher wenig durch Lärm beeinträchtigt fühlen. Ein Großteil der Befragten gab an, nicht in der Nähe einer stark befahrenen Straße zu leben und sich zu unterschiedlichen Tageszeiten und bei unterschiedlichen Tätigkeiten nicht besonders stark durch Lärm gestört zu fühlen. Während nahezu 80% der Befragten glauben, sich sehr gut oder eher gut gegen Lärm schützen zu können, gibt ein Großteil der Befragten an überhaupt nicht oder nicht besonders stark lärmempfindlich zu sein. Da über 70% der Befragten auf das Statement „*Bewohner von lärmbelasteten Gebieten werden eher krank.*“ mit „trifft eher zu“ antworteten, kann davon ausgegangen werden, dass zum Thema „gesundheitliche Risiken von Lärmbelastung“ in der Bevölkerung wenig gesichertes Wissen vorhanden ist. Die hohen Korrelationen der subjektiven Adaptationsfähigkeit gegenüber Lärm mit den Lästigkeitsbewertungen lassen einen interessanten Zusammenhang vermuten; dies erfordert eine weiterführende wissenschaftliche Abklärung.

4.1.8 Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen

Der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen (MDBF) wurde den ProbandInnen in dieser Untersuchung kurz vor und kurz nach der Beschallung mit den Geräusch-Samples zur Bearbeitung vorgelegt. Dies erlaubt eine Aussage über die Veränderung der Befindlichkeit der UntersuchungsteilnehmerInnen auf den drei Dimensionen „Gute-Schlechte Stimmung“, „Wachheit-Müdigkeit“ und „Ruhe-Unruhe“. Der Unterschied zwischen den Skalenwerten vor bzw. nach der Durchführung der Lästigkeitsbeurteilung wurde mittels t-Test für abhängige Messungen auf statistische Signifikanz überprüft. Da insgesamt drei statistische Prüfungen durchgeführt wurden (eine für jede der drei Befindlichkeitsdimensionen)

wurde eine Bonferroni-Korrektur eingesetzt, sodass die Irrtumswahrscheinlichkeit bei $0,05/3 = 0,017$ festgelegt wurde.

Ein hoher Skalenwert auf der Dimension Gute-Schlechte Stimmung deutet auf eine positive Stimmungslage hin. Die Person fühlt sich wohl, ist froh und zufrieden. Niedrige Werte bedeuten Missbefinden. Der Proband/die Probandin fühlt sich unwohl und schlecht, ist missgestimmt, trübsinnig und unzufrieden.

Vor der Durchführung der Lästigkeitsbewertungen im Experiment erzielten die UntersuchungsteilnehmerInnen im Mittel einen Wert von 34,4 ($s = 4,6$) und danach im Mittel den Skalenwert 33,0 ($s = 5,1$; siehe Abbildung 71). Die Verschiebung dieses Wertes in Richtung schlechte Stimmung kann als statistisch signifikant bezeichnet werden ($p < 0,001$). Die ProbandInnen fühlten sich nach der Lästigkeitsbewertung der Geräuschsamples also schlechter und missgestimmter als zuvor.

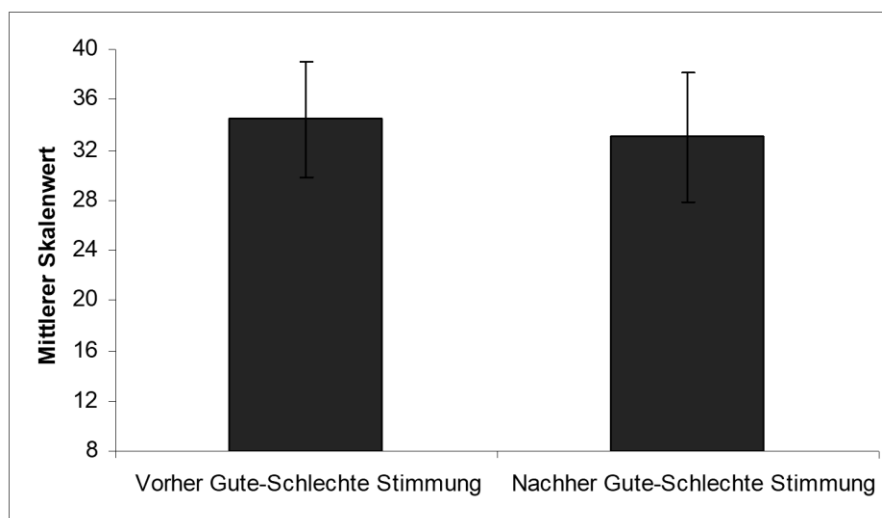


Abbildung 71: Unterschied in der Befindlichkeitsdimension Gute-Schlechte Stimmung vor und nach der Beschallung mit Verkehrsgeräuschen

Hohe Werte auf der Skala Wachheit-Müdigkeit resultieren bei wachen und ausgeruhten Personen. Sie fühlen sich frisch und munter. Im Gegensatz dazu fühlen sich Personen mit niedrigen Werten eher müde, schläfrig und schlapp.

Vor Beschallung mit den Geräuschsamples hatte die Untersuchungstichprobe im Mittel einen deutlich höheren Wert ($\bar{x} = 28,5$; $s = 6,9$) auf der Befindlichkeitsdimension Wachheit-Müdigkeit als danach ($\bar{x} = 24,6$; $s = 7,3$; siehe Abbildung 72). Der Unterschied zwischen den zwei Messzeitpunkten ist statistisch signifikant ($p < 0,001$). Somit fühlten sich die ProbandInnen nach Durchführung der Lästigkeitsbeurteilung deutlich müder und schlapper als davor.

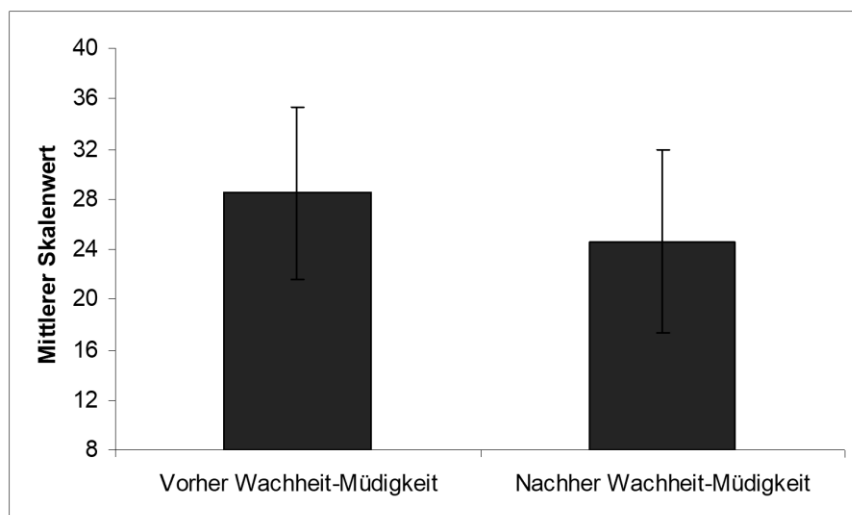


Abbildung 72: Unterschied in der Befindlichkeitsdimension Wachheit-Müdigkeit vor und nach der Beschallung mit Verkehrsgeräuschen

Ruhe-Unruhe: Hier deutet ein hoher Skalenwert darauf hin, dass sich der Proband/die Probandin zurzeit eher innerlich ruhig und gelassen fühlt. Einen niedrigen Skalenwert erzielen angespannte, nervöse und innerlich unruhige ProbandInnen. Auch auf der Befindlichkeitsdimension Ruhe-Unruhe zeigte sich im Mittel ein etwas höherer Wert vor der Beschallung mit den Geräuschen als danach (vor: $\bar{x} = 31,2$, $s = 6,0$; danach: $\bar{x} = 30,4$, $s = 6,6$; siehe Abbildung 73). Dieser Unterschied ist jedoch nicht statistisch bedeutsam ($p = 0,12$).

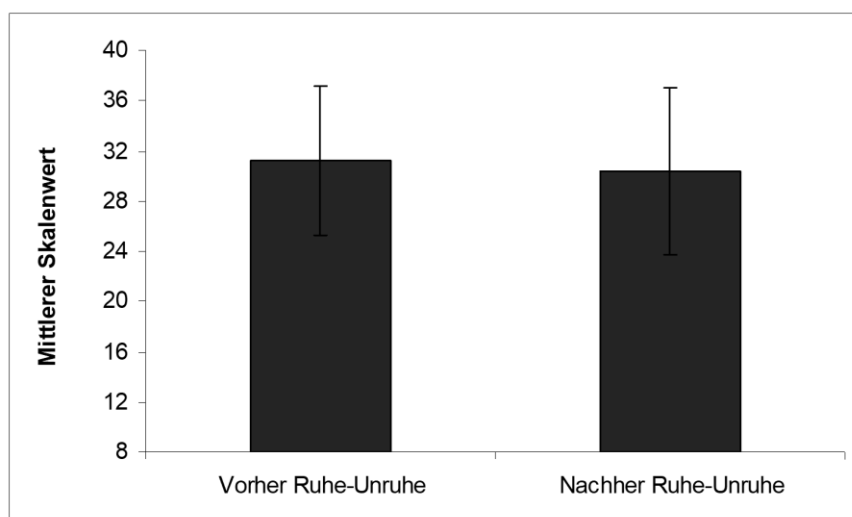


Abbildung 73: Unterschied in der Befindlichkeitsdimension Ruhe-Unruhe vor und nach der Beschallung mit Verkehrsgeräuschen

Der Vergleich der drei Skalen des Mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragebogens kurz vor und kurz nach der Beschallung mit Verkehrsgeräuschen und Rauschen zeigte statistisch bedeutsame Veränderungen auf zwei Dimensionen der Befindlichkeit. Die Stimmung der ProbandInnen war nach dem Experiment deutlich schlechter als zuvor. Sie fühlten sich eindeutig missgestimmter, trübsinniger und

unzufriedener als zuvor. Weiters fühlten sich die Personen nach dem Experiment deutlich müder, schlapper und schläfriger als zuvor.

Während die Veränderung der beiden Befindlichkeitsdimensionen Gute-Schlechte Stimmung und Wachheit-Müdigkeit statistisch gesehen eindeutig ist, kann keine eindeutige Aussage über die Kausalität dieser Veränderungen getroffen werden. Die Verschlechterung dieser beiden Stimmungsdimensionen könnte aufgrund der Beschallung mit den Geräuschen oder einfach durch die Dauer des Experiments verursacht worden sein.

4.1.9 Audiometrie

In der Reintonaudiometrie wurde die individuelle subjektive Hörschwelle der ProbandInnen bestimmt. Normalhörigkeit galt als Aufnahmekriterium für alle ProbandInnen. Das Einschlusskriterium waren ein gemittelter Hörverlust an den Frequenzen 0,5, 1, 2, und 4 kHz, ≤ 20 dB, bei gleichzeitig nicht bestehendem Hörverlust ≥ 30 dB an den einzelnen Frequenzen. Als Messort diente ein schalldichter Raum, der auch für alle weiteren audiometrischen Messungen verwendet wurde.

Der mittlere Hörverlust an beiden Ohren von allen ProbandInnen betrug 11 dB HL [Min 3,75 – Max 43,75]. Gemäß unseren Einschlusskriterien konnten aber nur 180 von 200 ProbandInnen in die Studie aufgenommen werden. Deren Hörverlust gemittelt an beiden Ohren betrug 9,97 dB [Min 3,75 – Max 18,75].

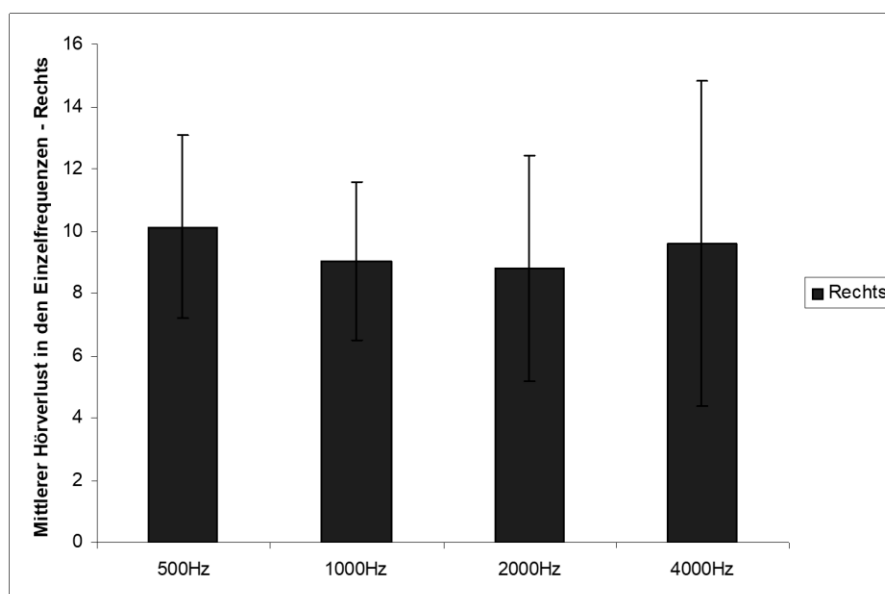


Abbildung 74: Rechtes Ohr: mittlerer HV bei 500, 1000, 2000 und 4000 Hz

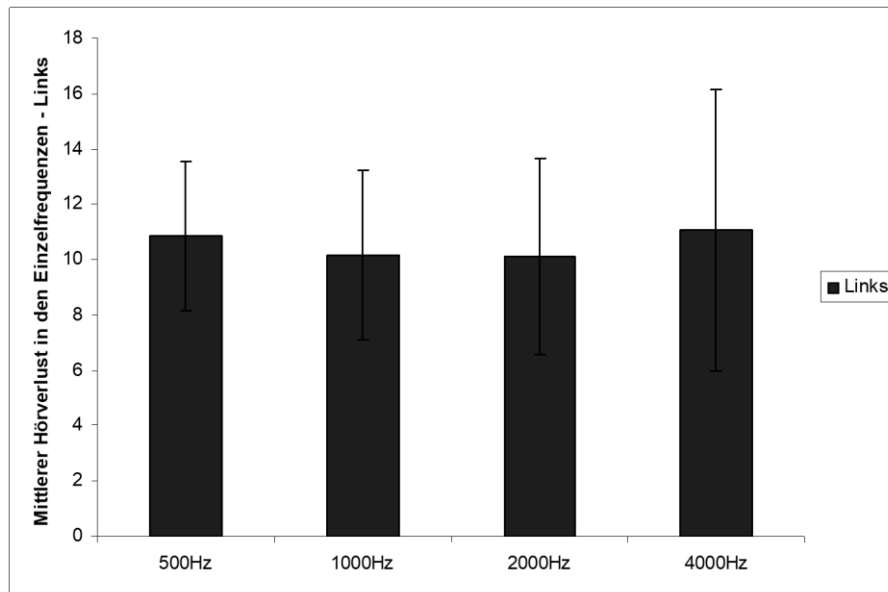


Abbildung 75: Linkes Ohr: mittlerer HV bei 500, 1000, 2000 und 4000 Hz

4.1.10 Reproduzierbarkeit der Lästigkeitsurteile

Um die Reproduzierbarkeit der Lästigkeitsurteile zu überprüfen und somit ein Maß für die Reliabilität der Urteile angeben zu können, wurden insgesamt 5 der Geräusch-Samples innerhalb des Experiments doppelt vorgegeben. Aus den Mittelwerten der Beurteilungen dieser Geräusche kann gefolgert werden, dass die ProbandInnen konsistente Urteile lieferten. So wurde zum Beispiel das Sample „PZ_A“ bei der ersten Vorgabe mit einem mittleren Wert auf der Personal Noise Ranking Scale“ von 4,5 und bei der wiederholten Vorgabe im Mittel mit 4,3 beurteilt. Dasselbe Geräusch wurde mit einer mittleren relativen Handkraft von 0,44 bzw. 0,46 eingestuft. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich auch bei den anderen Reproduzierbarkeitssamples. Somit kann zumindest von einer kurzfristig hohen Reliabilität der Lästigkeitsurteile ausgegangen werden.

4.2 Ergebnisse Studienphase 1 der subjektiven Hörversuche

In der Studienphase 1 wurden nur Teilaspekte des Hörversuchsablaufes aus der Phase 3 (siehe auch Abbildung 23) umgesetzt. Dazu gehörten der Fragenbogen „Lästigkeitsindex“, die audiometrische Analyse der ProbandInnen und die Bewertung der Lästigkeit mittels PNRS. Die Ergebnisse dazu sind in der nachfolgenden Tabelle und Abbildung dargestellt und beschrieben. Aus den Ergebnissen dieser Bewertungen wurden für jedes definierte Ensemble, wie in nachfolgender Tabelle als Einordnung ersichtlich, deskriptive Statistiken berechnet und in die Modellbildung integriert. Bei den Ensembles, welche pro Probanden mehrfach zu bewerten waren, wurde der jeweilige Mittelwert des Probanden herangezogen.

Tabelle 10: Detaillierte Ergebnisse der Lästigkeitsbewertung mittels PNRS aller 29 Soundsamples der Studienphase 1 (N = 135)

Soundsample	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Minimum	Maximum
9 PKW (130 km/h) 2 LKW (60 km/h) Beton Nass	9,63	10,00	1,149	6	11
9 PKW (130 km/h) 2 LKW (90 km/h) SMA Nass Re	9,18	9,00	1,616	5	11
9 PKW (130 km/h) 2 LKW (90 km/h) SMA Nass Re	8,73	9,00	1,901	5	11
9 PKW (130 km/h) 2 LKW (90 km/h) Beton Trocken	8,59	9,00	1,999	3	11
9 PKW (100 km/h) 2 LKW (60 km/h) Beton Trocken	7,94	8,00	1,973	3	11
5 PKW (100 km/h) 1 LKW (60 km/h) Beton Nass	7,24	8,00	2,241	3	11
9 PKW (100 km/h) 2 LKW (60 km/h) SMA Nass	7,98	8,00	2,097	2	11
9 PKW (130 km/h) 2 LKW (90 km/h) Asphaltbeton Trocken	7,06	7,00	1,983	3	10
5 PKW (130 km/h) 1 LKW (90 km/h) Beton Nass	7,27	7,00	1,835	3	10
9 PKW (100 km/h) 2 LKW (60 km/h) Asphaltbeton Trocken	7,06	7,00	1,983	3	10
9 PKW (130 km/h) 2 LKW (90 km/h) SMA Trocken	7,39	7,00	1,924	3	11
5 PKW (130 km/h) 1 LKW (90 km/h) SMA Nass	7,27	7,00	1,955	3	10
9 PKW (100 km/h) 2 LKW (60 km/h) SMA Trocken	6,20	7,00	1,947	3	11
5 PKW (130 km/h) 1 LKW (90 km/h) SMA Trocken Re	5,41	5,00	1,978	2	9
5 PKW (130 km/h) 1 LKW (90 km/h) Asphaltbeton Trocken Re	5,67	6,00	1,737	3	9
5 PKW (130 km/h) 1 LKW (90 km/h) Asphaltbeton Trocken Re	5,98	6,00	2,106	2	11

5 PKW (130 km/h) 1 LKW (90 km/h) Beton Trocken Re	6,69	7,00	1,981	2	10
5 PKW (130 km/h) 1 LKW (90 km/h) Beton Trocken Re	6,65	7,00	1,888	3	11
5 PKW (100 km/h) 1 LKW (60 km/h) SMA Nass	5,10	5,00	1,992	2	9
5 PKW (130 km/h) 1 LKW (90 km/h) SMA Trocken Re	5,29	5,00	1,979	2	9
5 PKW (80 km/h) 1 LKW (60 km/h) SMA Nass	5,92	6,00	1,801	3	9
5 PKW (100 km/h) 1 LKW (60 km/h) Beton Trocken	5,35	6,00	1,575	2	8
5 PKW (100 km/h) 1 LKW (60 km/h) Asphaltbeton Trocken	5,10	5,00	1,992	2	9
5 PKW (80 km/h) 1 LKW (60 km/h) Asphaltbeton Trocken Re	3,96	4,00	1,457	2	7
5 PKW (80 km/h) 1 LKW (60 km/h) Asphaltbeton Trocken Re	4,63	5,00	1,550	2	8
5 PKW (100 km/h) 1 LKW (60 km/h) SMA Trocken	3,41	3,00	1,731	1	7
5 PKW (80 km/h) 1 LKW (60 km/h) SMA Trocken	3,35	3,00	1,575	1	7
5 PKW (130 km/h) 1 LKW (90 km/h) SMA – LSW Trocken	2,45	2,00	1,022	1	5
5 PKW (100 km/h) 1 LKW (60 km/h) SMA – LSW Trocken	2,41	2,00	1,171	1	5

In der nachfolgenden Abbildung sind alle Lästigkeitsurteile der Fahrzeugensembles anhand von Boxplots grafisch dargestellt. Aus den subjektiven Lästigkeitsurteilen für die verschiedenen Fahrzeugensembles ist zu erkennen, dass der Begriff „Lästigkeit“ von den Probanden verstanden wurde und diese sich sehr gut reproduzieren konnten. Fast alle Probanden haben das Versuchsdesign verstanden und bewerteten die Fahrzeugensembles in Anhängigkeit der Fahrbahndecken, Geschwindigkeitsprofile, Verkehrsbelastungen und Lärmschutteinrichtung in unterschiedlichen Dimensionen.

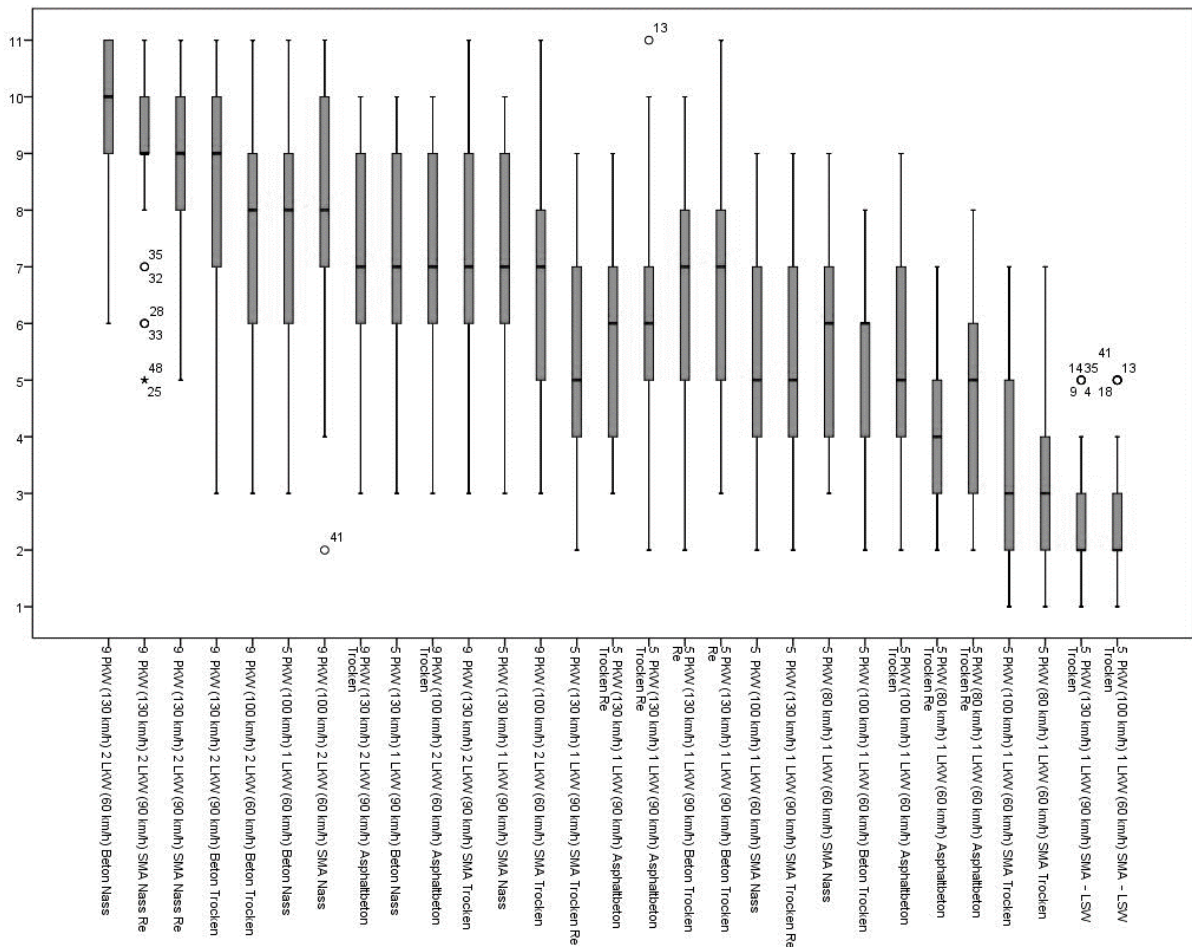


Abbildung 76: Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf alle 29 definierten Soundsamples der Studienphase 1 mit N=135

In einem nächsten Schritt wurden die Ergebnisse in zentrierter Form d.h. für jeden Probanden wurde aus allen Ergebnissen der fünf Bewertungsgruppen der Mittelwert gebildet. Dieser Wert wurde auf den Mittelwert der Lästigkeitsskala (in diesem Fall 6) zentriert und die einzelnen Lästigkeitsurteile wurden auf diesen Mittelwert angepasst. Dies ist damit zu begründen, dass die Probanden ihre Bewertung in unterschiedlichen Teilen der Skala abgaben (wenig lästig im Bereich 2 bis 6, sehr lästig 7 bis 11), jedoch das Intervall zwischen den unterschiedlichen Ensembles dadurch nicht beeinflusst wird.

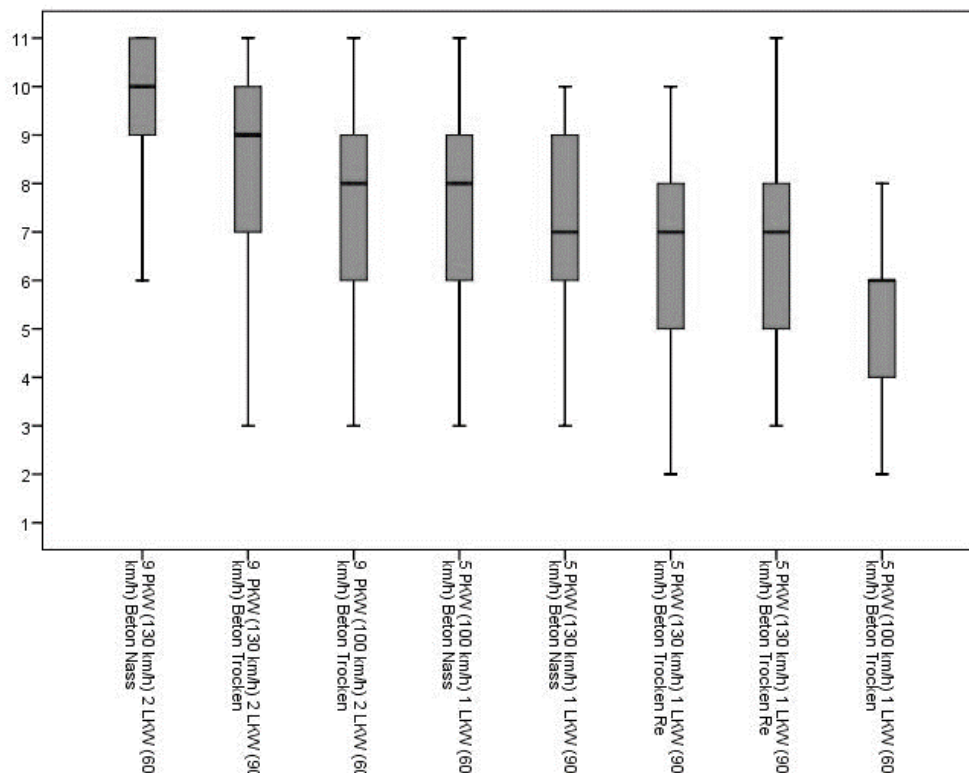


Abbildung 77: Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf die definierten Soundsamples mit dem Fahrbahnbelag Beton der Studienphase 1 mit N=135

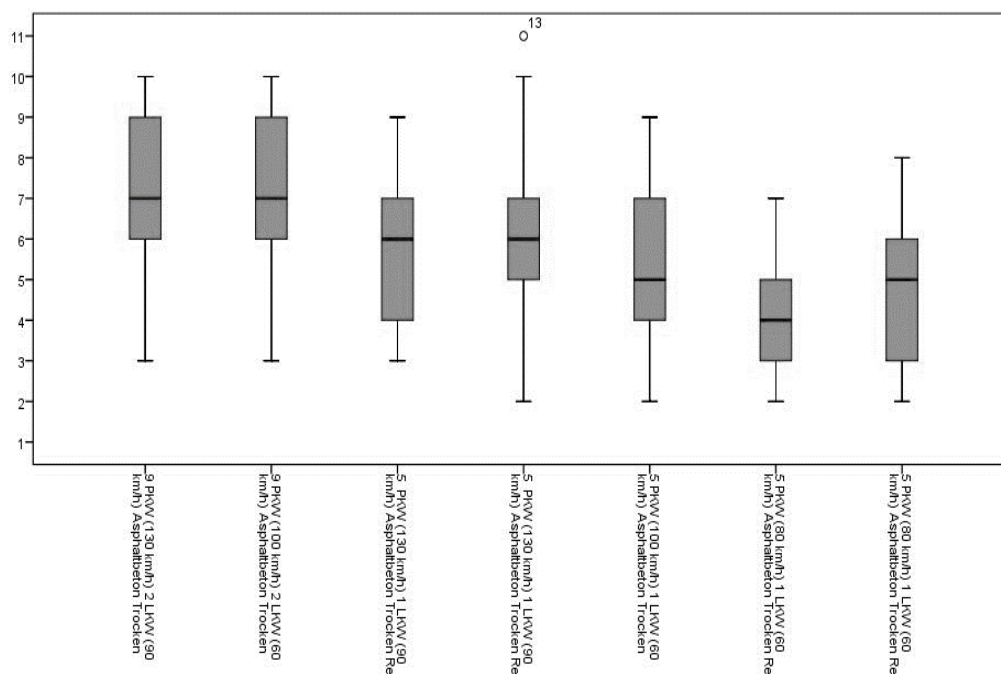


Abbildung 78: Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf die definierten Soundsamples mit dem Fahrbahnbelag Asphaltbeton der Studienphase 1 mit N=135

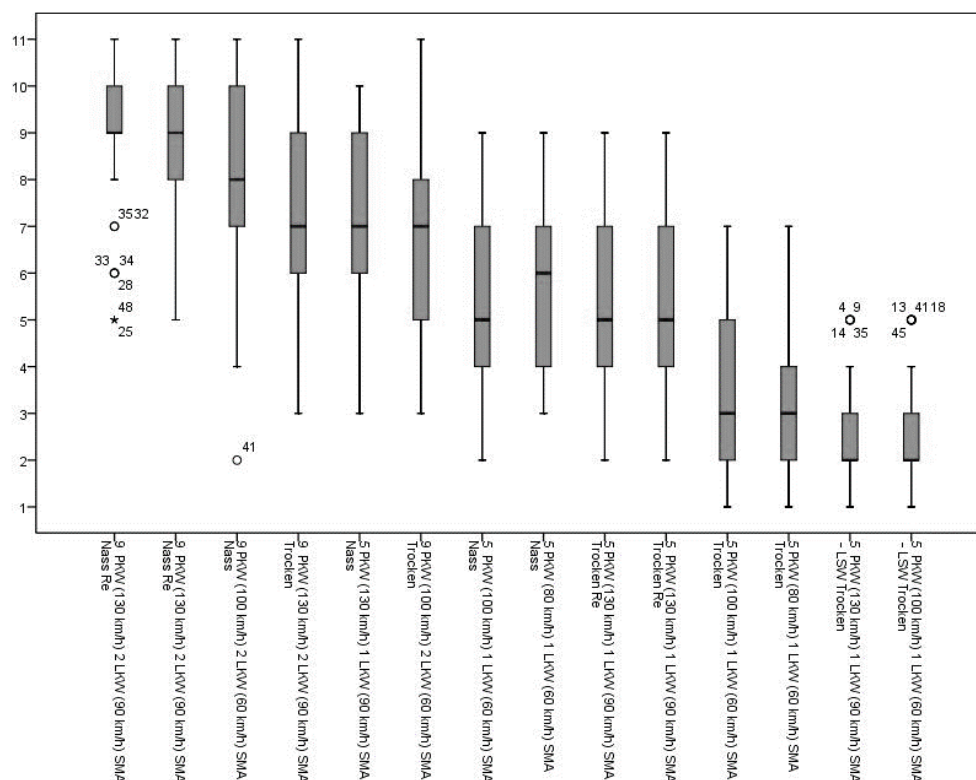


Abbildung 79: Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf die definierten Soundsamples mit dem Fahrbahnbelag SMA der Studienphase 1 mit N=135

Aus den subjektiven Lästigkeitsurteilen der Fahrzeugensembles lassen sich folgende Ergebnisse herauslesen:

- Die Fahrbahndecke aus Beton wird im Vergleich zu Asphaltbeton und SMA als besonders lästig empfunden.
- Eine Verkehrsbelastung von 9 PKW und 2 LKW wird generell als deutlich lästiger wahrgenommen als ein Fahrzeugensemble bestehend aus 5 PKW und 1 LKW, unabhängig von der Art der Fahrbahndecke.
- Nasse Fahrbahnoberflächen werden über alle Fahrbahndecken hinweg als störender empfunden. Dies zeigt sich in einem Anstieg der Lästigkeitsbewertung um 1,8 Indexpunkte bei SMA und 1,2 Indexpunkte bei Beton.
- Unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile von PKW und LKW zeigen signifikante Unterschiede in der wahrgenommenen Lästigkeit. Ein PKW mit einer Geschwindigkeit von 130 km/h wird im Durchschnitt um einen Indexpunkt lästiger empfunden als ein Fahrzeugensemble mit PKW bei 100 km/h.
- Fahrzeugensembles mit reduzierten Geschwindigkeiten (PKW 80 km/h und LKW 60 km/h) werden im Vergleich zu Ensembles mit durchschnittlichen Geschwindigkeiten auf österreichischen Autobahnen bei Nacht (PKW 130 km/h und LKW 90 km/h) als um 1,3 Indexpunkte weniger lästig bewertet. Dies unterstreicht den erheblichen Einfluss des Geschwindigkeitsprofils auf die wahrgenommene Lästigkeit.

- Die stärkste Reduktion der Lästigkeit wird durch die Abschirmung mittels Lärmschutzwand erreicht. Bei gleicher Fahrbahndecke und Geschwindigkeitsprofil wird das Fahrzeugensemble mit Lärmschutzwand um 2,9 Indexpunkte weniger lästig empfunden als ohne Abschirmung. Dies betont die herausragende Bedeutung von Lärmschutzwänden für die Reduzierung der wahrgenommenen Lästigkeit im Straßenverkehr.

4.3 Ergebnisse Studienphase 2 der subjektiven Hörversuche

In der Studienphase 2 wurden ebenso nur Teilaspekte des Hörversuchsablaufes aus der Phase 3 (siehe auch Abbildung 23) umgesetzt. Dazu gehörten der Fragenbogen „Lästigkeitsindex“, die audiometrische Analyse der ProbandInnen und die Bewertung der Lästigkeit mittels PNRS. Die Ergebnisse dazu sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt und beschrieben. Ein wesentlicher Aspekt in dieser Untersuchung ist die detaillierte Analyse der LKW mit eine Detailerhebung der einzelnen Fahrzeuge. Die Ergebnisse und Erkenntnisse der LKW-Detailerhebungen in Korrelation mit den psychoakustischen Parametern sind dem Kapitel 5 zu entnehmen. Die subjektiven Ergebnisse sind den nachfolgenden Abbildungen zu entnehmen.

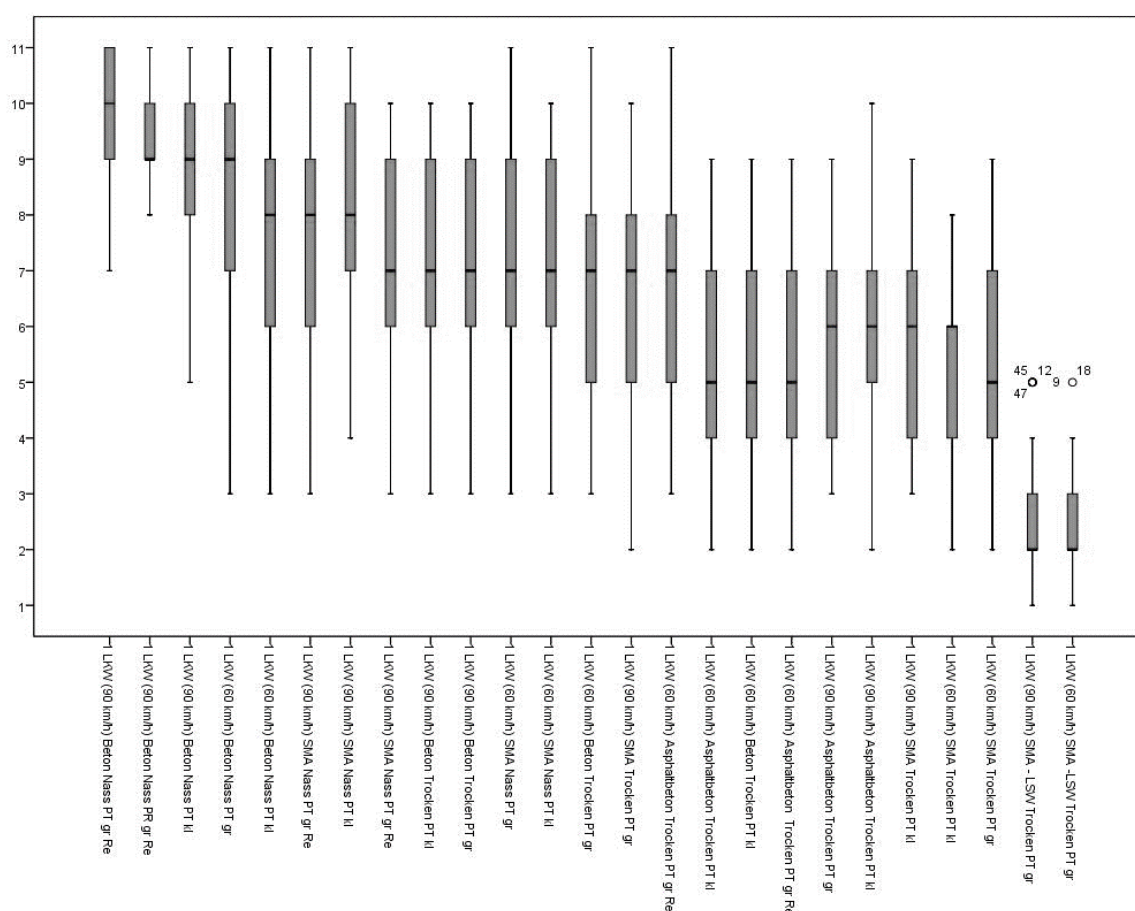


Abbildung 80: Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf alle 25 definierten Soundsamples der Studienphase 2 mit N=50

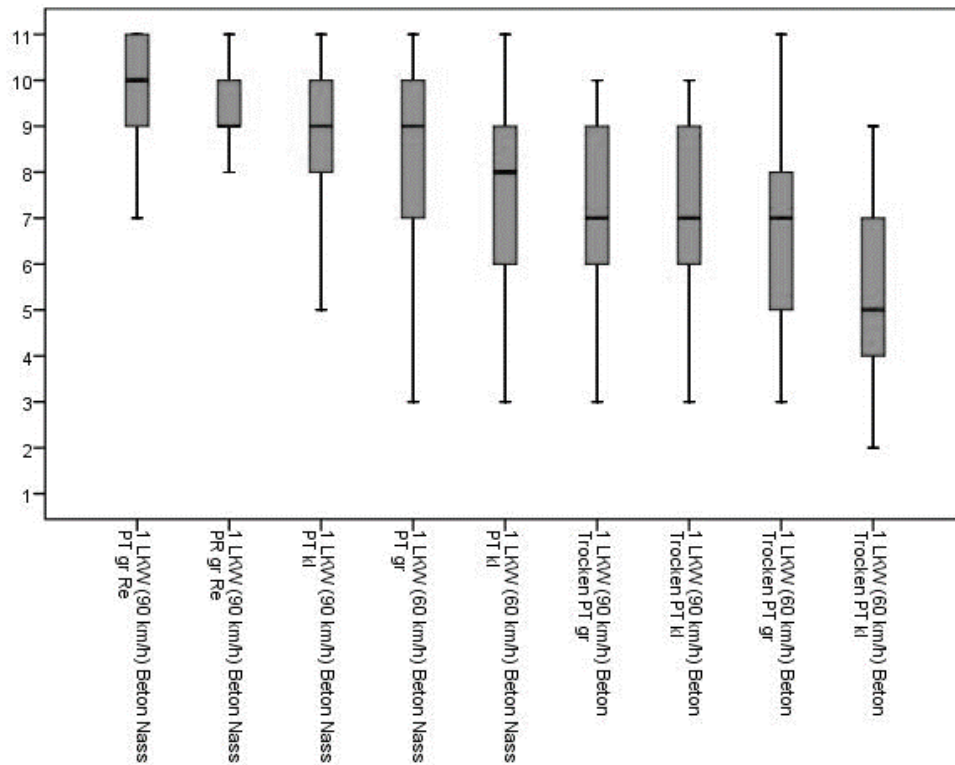


Abbildung 81: Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf die definierten Soundsamples mit dem Fahrbelag Beton der Studienphase 2 mit N=50

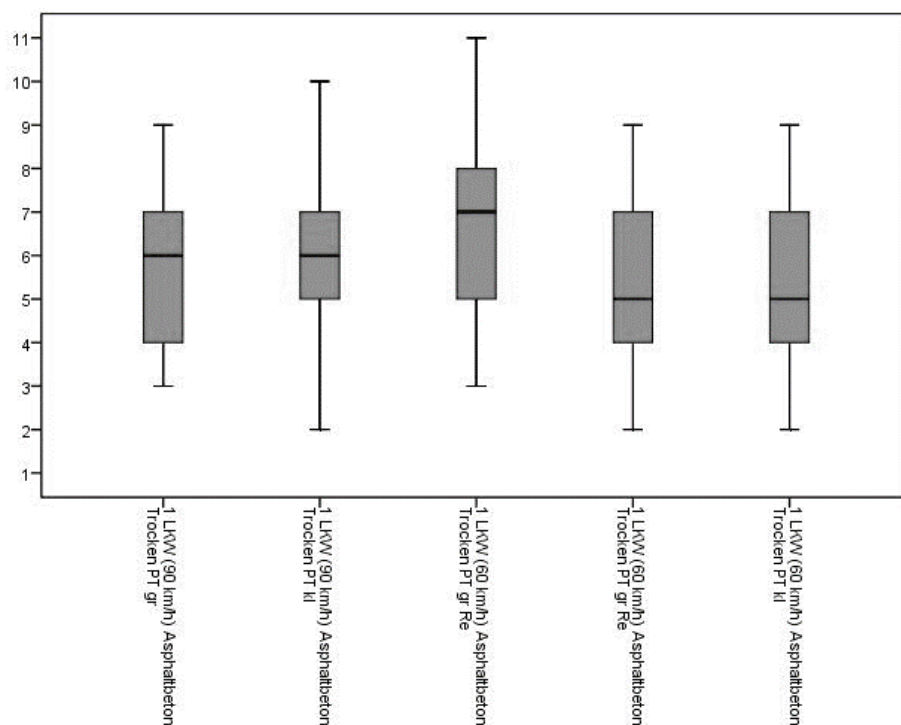


Abbildung 82: Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf die definierten Soundsamples mit dem Fahrbelag Asphaltbeton der Studienphase 2 mit N=50

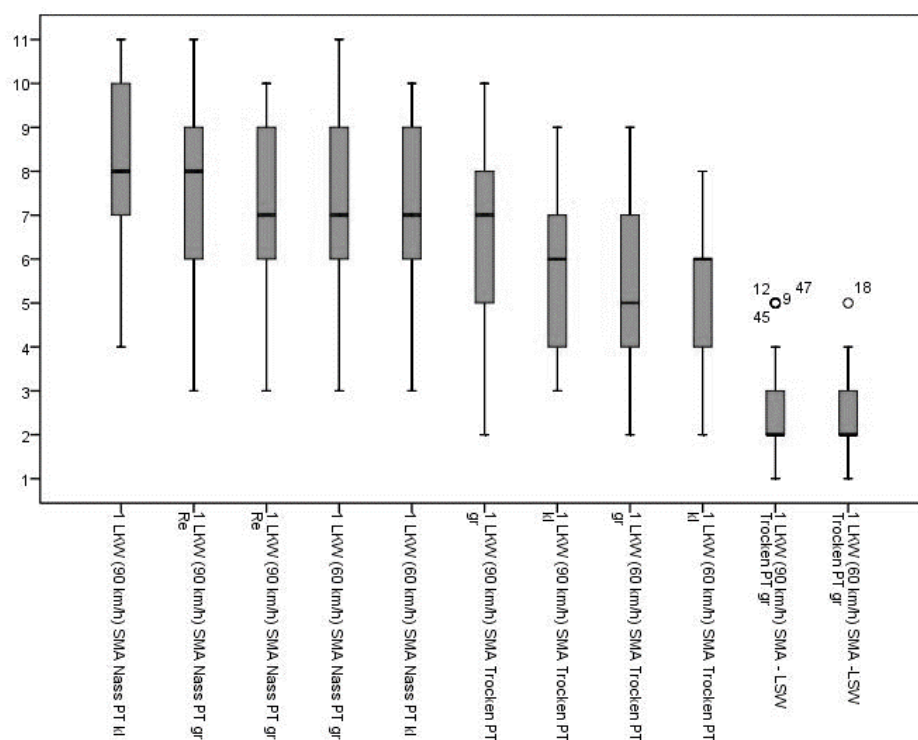


Abbildung 83: Boxplot der Personal Noise Ranking Scale (Lästigkeit) in Bezug auf die definierten Soundsamples mit dem Fahrbahnbelag SMA der Studienphase 2 mit N=50

Aus den subjektiven Lästigkeitsurteilen der Fahrzeugensembles lassen sich folgende zusammenfassen:

- Die LKW, die mit Geschwindigkeiten von 90 km/h unterwegs sind, werden allgemein als deutlich lästiger wahrgenommen im Vergleich zu jenen mit einer Geschwindigkeit von 60 km/h.
- Die lästige Wahrnehmung von nassen Fahrbahnoberflächen erstreckt sich über alle Arten von Fahrbahndecken.
- Der Einfluss der Profiltiefe lässt sich aufgrund der deskriptiven Statistik nicht verifizieren
- Bei gleicher Fahrbahndecke und gleichem Geschwindigkeitsprofil hat die Abschirmung durch eine Lärmschutzwand den größten Einfluss auf die Reduzierung der Lästigkeit. Die LKW-Vorbeifahrt wird mit Lärmschutzwand um 3 Indexpunkte weniger lästig empfunden als ohne Abschirmung.

4.4 Ergebnisse Studienphase 4 der subjektiven Hörversuche

Um die Laboruntersuchungen und Ergebnisse auf die realen Wohnbedingungen von Menschen umzulegen, wurde das Studiendesign erweitert und es wurden in einer Studienphase 4 die Auswirkungen des Verkehrslärms (Straße und Schiene) anhand einer kleineren Feldstudie (16 ProbandInnen) untersucht. Der entscheidende Punkt besteht darin, dass alle Messungen im Feld in realen Alltagssituationen, am Wohnort der ProbandInnen, stattfanden. Auf Grundlage vorangegangener Erfahrungen im Bereich von den Feldmessungen wurde eine standardisierte Methode für objektive akustische Messungen im Wohnumfeld von Probanden entwickelt. Das Ziel der akustischen Messungen bestand darin

einen zeitsynchronen Vergleich zwischen den Ergebnissen des Fragebogens (Bewertung der individuellen subjektiven Verkehrslärmbelastung mittels PNRS und die Erfahrungen, Gefühle und Verhalten auf Basis der „Experience Sampling Methode) und den akustischen Parametern, inklusive Schalldruckpegel und psychoakustischen Parametern herzustellen. Dadurch war es möglich den gesamten Merkmalsraum der akustischen Belastungen eines Probanden zu ermitteln und in weiterer Folge zu analysieren. In Summe wurden von allen 16 ProbandInnen 480 halbstündliche Lästigkeitsbewertungen mittels PNRS (50% davon Straßenverkehrslärm und 50% Schienenverkehrslärm) in dem Morgen- und Abendzeiträumen durchgeführt. Um eine realistische Abbildung der Lärmsituation in der Wohnumgebung zu bekommen, wurden die binauralen Kunstkopfmessungen an zwei verschiedenen Messorten (im Außenbereich der Fensterfront und im Wohn- bzw. Schlafbereich) pro ProbandIn zeitgleich durchgeführt. In den nachfolgenden Abbildungen sind exemplarische Beispiele der Feldmessungen im Straßen- und Schienenverkehrsbereich mit der binauralen Kunstkopftechnologie.



Abbildung 84: Exemplarische Feldmessungen im Außenbereich der Wohnumgebungen der Probanden in der Studienphase 4



Abbildung 85: Exemplarische Feldmessungen im Innenbereich der Wohnumgebungen der Probanden in der Studienphase 4

4.5 Ergebnisse der akustischen Parameter

Neben den vorher beschriebenen subjektiven Daten wurden auch die sogenannten objektiven psychoakustischen Kenngrößen für die im Labor und Feld erhobenen Lärmsamples berechnet. Diese Berechnungen des Schalldruckpegels und der psychoakustischen Parameter wurden jeweils für die unterschiedlich langen Zeitbereiche der Lärmsamples, von 30 Sekunden (Studienphase 2) über 1 Minute (Studienphase 1 und 3) bis zu 30 Minuten (Studienphase 4), durchgeführt.

Es wurden folgende Kenngrößen für alle Lärmsamples berechnet:

- Schalldruckpegel (A- und C-bewertet)
- Lautheit (Berechnung nach [DIN 45631/A1] – Verfahren nach Zwicker)
- Schärfe (Berechnung nach [DIN 45692])
- Rauigkeit (Berechnung nach [Sottek 1993])
- Schwankungsstärke (Berechnung nach [Sottek 1993])
- Tonhaltigkeit (Berechnung nach [DIN 45681])

Die Berechnung der Kenngrößen erfolgte mit der Software Artemis Suite der Firma HEAD acoustics. Es wurden für alle Kenngrößen unterschiedlichste statistische Lokationsmaße (Mittelwert, Median, Perzentile) ermittelt, um die Variabilität der psychoakustischen Parameter darzustellen und diese dann in weiterer Folge in die statistische Modellbildung zu integrieren. Beispielhaft werden für die Studienphase 3 in der nachfolgenden Tabelle 11 die Ergebnisse der fünf psychoakustischen Grundgrößen (Lautheit, Rauigkeit, Schärfe, Tonhaltigkeit und Schwankungsstärke) auf Basis des 50. Perzentils für die einzelnen Soundsamples dargestellt. Die Ergebnisse der anderen Studienphase liegen dem zugrundeliegenden Datensatz dieser Arbeit bei.

Tabelle 11: Soundsamples mit den berechneten Ergebnissen der psychoakustischen Parameter (50. Perzentil) der Studienphase 3

Samplename	Lautheit [sone]	Rauhigkeit [asper]	Schärfe [acum]	Tonhaltigkeit [mel]	Schwankungsstärke [vacil]
PZ_A	6,16	1,31	1,32	0,039	0,004
PZ_B	7,19	1,45	1,14	0,027	0,005
PZ_C	8,92	1,63	1,13	0,026	0,005
PZ_D	6,77	1,37	1,27	0,034	0,009
GZ_A	23,86	2,82	1,96	0,017	0,009
GZ_B	16,1	2,21	1,84	0,021	0,006
GZ_C	21,43	2,54	2,06	0,023	0,007
GZ_D	14,46	2,11	1,64	0,025	0,006
SMA_A	10,1	1,66	1,92	0,072	0,004
SMA_B	11,2	1,8	2,05	0,024	0,005
SMA_C	12,16	1,87	2,31	0,019	0,006
SMA_D	8,01	1,5	1,98	0,02	0,005
Beton_A	20,65	2,52	2,17	0,032	0,006
Beton_B	19,79	2,47	2,17	0,024	0,006
Beton_C	23,46	2,72	2,28	0,025	0,006
Beton_D	15,24	2,14	2,03	0,025	0,005
Straße_55dB	8,01	1,5	1,98	0,02	0,005
Straße_65dB	15,24	2,14	2,03	0,025	0,005
Straße_75dB	28,36	3,01	2,4	0,031	0,007
Schiene_55dB	7,19	1,45	1,14	0,027	0,005
Schiene_65dB	16,1	2,21	1,84	0,021	0,006
Schiene_75dB	31,34	3,14	2,33	0,021	0,008
Rauschen_50dB	7,07	1,39	2,24	0,024	0,003
Rauschen_60dB	14,11	1,97	2,56	0,023	0,004
Rauschen_70dB	26,8	2,79	3,07	0,021	0,005
Rauschen_80dB	49,49	3,94	3,88	0,02	0,007
PZ_A_repro	6,16	1,31	1,32	0,039	0,004
GZ_C_repro	21,43	2,54	2,06	0,023	0,007
Beton_C_repro	23,46	2,72	2,28	0,025	0,006
SMA_C_repro	12,16	1,87	2,31	0,019	0,006
Rauschen_70dB_repro	26,8	2,79	3,07	0,021	0,005

Die Ergebnisse der Lautheit (Abbildung 86) zeigen schon auf den ersten Blick die Unterschiede zwischen den verschiedenen Lärmarten (Straße vs. Schiene) und der Intensität der Schallquelle. Im Schienenbereich sind die Lautheitswerte der Güterzüge (GZ) mehr als doppelt so hoch, wie bei den Personenzügen (PZ). Im Bereich der Straßenverkehrssamples gibt es auch deutliche Unterschiede der Lautheit (10 bis 12 sone) zwischen den Fahrbahnbelägen (SMA vs. Beton). Ein wesentlicher Aspekt war auch die unterschiedliche Kategorisierung der Lärmsamples in Schalldruckpegelklassen (55dB(A), 65dB(A) und 75dB(A)) auf der Schiene und Straße. Als interessante Erkenntnis ist hier anzumerken, dass Lärmsamples mit dem gleichen Schalldruckpegel auf der Straße und Schiene bei der Lautheit bis zu 3 sone Unterschied aufweisen. Die höchste Variabilität wird bei der Lärmart Rauschen angezeigt, was jedoch auf die hohen Intensitätsunterschiede der Lärmsamples zurückzuführen ist. Wenn man die Parameter Lautheit, Rauigkeit und Schärfe deskriptiv interpretiert, können einzelne Muster erkannt werden. Bei Lauthaut und Rauigkeit (siehe Abbildung 87) ist hier jedoch anzumerken, dass es eine Abhängigkeit (Kollinearität) in der Berechnungsmethodik dieser beiden Parameter gibt. Aber auch der Parameter Schärfe (siehe Abbildung 88) zeigt in seiner relativen Verteilung über alle Lärmsamples hinweg ähnliche Muster wie die Lautheit, was dann in weitere Folge in der Modellbildung auch zu statistisch aussagekräftigen Erkenntnissen führt. Die psychoakustischen Parameter Schwankungsstärke und Tonhaltigkeit zeigen schon in einer deskriptiven Einzelbetrachtung keine Indikationen für eine weitere Verwendung in der nachfolgenden Modellbildung. Das Ziel der Arbeit ist es jedoch nicht diese psychoakustischen Parameter als singuläre Bewertungsgröße zu standardisieren, sondern eine modelltechnische Korrelation mit den subjektiven Ergebnissen aus der Hörversuchen prototypisch zu entwickeln.

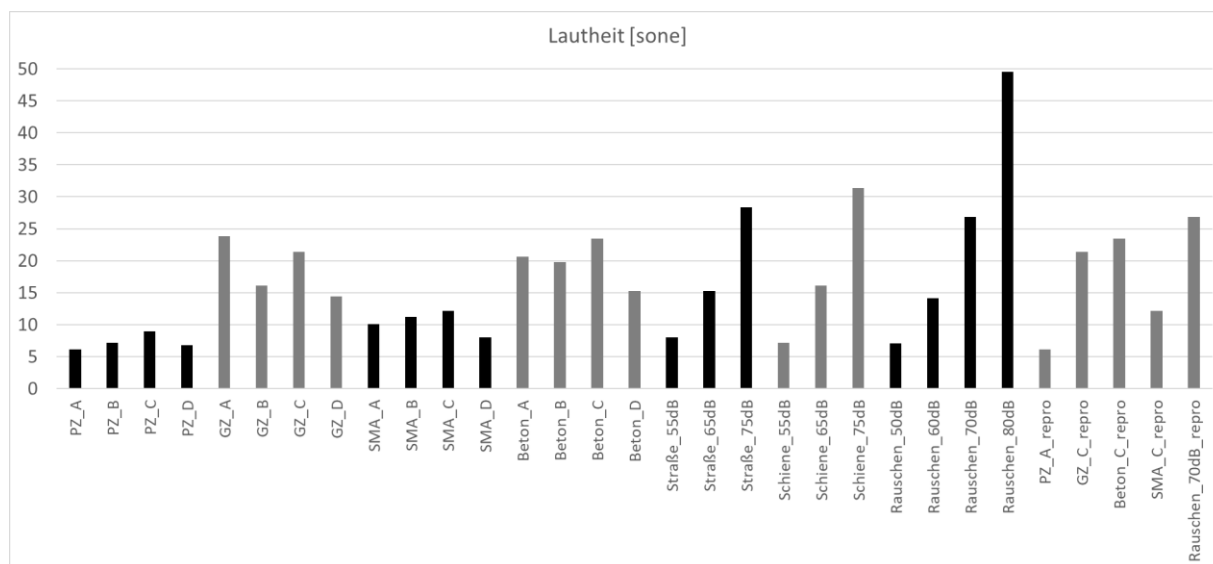


Abbildung 86: Soundsamples mit den berechneten Ergebnissen des Parameter Lautheit (50. Perzentil) aus der Studienphase 3

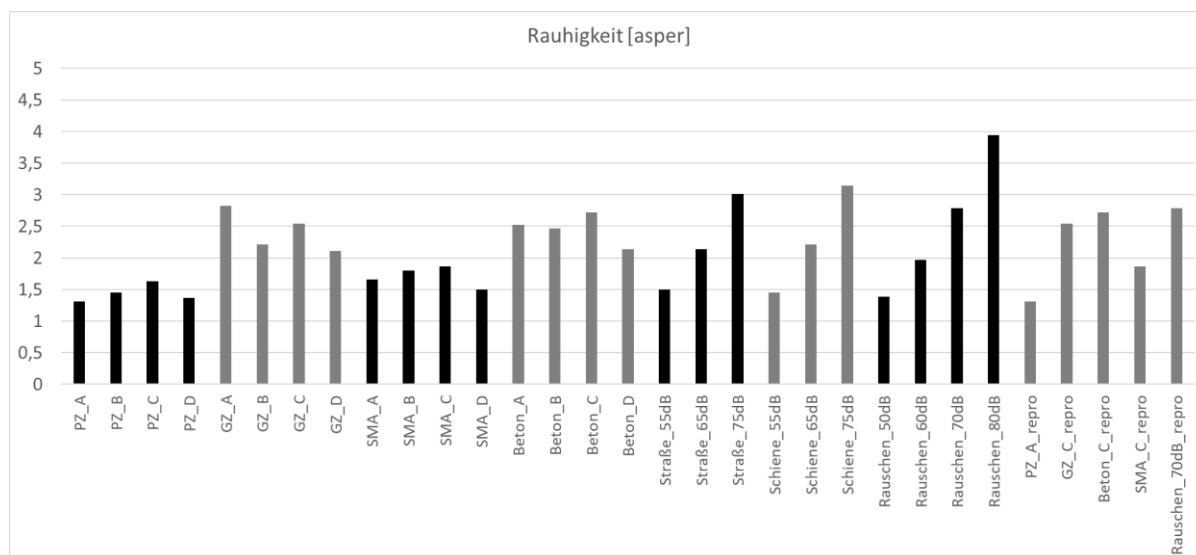


Abbildung 87: Soundsamples mit den berechneten Ergebnissen des Parameter Rauhigkeit (50. Perzentil) aus der Studienphase 3

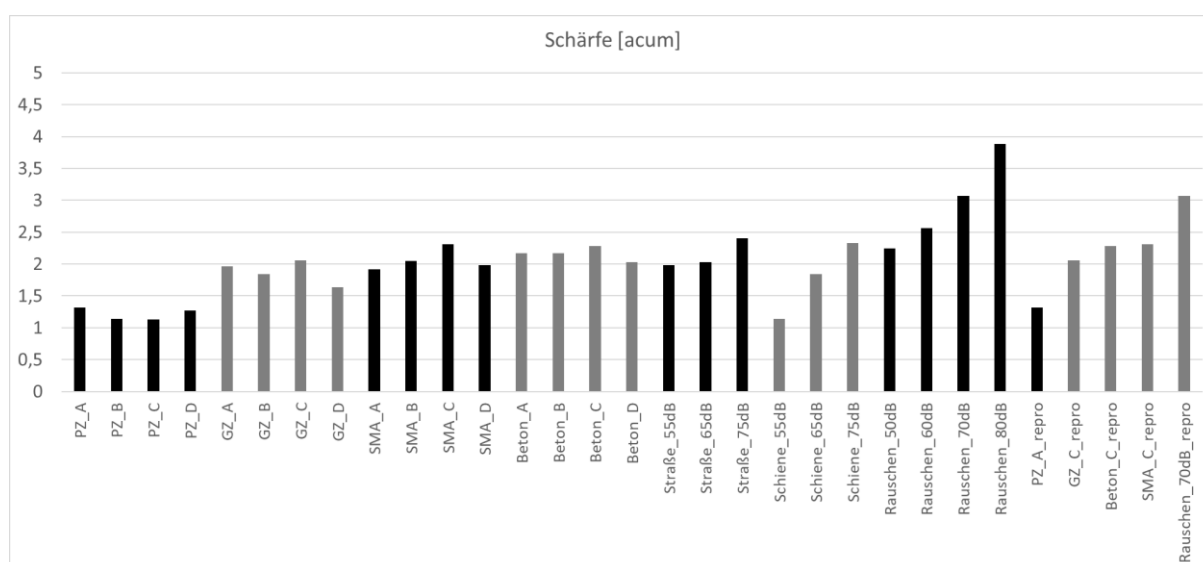


Abbildung 88: Soundsamples mit den berechneten Ergebnissen des Parameter Schärfe (50. Perzentil) aus der Studienphase 3

4.6 Entwicklung neuer psychoakustischer Parameter

Zu den bekannten und vorher beschriebenen psychoakustischen Grundgrößen wurden auch sogenannte neue Parameter, die speziell auf die Geräuschkategorie Verkehrslärm abgestimmt wurden, entwickelt. In einem ersten Schritt ergaben jedoch neu untersuchte Parameter wie der „Spitzenschall-druckpegel L01 (1. Perzentil)“ und die „Spitzenlautheit N01 (1. Perzentil)“ nach Analyse und Auswertungen keine signifikanten Ergebnisse. Darum wurden die synthetisch generierten Fahrzeugensamples herangezogen und der aus Messung und Literatur bekannte grundsätzliche Unterschied der Lautheit

zwischen PKW- und LKW-Vorbeifahrten als Merkmal vertiefend analysiert. Um speziell die Spitzenlautheit N01 in die Berechnung zu integrieren wurde folgende Kenngröße entwickelt:

Lautheitsüberschuss LKW-PKW (LUS)

Bei dieser Kenngröße wurde die Spitzenlautheit N01 (1. Perzentil) der Einzelvorbeifahrten der LKW und PKW getrennt berechnet, subtrahiert und dann ins Verhältnis mit der Spitzenlautheit (1. Perzentil) des gesamten Fahrzeugensembles gesetzt (16).

$$LUS = \sum_i^n \frac{N01_{LKW_i} - N01_{PKW_i}}{N01_{Fahrzeugensemble_i}} \quad (16)$$

In weiterer Folge wurde nach einem weiteren tieffrequenten Modulationsparameter (low frequency modulation) in Anlehnung an die Schwankungsstärke geforscht, welcher im speziellen den signifikanten Lästigkeitsanstieg durch die LKW- und Zugvorbeifahrten im tiefen Frequenzbereich beschreibt.

Tieffrequente Schwankungsstärke (LFFS)

Aus der Analyse ergab sich die spektrale Beschleunigungsdichte (Power Spectral Density) der Lärm-samples als valider Indikator. Die spektrale Beschleunigungsdichte ist der quadratische Mittelwert (über den Frequenzbereich) eines Beschleunigungssignals, das ein Schmalbandfilter bestimmter Frequenzbreite passiert hat, dividiert durch die Bandbreite des Filters. Dadurch wird eine Normierung des Signals erreicht. Die spektrale Beschleunigungsdichte ist der Wert für den Grenzfall, dass die Bandbreite gegen Null und die Mittelungsdauer gegen Unendlich geht. Bei dieser Umsetzung wurde die spektrale Beschleunigungsdichte (LFFS) der einzelnen Fahrzeugensembles jedoch nur für das erste Oktavband (1. Oktavband) berechnet und in weitere Folge verwendet (17).

$$LFFS = \frac{1}{N_{1.Oktavband}} \left| \sum_{n=1}^N x_n e^{-i2\pi f n \Delta t} \Delta t \right|^2 \quad (17)$$

Somit wurden auf Basis dieser Analysen zwei neue Parameter mit der Bezeichnung „Lautheitsüberschuss PKW-LKW (LUS)“ und „Tieffrequente Schwankungsstärke (LFFS (Low Frequency Fluctuation Strenght))“ als weitere relevante Parameter ermittelt und in nachfolgende Modellbildung integriert.

5 Statistische Modellbildung, Ergebnisse und Anwendung

In dem nachfolgenden Kapitel wird die Modellbildung aus den subjektiven und objektiven Parametern beschrieben. Es wurden verschiedene statistische Methoden verwendet, welche in einer Zielgrößenmodellierung zusammenfassend abgebildet sind. Der Ergebnisindex „Traffic Noise Annoyance on Roads an Rail“ aus dem Modell entspricht einem sogenannten Vektor aus einzelnen gewichteten psychoakustischen Parametern, welcher bei der quantitativ besseren Bewertung der Lärmwirkung im Verkehrswesen eine Unterstützung sein soll. Dieses Ergebnis der Modellbildung muss aber auch immer unter den Blickwinkeln der Rahmenbedingungen der Messungen und Hörversuche interpretiert werden.

5.1 Statistische Modellbildung aus subjektiven und objektiven Parametern

Grundsätzlich gibt es viele verschiedene Ansätze in der Wissenschaft subjektive und objektive Parameter zu verknüpfen. Diese daraus entstehenden Korrelationen werden mittels Hypothesen statistisch untersucht und die sich ergebenden Resultate interpretiert. Bei der statistischen Modellbildung für diese Arbeit wurde nach eingehender Literaturstudie aus unterschiedlichen Forschungsbereichen verschiedene Ansätze gewählt, für diese Fragestellung adaptiert, implementiert, analysiert und statistisch interpretiert.

Zuerst stellt sich bei solchen Untersuchungen die Frage, welche statistischen Analyseverfahren angewendet werden sollen. Da es sich bei dieser Arbeit immer um mehrere Variablen handelt, bei denen Zusammenhangs- oder Ähnlichkeitsstrukturen analysiert werden sollen, wurden Methoden aus dem Bereich der multivariaten Analyseverfahren angewendet.

Bei multivariaten Verfahren unterscheidet man zwischen zwei Methoden. Auf der einen Seite Verfahren, wo untersucht wird, ob die Daten mit einer vorgegebenen Struktur zusammenpassen (strukturprüfende Verfahren) und auf der anderen Seite, ob es möglich ist, die Struktur aus Daten zu extrahieren (strukturentdeckende Verfahren). Zu den strukturprüfenden Verfahren gehören unter anderem die Regressionsanalyse, die Varianzanalyse und die Diskriminanzanalyse. Zu den strukturentdeckenden Verfahren gehören unter anderem die Cluster- und Faktorenanalyse, die Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis (PCA)) oder die multidimensionale Skalierung (MDS).

In dieser Arbeit wurden verschiedene strukturprüfenden und strukturentdeckenden Verfahren angewendet bzw. für diese Fragestellung so adaptiert, dass sie auch anwendbar sind, da hier teilweise keine Grundlagen aus diesem Bereich der Lärmwirkungsforschung aus der Literatur bekannt sind. Die Hauptkomponentenanalyse wurde, wie in der methodischen Systemskizze beschrieben, auch angewendet, die Ergebnisse haben aber auf die weitere Modellbildung keinen Einfluss.

Tabelle 12: Gliederung der angewendeten statistischen Modelle in dieser Arbeit

Strukturprüfende Verfahren			Strukturentdeckende Verfahren
Regressionsanalyse			Multidimensionale Skalierung (MDS)
Lineare Regressionsanalyse	Multiple lineare Regressionsanalyse	Nicht-lineare Regressionsanalyse	

5.1.1 Strukturprüfende Verfahren

Regressionsanalyse

In der Wissenschaft, in der Technik und im Alltag fragen wir immer wieder danach, wie eine Größe, die uns speziell interessiert, von anderen Größen abhängt. Diese grundlegende Frage behandelt die statistische Regression, die deshalb wohl (neben einfachen grafischen Darstellungen) die am meisten verwendete Methodik der Statistik darstellt. Grundsätzlich ist die Regressionsanalyse eine Sammlung von statistischen Analyseverfahren. Ziel bei den am häufigsten eingesetzten Analyseverfahren ist es, Beziehungen zwischen einer abhängigen (Lästigkeit) und einer oder mehreren unabhängigen Variablen (Psychoakustische Kenngrößen) festzustellen. Sie wird insbesondere verwendet, wenn Zusammenhänge quantitativ zu beschreiben oder Werte der abhängigen Variablen zu prognostizieren sind. In dieser Arbeit werden verschiedene Verfahren der Regressionsanalyse für die konkrete Fragestellung adaptiert, analysiert und interpretiert.

Die Zielgröße y (englisch target variable) hängt über eine Funktion h von den Eingangsgrößen oder erklärenden Variablen $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)}$ (explanatory variables) ab. Weitere gebräuchliche Ausdrücke für die Zielgröße y sind „abhängige Variable“ und für die erklärenden Variablen $x^{(j)}$ der Begriff „abhängige Variablen“ [Backhaus et al. 2006].

Im Idealfall würde die Funktion für jede Beobachtung i folgendermaßen aussehen:

$$y_i = h \langle x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(m)} \rangle \quad (18)$$

Die statistische Regressionsrechnung geht davon aus, dass eine Formel ungefähr gilt und die vorkommende Abweichung als zufällig genannt und über einen Zufallsfehler E_i beschrieben wird.

$$Y_i = h \langle x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(m)} \rangle + E_i \quad (19)$$

Lineare Regressionsanalyse

Die lineare Regression ist ein Spezialfall des allgemeinen Konzepts der Regressionsanalyse, mit der versucht wird, eine abhängige Variable durch eine oder mehrere unabhängige Variablen zu erklären - das Beiwort linear ergibt sich dabei daraus, dass die Regressionskoeffizienten (nicht unbedingt auch die Variablen selbst!) in diesem Fall in erster Potenz in das Regressionsmodell eingehen [Backhaus et al. 2006].

Multiple lineare Regressionsanalyse

Die multiple lineare Regression ist der einfachen linearen Regression sehr ähnlich. Der einzige Unterschied besteht darin, dass mehr als eine unabhängige Variable zur Modellierung eingesetzt wird.

Die (multiplen) linearen Regressionsmodelle beruhen auf der Annahme, dass der Zusammenhang zwischen jeder Prädiktorvariable und der abhängigen Variablen linear ist, d.h., durch eine Gerade beschrieben werden kann. Diese Annahme muss nicht immer erfüllt sein. Zusammenhänge zwischen Variablen können im Grunde beliebige Form haben. Man spricht in diesen Fällen von nichtlinearen Zusammenhängen [Backhaus et al. 2006].

Nichtlineare Regressionsanalyse

Die nicht-lineare Regressionsanalyse ist eine statistische Methode, die verwendet wird, um die Beziehung zwischen einer abhängigen Variablen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen zu modellieren, wenn diese Beziehung nicht durch eine einfache lineare Funktion beschrieben werden kann. Dies bedeutet, dass die abhängige Variable nicht direkt proportional oder invers proportional zu den unabhängigen Variablen ist. Stattdessen wird angenommen, dass die Beziehung zwischen ihnen durch eine nichtlineare Funktion beschrieben wird [Backhaus et al. 2006]. In dieser Arbeit werden nachfolgend beschriebene Methoden angewendet:

Lästigkeitsmodell auf Basis nichtlinearer Regressionsanalyse (arctan- und logistische Funktion)

Die Arcustangens-Funktion ist eine mathematische Funktion, die in der Trigonometrie verwendet wird. Sie ist auch als "inverse Tangensfunktion" bekannt und wird verwendet, um den Winkel zu berechnen, dessen Tangens ein bestimmter Wert ist. Die Werte, die die Arcustangens-Funktion zurückgibt, liegen normalerweise im Bereich von $-\pi/2$ bis $\pi/2$ oder von -90 Grad bis 90 Grad. Die Funktion ist streng monoton steigend, was bedeutet, dass für jeden Wert von "x" die Arcustangens-Funktion einen eindeutigen Wert zurückgibt.

Die logistische Funktion, auch als Sigmoid-Funktion oder logistische S-Kurve bezeichnet, ist eine mathematische Funktion, die in verschiedenen Disziplinen wie Statistik weit verbreitet ist. Sie hat die charakteristische S-förmige Kurve und wird verwendet, um Wachstum, Verbreitung, Annahmen oder Wahrscheinlichkeiten darzustellen, die sich mit der Zeit ändern.

5.1.2 Strukturentdeckende Verfahren

Multidimensionale Skalierung (MDS)

Die Multidimensionale Skalierung (auch Ähnlichkeitsstrukturanalyse, abgekürzt: MDS) ist ein Bündel von Verfahren der multivariaten Statistik. Ihr formales Ziel ist es, die Objekte räumlich so anzuordnen, dass die Abstände (Distanzen) zwischen den Objekten im Raum möglichst exakt den erhobenen Un-/Ähnlichkeiten entsprechen. Je weiter die Objekte voneinander entfernt sind, desto unähnlicher sind sie und je näher sie beieinander sind, desto ähnlicher sind sie. Es werden also Informationen über Paare von Objekten erhoben, um daraus metrische Informationen über die Objekte zu ermitteln. Ziel des Verfahrens ist eine optimale Anpassung der MDS-Lösung an die Rohdaten und somit ein möglichst geringer STRESS-Wert bzw. ein möglichst großes Bestimmtheitsmaß. Diese Werte sind als Unterschied

zwischen Disparität und Distanz zu verstehen. Verändern sich die Werte nicht mehr oder nur geringfügig, wird das Iterationsverfahren abgebrochen. Der STRESS-Wert (STANDARDIZED RESidual Sum of Squares) berechnet sich als Wurzel aus der Summe der Abweichungsquadrate der Disparitäten von den Distanzen, geteilt durch die Summe der quadrierten Distanzen. Damit ist STRESS ein normiertes Varianzmaß [Mathar 1997].

5.1.3 Systemübersicht der angewendeten statistischen Verfahren

Auf Basis der Ergebnisse und Erkenntnisse für die objektiven und subjektiven Parameter wurde eine Definition der zu verwendeten statistischen Verfahren und Modelle getroffen. Der Fokus lag dabei auf der Anwendung unterschiedlicher Modelle, um die Validität und Ergebnisse einzelner Verfahren zu untersuchen und auch eine Vergleichbarkeit über unterschiedliche Verfahren hinweg zu ermöglichen.

In der finalen Umsetzung wurden unterschiedliche Arten der linearen und nichtlinearen Regressionsanalyse und eine sogenannte Ähnlichkeitsstrukturanalyse durchgeführt. In der nachfolgenden Systemskizze sind die Eingangsparameter und Modelle nochmal in Detail dargestellt.

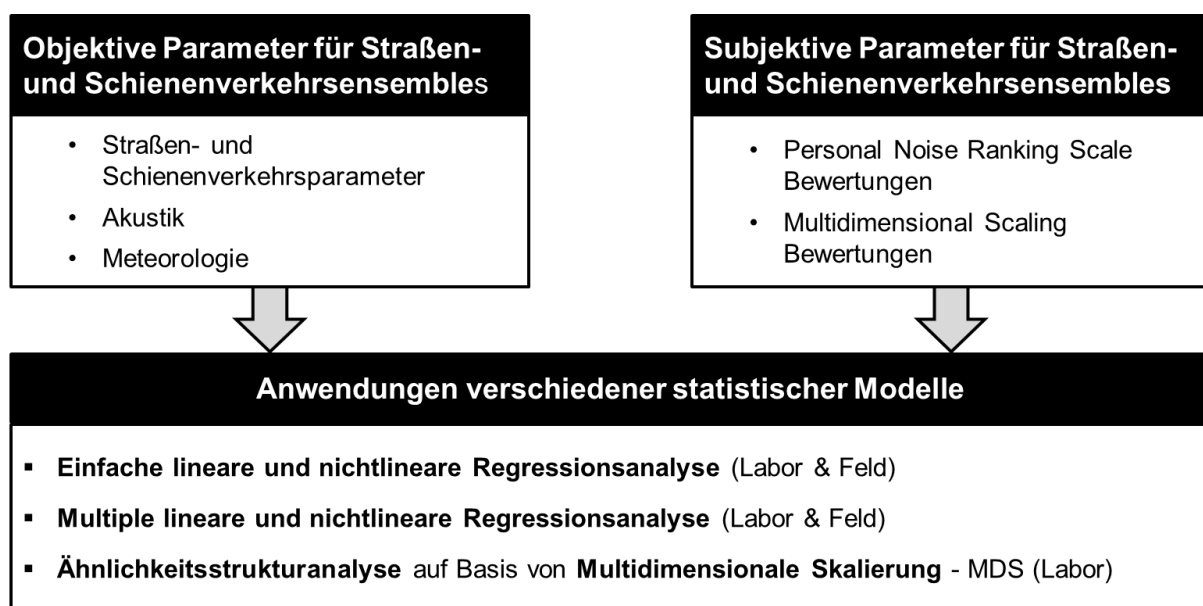


Abbildung 89: Systemskizze der statistischen Modellbildung aus subjektiven und objektiven Parametern

5.2 Ergebnisse Studienphase 3 der Modellbildung

In der Studienphase 3, wie schon beschrieben, lag der Analysefokus auf dem Vergleich der Verkehrsträger Straße und Schiene mit dem zusätzlichen Aspekt der Referenzschallquelle Rauschen. Nachfolgend sind die Ergebnisse der statistischen Analysen in Zusammenhang mit den verschiedenen akustischen Parametern beschrieben.

5.2.1 Lineare und multiple lineare Regressionsanalysen auf Basis PNRS

In einem ersten Schritt wurde eine lineare Regression berechnet, um den Einfluss des $L_{A,eq}$ der Geräuschsamples auf die Bewertungen mittels Personal Noise Ranking Scale zu erklären. Durch die lineare Regressionsanalyse können Aussagen darüber getroffen werden, wie gut sich die Werte einer Variable (in diesem Fall die Lästigkeitsurteile auf der Personal Noise Ranking Scale) durch eine oder mehrere andere Variablen (z.B. der $L_{A,eq}$ der Geräusch-Samples) vorhersagen lassen. Die Variable, deren Wert vorhergesagt werden soll, wird als abhängige Variable oder als Kriterium bezeichnet (in diesem Fall die Lästigkeitsbeurteilung). Die Variable, die zur Vorhersage dient, wird als unabhängige Variable oder als Prädiktor bezeichnet (akustische Parameter). In den nachfolgenden Abbildungen sind die Regressionsanalysen für Straße, Schiene, Rauschen und Gesamt (alle drei Kategorien zusammengefasst) dargestellt.

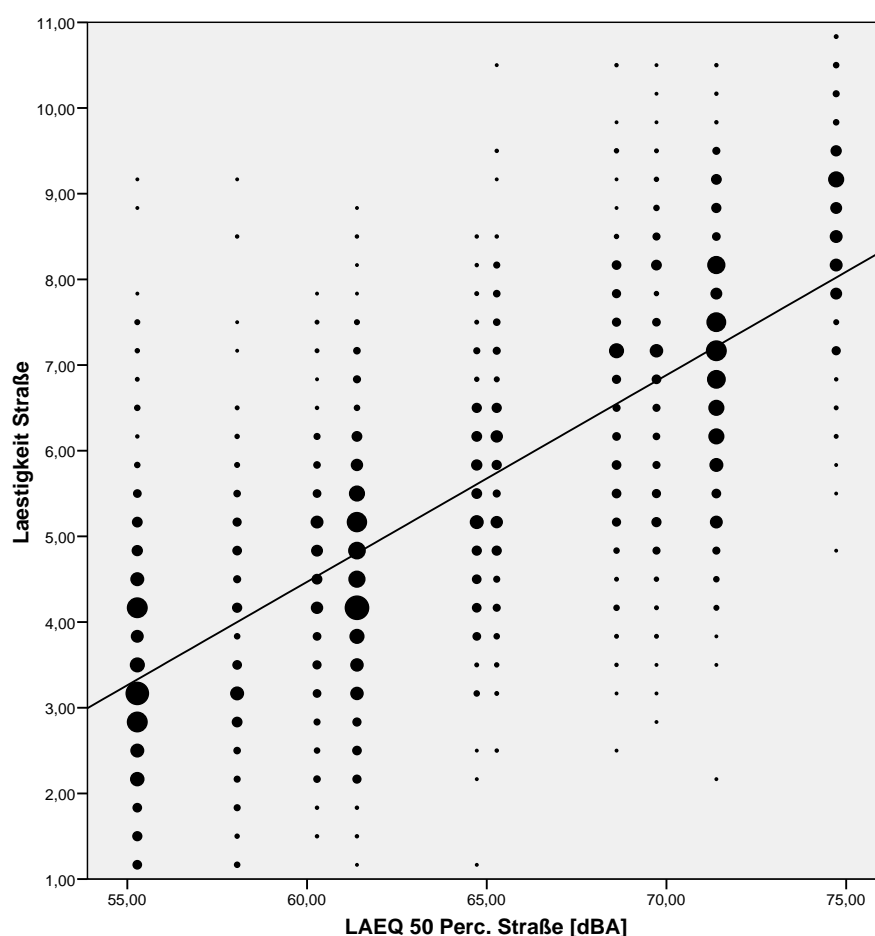


Abbildung 90: Lineare Regression für den Bereich Straße: Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale in Abhängigkeit des $L_{A,eq}$ (Studienphase 3, $N = 171$); Adj. $R^2 = 0,738$

In der Abbildung 90 ist die Lästigkeit in Abhängigkeit des Parameters $L_{A,eq}$ für den Bereich „Straße“ dargestellt. Für diese Analysen sind alle Bewertungen für die 11 definierten Fahrzeugensembles und für die beiden Reprosamples der 171 ProbandInnen verwendet worden. Die unterschiedliche Größe

der Punktwolken gibt die unterschiedliche Anzahl der Bewertungen wieder d.h. je größer eine Punktwolke, desto mehr ProbandInnen haben das Ensemble mit diesem Indexpunkt bewertet. Aufgrund der Breite der 11-teiligen Intervallskala bewerteten die ProbandInnen die Lästigkeit in sehr unterschiedlichen Teilbereichen. Um die unterschiedlichen Bewertungen der ProbandInnen in eine einheitliche Form zu bringen, erfolgte eine Zentrierung auf den Mittelwert der subjektiven Lästigkeitsurteile der einzelnen ProbandInnen. Mit diesen zentrierten Daten wurde eine lineare Regressionsanalyse der Lästigkeit in Abhängigkeit des $L_{A,eq}$ und in weiterer Folge mit allen psychoakustischen Parameter durchgeführt. Als Ergebnis ist hier festzuhalten, dass 73,8% der Varianz der subjektiven Lästigkeit (Bestimmtheitsmaß Adj. R^2) mit dem Parameter $L_{A,eq}$ erklärt werden können.

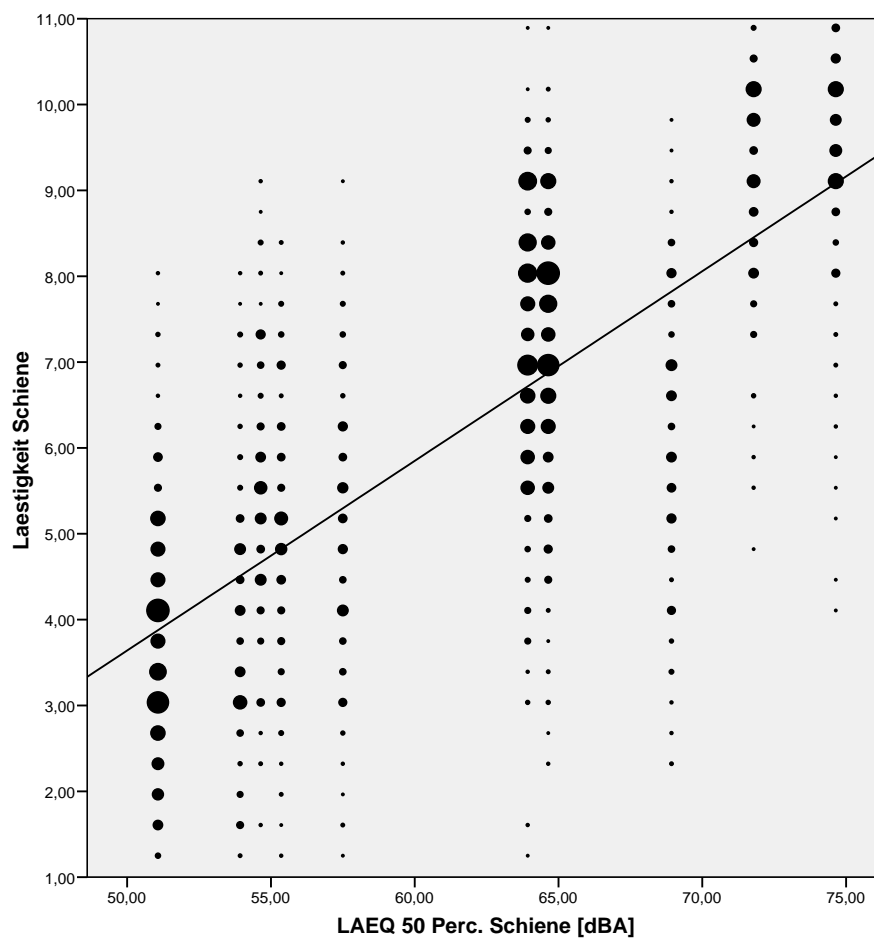


Abbildung 91: Lineare Regression für den Bereich Schiene: Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale in Abhängigkeit des $L_{A,eq}$ (Studienphase 3, N = 171); Adj. $R^2 = 0,701$

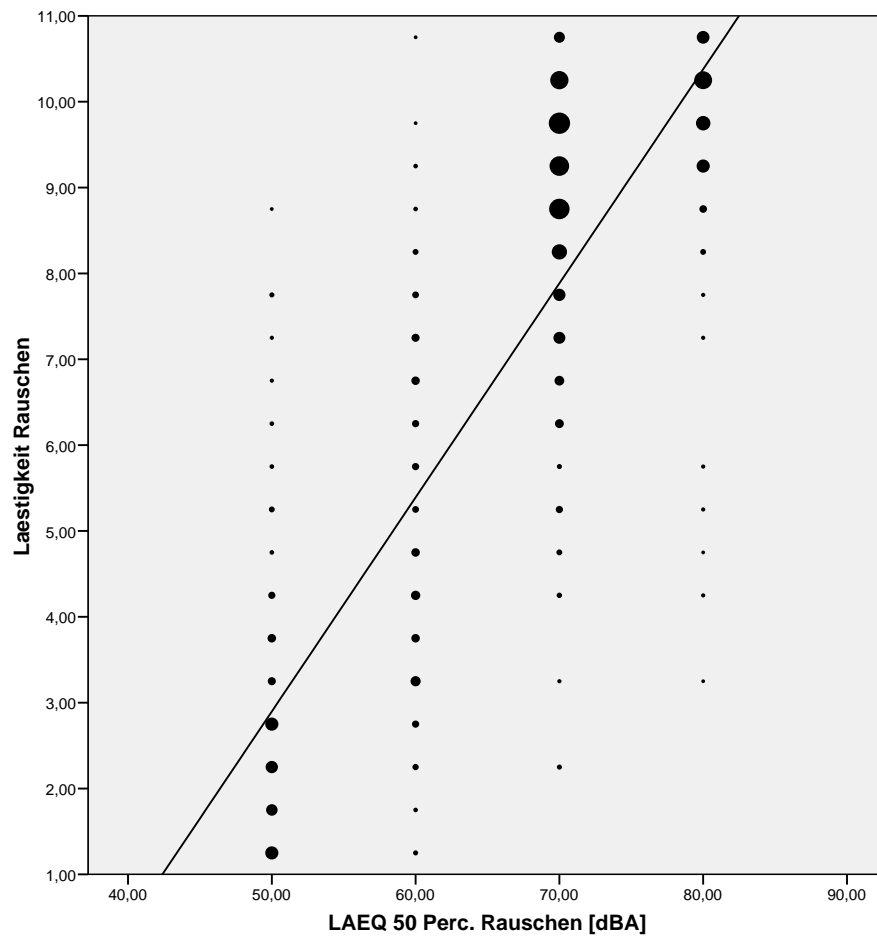


Abbildung 92: Lineare Regression für den Bereich Rauschen: Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale in Abhängigkeit des $L_{A,eq}$ (Studienphase 3, N = 171); Adj. $R^2 = 0,811$

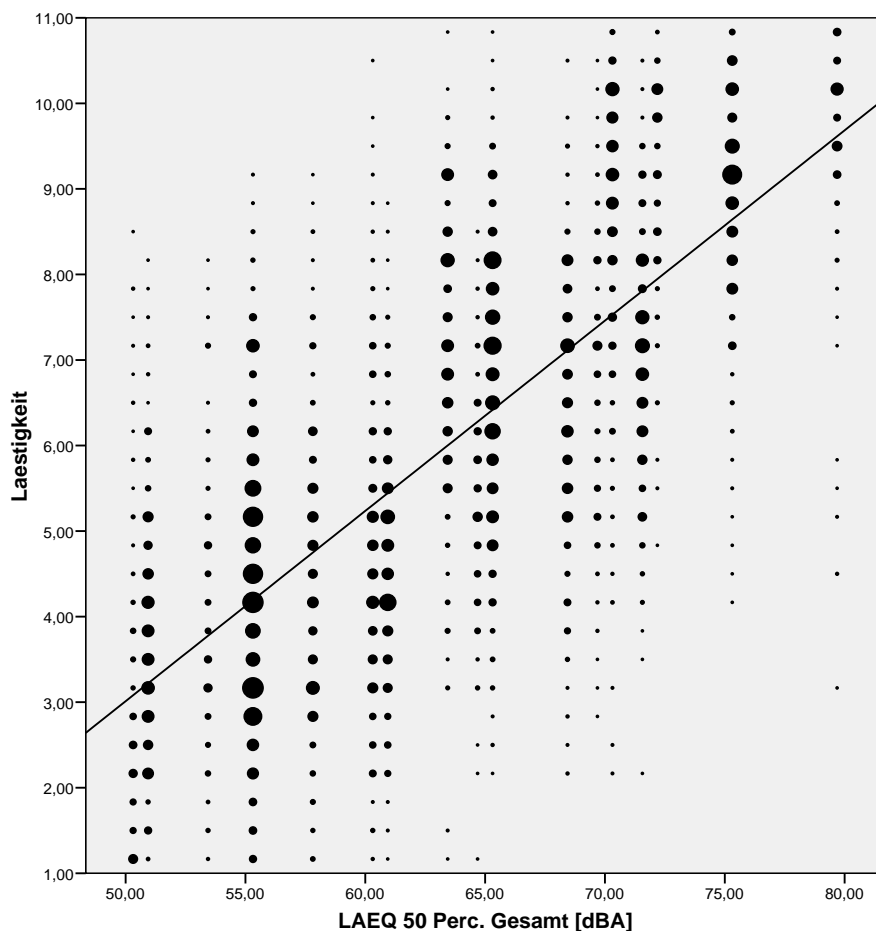


Abbildung 93: Lineare Regression für alle Soundsamples: Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale in Abhängigkeit des $L_{A,eq}$ (Studienphase 3, $N = 171$); Adj. $R^2 = 0,672$

Über alle Bewertungen erklärte der $L_{A,eq}$ 67,2% der Varianz der Lästigkeitsurteile (Adj. R^2) auf der Personal Noise Ranking Scale. Dieser Einfluss kann als statistisch signifikant bezeichnet werden ($p < 0,001$). Betrachtet man nur die Straßenverkehrsgeräusche beträgt dieser Einfluss 73,8% ($p < 0,001$), während für Schienenverkehrsgeräusche 70,1 % der Varianz der Bewertungen durch den $L_{A,eq}$ erklärt werden können ($p < 0,001$). In der Kategorie Rauschen liegt dieser Wert bei 81,1% ($p < 0,001$). Während der Einfluss des $L_{A,eq}$ der Geräusche auf die Lästigkeitsbeurteilungen für Straßen- und Schienenverkehrsgeräusche auf einem ähnlichen Niveau liegen, ist er für das Rauschen deutlich erhöht. Dies ist vor allem auf die großen Unterschiede der Schalldruckpegel in Bezug auf die einzelnen Geräusche zurückzuführen. Dadurch ergeben sich große Unterschiede in den subjektiven Lästigkeitsbewertungen.

In einem weiteren Schritt wurden mittels linearer Regressionsanalysen die subjektiven Ergebnisse der Versuchspersonen in Abhängigkeit der einzelnen psychoakustischen Parameter untersucht. Die Lästigkeit der Personal Ranking Scale entspricht der abhängigen Variable oder Zielvariable und die psychoakustischen Größen den unabhängigen Variablen. Um die unterschiedlichen Bewertungen der Proban-

den auch hier in eine einheitliche Form zu bringen, erfolgte ebenso eine Zentrierung auf den Mittelwert der subjektiven Lästigkeitsurteile der einzelnen ProbandInnen. Die folgenden Abbildungen zeigen nur jene Streudiagramme mit signifikanten Ergebnissen.

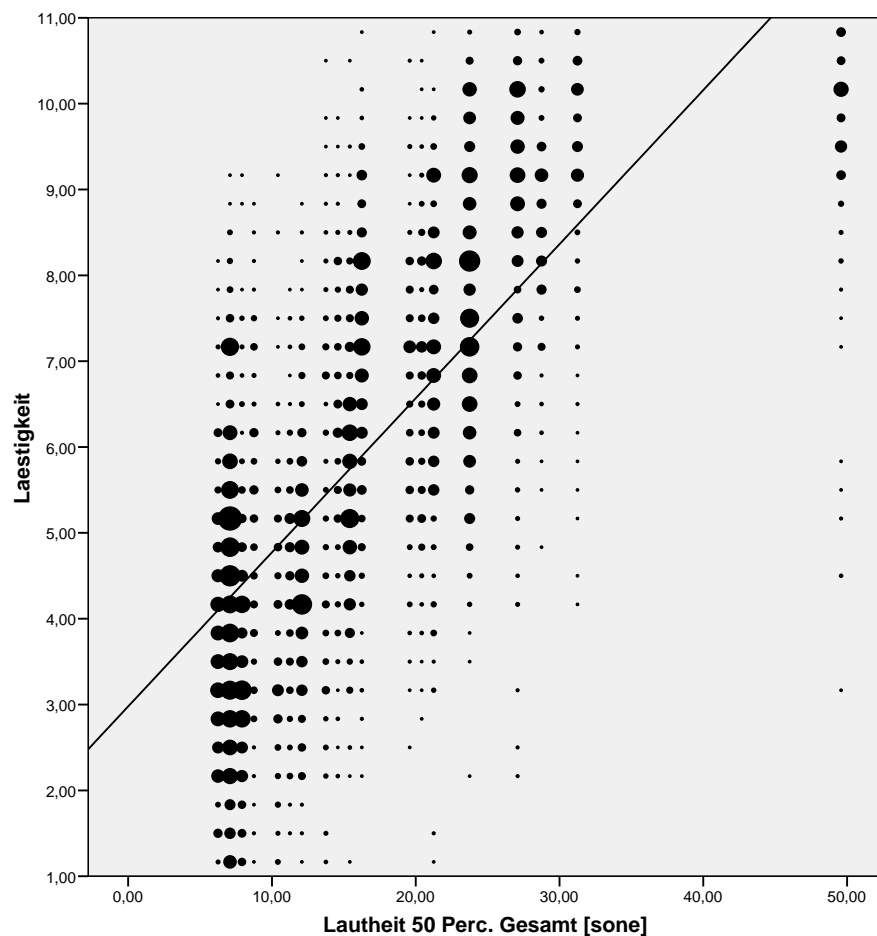


Abbildung 94: Lineare Regression für alle Soundsamples: Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale in Abhängigkeit der Lautheit (Studienphase 3, N = 171); Adj. R^2 = 0,722

Die Varianz der subjektiven Lästigkeit (Adj. R^2) wird durch den Parameter Lautheit zu 72,2% erklärt ($p < 0,001$). Dieser Wert ist im Vergleich mit dem $L_{A,eq}$ um 5%-Punkte höher.

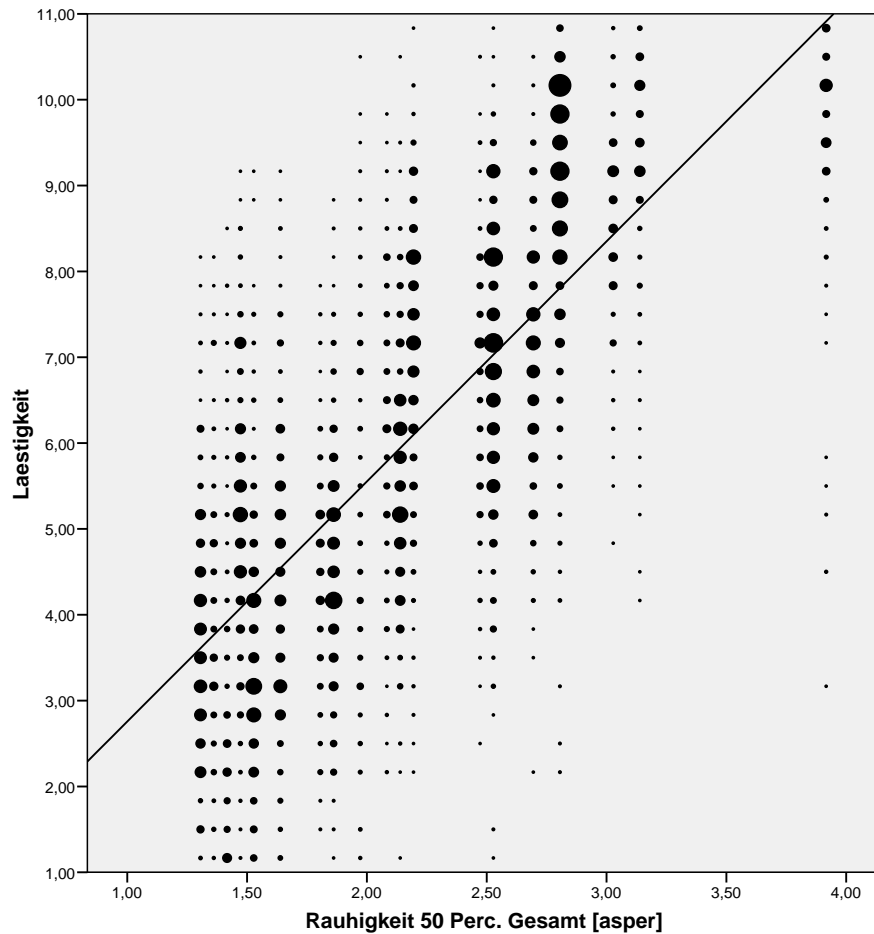


Abbildung 95: Lineare Regression für alle Soundsamples: Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale in Abhängigkeit der Rauhigkeit (Studienphase 3, N = 171); Adj. $R^2 = 0,721$

Die Varianz der subjektiven Lästigkeit (Adj. R^2) wird zu 72,1% durch den Parameter Rauhigkeit erklärt ($p < 0,001$). Aufgrund der Kollinearität der Parameter Rauhigkeit und Lautheit ist dieser Einfluss jedoch in weiter Folge in Bezug auf die multivariate Modellbildung statistisch nicht relevant.

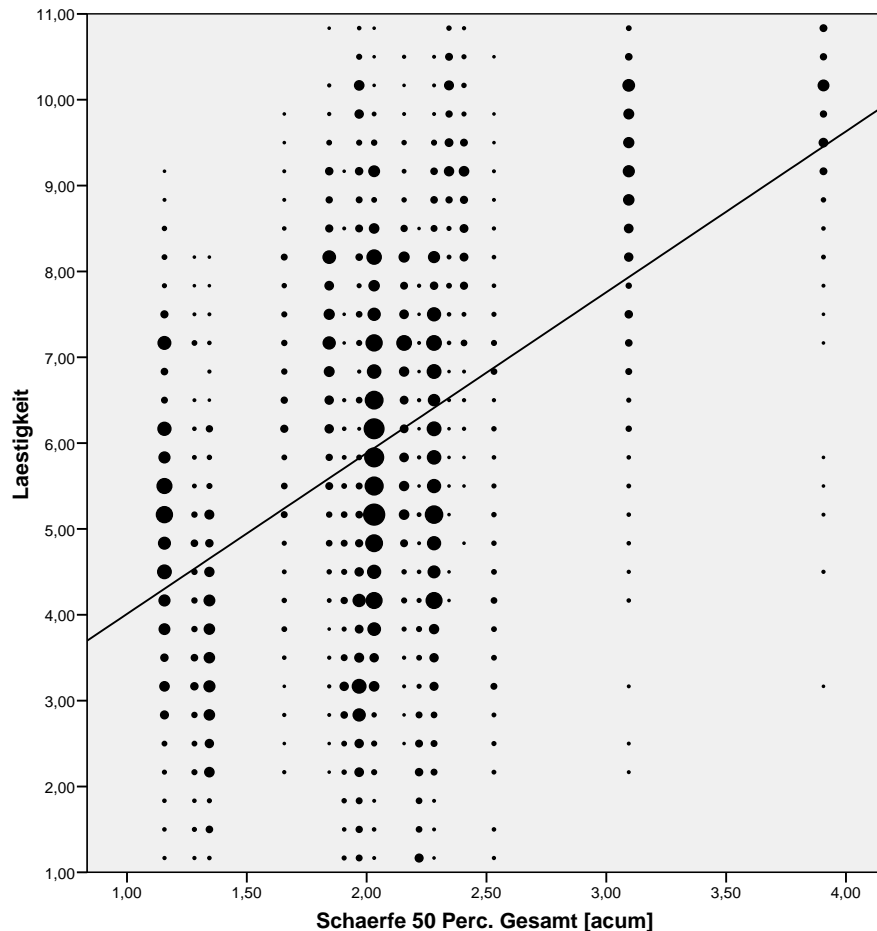


Abbildung 96: Lineare Regression für alle Soundsamples: Lästigkeitsbewertung auf der Personal Noise Ranking Scale in Abhängigkeit der Schärfe (Studienphase 3, N = 171); Adj. R^2 = 0,328

Die Varianzerklärung der subjektiven Lästigkeit (Adj. R^2) durch den Parameter Schärfe beträgt 32,8% ($p < 0,001$). Als singulärer Parameter hat dieser Parameter auf das Gesamtergebnis in dieser Studienphase keine weitere Relevanz. Die ebenso untersuchten Parameter Tonhaltigkeit und Schwankungsstärke haben keinen signifikanten Einfluss ergeben.

In einem abschließenden Schritt wurden alle Kombinationen der psychoakustischen Parameter im Zuge einer multiplen linearen Regressionsanalyse detailliert untersucht. Zusätzlich wurde auch der Parameter Tieffrequente Schwankungsstärke (LFFS) in der statistischen Analyse berücksichtigt. In der Tabelle 13 sind die relevantesten Ergebnisse der einfachen und multiplen linearen Regressionsanalyse zusammenfassend dargestellt. Das Modell mit der höchsten Varianzerklärung (Adj. R^2) von 76,7% besteht aus dem psychoakustischen Vektor mit den Parametern Lautheit, Schärfe und Tieffrequente Schwankungsstärke.

Tabelle 13: Ergebnisse Studienphase 3 (N = 171) der einfachen & multiplen lineare Regressionsanalyse

Modell Studienphase 3:		
Lästigkeit (PNRS) vs. akustische Parameter	Adj. R²	p-value
Lästigkeit in Abhängigkeit des $L_{A,eq}$	0,672	< 0,001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil)	0,722	< 0,001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil), der Tieffrequente Schwankungsstärke (LFFS) und der Schärfe (50. Perzentil)	0,767	< 0,001

5.2.2 Lineare Regressionsanalyse auf Basis Handkraftdynamometer

Abbildung 97 zeigt die lineare Regression zwischen dem $L_{A,eq}$ der Geräuschsamples und der Lästigkeitsbewertung mittels Handkraftdynamometer. Während die schwarze Linie die Regression über alle Geräusche zeigt, werden die Regressionsgeraden für Straßenverkehrslärm, Schienenverkehrslärm und Rauschen farbig dargestellt. Die geringe Varianzerklärung ist auf die u.a. theoretisch unendlich große Anzahl von Lästigkeitsbewertung mittels Handkraftdynamometer zurückzuführen. Demensprechend hat diese Methode der Lästigkeitsbewertung in weiterer Folge keine Relevanz in der Modellbildung gefunden.

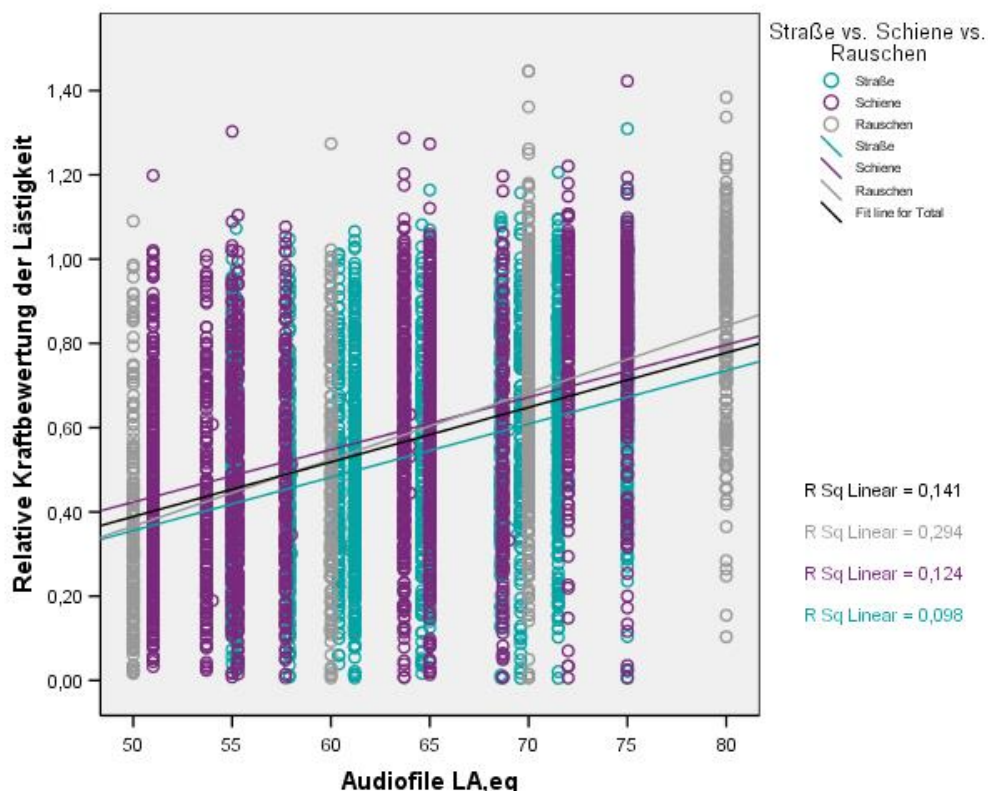


Abbildung 97: Lineare Regression zwischen der relativen Handkraftbewertung der Lästigkeit und dem LA_{eq} der Geräusche (Studienphase 3, N = 171)

5.2.3 MDS-Urteilsraums – Lineare und nichtlineare Regressionsanalyse

Die 30 ProbandInnen mussten in diesem subjektiven Hörversuch die verschiedenen Geräuschsamples auf ihre Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit bewerten. Daraus entstand für alle ProbandInnen eine sogenannte Distanzmatrix. Diese wurde in einem nachgelagerten Schritt solange angepasst, bis das Optimum des Gütekriteriums (STRESS-Wert) in einem iterativen Prozess erreicht wurde. Anschließend wurden die psychoakustischen Parameter (Lautheit, Schärfe und tieffrequente Schwankungsstärke), welche schon bei der multiplen Regressionsanalyse eine relevante Rolle spielten, für die einzelnen Geräuschensembles herangezogen und auf Basis dieser Werte wurde eine multiple lineare und nichtlineare (mit einer logistischen Funktion) Regressionsanalyse berechnet. In beiden Fällen liegt die Varianzerklärung in dem Bereich um 65% (siehe Abbildung 98, Abbildung 99 und Tabelle 14). In den beiden nachfolgenden Abbildungen ist exemplarisch jeweils der Medianwert der Geräuschsamples des finalen psychoakustischen Vektors in Abhängigkeit der Regressionsfunktion abgebildet. Es zeigt sich auf Basis dieser Ergebnisse, dass diese neuartige Methodik der Bewertung der Lästigkeit in der Lärmwirkungsforschung, aufgrund der mehrdimensionalen Betrachtung der Geräuschsamples, einen weiter zu verfolgenden Ansatz darstellt.

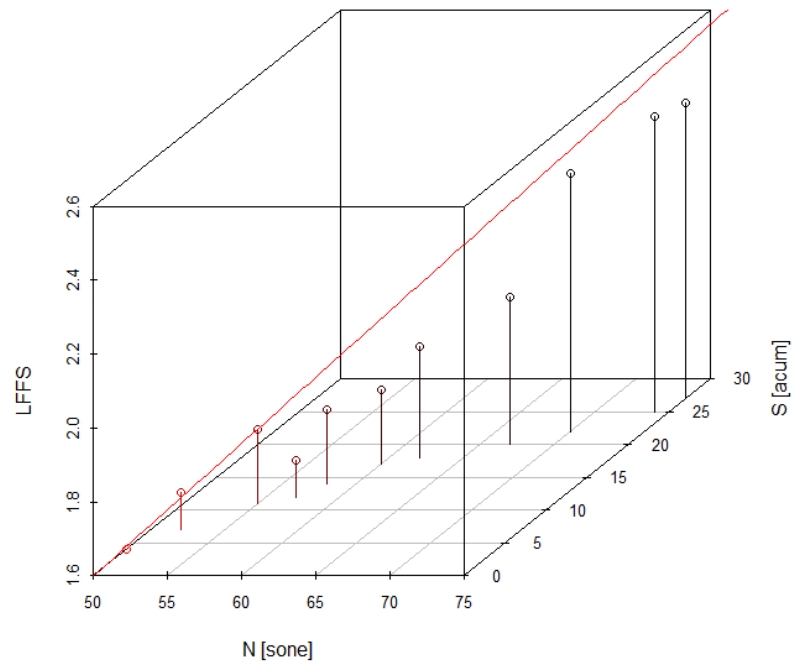


Abbildung 98: Multiple lineare Regression der Ergebnisse aus der Multidimensionalen Skalierung für die relevanten psychoakustischen Parameter Lautheit, Schärfe und LFFS (Studienphase 3, N = 30); Adj. $R^2 = 0,672$

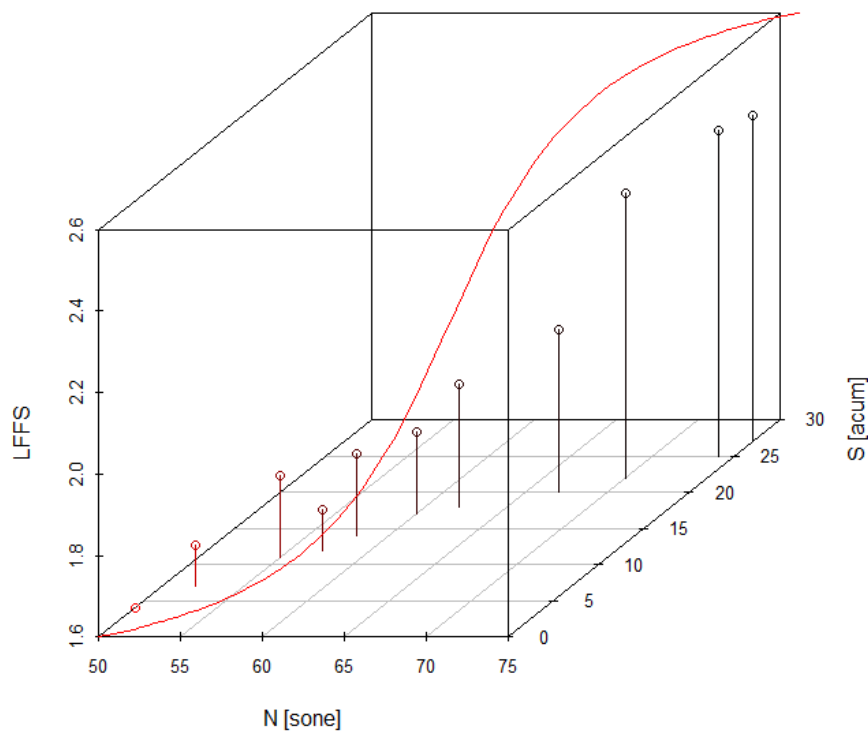


Abbildung 99: Multiple nichtlineare (logistische) Regression der Ergebnisse aus der Multidimensionalen Skalierung für die relevanten psychoakustischen Parameter Lautheit, Schärfe und LFFS (Studienphase 3, N = 30); Adj. $R^2 = 0,631$

Tabelle 14: Ergebnisse Studienphase 3 (N = 30) der multidimensionalen Skalierung

Modell Studienphase 3 – Multidimensionale Skalierung: Lästigkeit (PNRS) vs. akustische Parameter	Adj. R²	p-value
Lästigkeit (lineare Funktion) in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil), der Tieffrequente Schwankungsstärke (LFFS) und der Schärfe (50. Perzentil)	0,672	< 0,001
Lästigkeit (logistische Funktion) in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil), der Tieffrequente Schwankungsstärke (LFFS) und der Schärfe (50. Perzentil)	0,631	< 0,001

5.3 Ergebnisse Studienphase 1 der Modellbildung

Im Rahmen der statistischen Analyse wurde, wie in Studienphase 3, ein sequentieller Ansatz verfolgt, wobei psychoakustische Parameter sowohl einzeln als auch in Kombination mit den subjektiven Ergebnissen der Versuchspersonen auf Grundlage der Personal Noise Scale (PNRS) untersucht und analysiert wurden. Hierbei fungierte die Lästigkeit als die abhängige Variable oder Zielvariable, während die psychoakustischen Größen als unabhängige Variablen betrachtet wurden. In der ersten Untersuchung wurde die Lästigkeit in Bezug auf den psychoakustischen Parameter Lautheit analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass 75,3% der Varianz der subjektiven Lästigkeit (Bestimmtheitsmaß) durch den Parameter Lautheit erklärt werden können. Die Streuung bei der Lästigkeit resultiert aus unterschiedlichen Bewertungen der Probanden, die ihre Einschätzungen in verschiedenen Teilbereichen der Intervallskala abgaben. Zur Standardisierung dieser unterschiedlichen Bewertungen erfolgte eine Zentrierung auf den Mittelwert der subjektiven Lästigkeitsurteile, auf den sich auch das Ergebnis bezieht. Unter Verwendung dieser zentrierten Daten wurde eine sogenannte "teilnormierte" lineare Regressionsanalyse der Lästigkeit durchgeführt, die sowohl von der Lautheit als auch von allen weiteren psychoakustischen Parametern abhängt.

Die Lautheit ist der Parameter mit dem größten signifikanten Einfluss auf die Lästigkeit. Alle Fahrzeugensembles auf Beton haben die mit Abstand höchsten Lautheitswerte. Dann folgen die Ensembles auf Asphaltbeton und die geringste Lautheit weisen die Ensembles auf SMA auf. Im Hinblick auf die Anzahl der Fahrzeuge pro Geräuschsample (Indikator für die Verkehrsstärke) ergibt sich eine positive Korrelation zwischen der Verkehrsbelastung in Form der Anzahl der Fahrzeuge pro Geräuschsample und der objektiven Lautheit – mit steigender Verkehrsbelastung steigt auch die Lautheit. Die verschiedenen Geschwindigkeitsprofile verhalten sich äquivalent, je höher die Geschwindigkeit der Fahrzeuge desto höher die Lautheit. Das Fahrzeugensemble mit der Lärmschutzwand, welches schon subjektiv als am wenigsten lästig empfunden wurde, hat auch objektiv die geringste Lautheit. Um Bezug auf die Problemstellung der Dissertation zu nehmen, wurde der A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel ($L_{A,eq}$) als Vergleichsparameter zu den psychoakustischen Größen untersucht. Als Ergebnis ist

hier festzuhalten, dass 70,1% der Varianz der subjektiven Lästigkeit mit dem $L_{A,eq}$ erklärt werden können. Daran ist anzumerken, dass schon die Lautheit als einzelner Parameter einen größeren Teil der Varianz der Lästigkeit beschreibt, als der A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel. Das Bestimmtheitsmaß für den Parameter Rauigkeit zeigt, dass 72,2% der Varianz der Lästigkeit mit der Rauigkeit erklärt werden können. In weiterer Folge relativiert sich jedoch dieses Ergebnis bei der multiplen linearen Regression (negativer B-Koeffizient), weil es eine Kollinearität mit der Lautheit gibt. Der Parameter Schwankungsstärke hat bei den hier verwendeten Geräuschspektren keinen Einfluss auf die Lästigkeit. Ebenso hat auch die Tonhaltigkeit keinen Einfluss auf die Lästigkeit.

Bei der Untersuchung der Lästigkeit in Abhängigkeit der Lautheit und des Lautheitsüberschusses LKW-PKW (LUS) werden 76,6% der Varianz durch diese beiden Parameter gemeinsam erklärt. Damit ist neben der Lautheit der Lautheitsüberschuss LKW-PKW der zweite signifikant beschreibende Parameter für die Lästigkeit. Bei der Kombination von trockenen und nassen Fahrbahnoberflächen, wie in unserer Analyse, erhöht sich die Relevanz des psychoakustischen Parameters Schärfe im Verhältnis zu den anderen Parametern überproportional zu. Bei der Untersuchung der Lästigkeit in Abhängigkeit der Lautheit und Schärfe werden 84,1% der Varianz durch diese beiden Parameter gemeinsam erklärt. Damit erklärt die Schärfe unter den Randbedingungen der Studienphase die Varianz der Lästigkeit signifikant besser. Auch nach Analyse und Auswertung der multiplen linearen Regression ergaben die Koeffizienten für alle drei vorher beschriebenen Parameter einen hoch signifikanten Einfluss. Für die Lästigkeit in Abhängigkeit der Lautheit, Schärfe und des Lautheitsüberschusses LKW-PKW werden 86,3% der Varianz durch diese drei Parameter gemeinsam erklärt. Damit ist neben der Lautheit und dem Lautheitsüberschuss LKW-PKW die Schärfe der dritte signifikant beschreibende Parameter für die Lästigkeit in der Studienphase 1. Der Lautheitsüberschuss als signifikanter Parameter ist jedoch nur unter den hier beschriebenen Randbedingungen eines synthetisch generierter Geräuschsamples berechenbar und kann somit nur als Laborparameter Anwendung finden. In der nachfolgenden Tabelle ist eine Gesamtübersicht der signifikanten Modellergebnisse abgebildet.

Tabelle 15: Ergebnisse Studienphase 1 (N = 135) der einfachen & multiplen linearen Regressionsanalyse

Modell Studienphase 1:		
Lästigkeit (PNRS) vs. akustische Parameter	Adj. R²	p-value
Lästigkeit in Abhängigkeit des $L_{A,eq}$	0,701	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil)	0,753	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil) und des Lautheitsüberschuss LKW-PKW (LUS)	0,766	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil), des Lautheitsüberschuss LKW-PKW (LUS) und der Schärfe (50. Perzentil)	0,863	< 0.001

5.4 Ergebnisse Studienphase 2 der Modellbildung

Auch in der Studienphase 2 wurde die gleiche methodische Vorgehensweise wie in der Studienphase 1 gewählt.

Die Ergebnisse zeigen, dass 71,1% der Varianz der subjektiven Lästigkeit (Bestimmtheitsmaß) durch den Parameter Lautheit erklärt werden können. Weiters ist hier festzuhalten, dass 65,3% der Varianz der subjektiven Lästigkeit mit dem $L_{A,eq}$ erklärt werden können. Auch in dieser Studienphase zeigt sich, dass schon die Lautheit als einzelner Parameter einen größeren Teil der Varianz der Lästigkeit beschreibt, als der A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel. Das Bestimmtheitsmaß für den Parameter Rauigkeit zeigt, dass 68,4% der Varianz der Lästigkeit mit der Rauigkeit erklärt werden können. In weiterer Folge relativiert sich jedoch auch dieses Ergebnis bei der multiplen linearen Regression (negativer B-Koeffizient), weil es eine Kollinearität mit der Lautheit gibt. Der Parameter Schwankungsstärke hat bei den hier verwendeten Geräuschspektren keinen Einfluss auf die Lästigkeit. Ebenso hat auch die Tonhaltigkeit keinen Einfluss auf die Lästigkeit.

Bei der Untersuchung der Lästigkeit in Abhängigkeit der Lautheit und der tieffrequenten Schwankungsstärke (LFFS) werden 74,2% der Varianz durch diese beiden Parameter gemeinsam erklärt. Für die Lästigkeit in Abhängigkeit der Lautheit, Schärfe und der tieffrequenten Schwankungsstärke werden 79,7% der Varianz durch diese drei Parameter gemeinsam erklärt. Damit ist neben der Lautheit und der LFFS die Schärfe der dritte signifikant beschreibende Parameter für die Lästigkeit in der Studienphase 2. In der nachfolgenden Tabelle ist eine Gesamtübersicht der signifikanten Modellergebnisse abgebildet.

Tabelle 16: Ergebnisse Studienphase 2 (N = 50) der einfachen & multiplen linearen Regressionsanalyse

Modell Studienphase 2: Lästigkeit (PNRS) vs. akustische Parameter	Adj. R²	p-value
Lästigkeit in Abhängigkeit des $L_{A,eq}$	0,653	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil)	0,711	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil) und Tieffrequente Schwankungsstärke (LFFS)	0,742	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil), der Tieffrequente Schwankungsstärke (LFFS) und der Schärfe (50. Perzentil)	0,797	< 0.001

In der Studienphase 2 wurden auch umfangreiche Erhebungen der Fahrzeugmerkmale, wie in Kapitel 3 beschrieben, der gemessene LKW durchgeführt. Es galt die gesammelten Daten der Befragung mit den in den Laborversuchen untersuchten psychoakustischen Parametern in Beziehung zu setzen. Es

wurde eine multiple lineare Regressionsanalyse der Fahrzeugeigenschaften mit dem $L_{A,eq}$ und der Lautheit durchgeführt. Für diese Analyse mussten die Daten der Befragung vorab aufbereitet werden, um sinnvolle Ergebnisse gewährleisten zu können. Vor allem die Verarbeitung der Profiltiefen stellte insofern eine Herausforderung dar, als dass die Profiltiefen zusammengefasst werden mussten, was das Risiko in sich barg, Informationen zu verlieren. Schlussendlich fanden drei Profiltiefenklassen pro LKW Eingang in die weitere Analyse:

- arithmetische Mittel aller Profiltiefen
- arithmetische Mittel der Profiltiefen der Antriebsachse
- arithmetische Mittel der Profiltiefen der Lenkachse

Des Weiteren wurden Geschwindigkeit, Hubraum, Leistung, Gesamtabrollfläche, LKW-Art und Reifenanzahl für die Analyse herangezogen.

Bei der multiplen Regressionsanalyse wurden alle oben genannten Eigenschaften miteinbezogen und anschließend jene Variablen ausgeschlossen, welche einen zu gering ausgeprägten Einfluss auf die Schallemissionen der LKW hatten. Es ergab sich ein Bestimmtheitsmaß von 57,8%, wobei jedoch aufgrund der negativen Koeffizienten die Güte des Gesamtmodells dieses Ergebnis nicht verifizieren kann. In unserem Fall war speziell der Einfluss der Profiltiefen von besonderem Interesse. Ebenso zeigt sich, dass der $L_{A,eq}$ mit größerer Reifenanzahl zunimmt, während er mit größerer Profiltiefe der Reifen auf der Antriebsachse sinkt. Beim Zusammenhang von $L_{A,eq}$ in Abhängigkeit der Profiltiefe der Lenkachse errechnete sich ein Bestimmtheitsmaß von 44,8%. Ein ebenso relevantes Ergebnis ergab die Beziehung zwischen $L_{A,eq}$ und Geschwindigkeit mit einem Bestimmtheitsmaß von 57,3%. Die Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse von allen Fahrzeugeigenschaften in Abhängigkeit des Parameters Lautheit stellen sich ähnlich dar wie jene in Bezug auf den $L_{A,eq}$. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 54,2%, jedoch aufgrund der negativen Koeffizienten der Güte ebenso nicht verifizierbar.

5.5 Ergebnisse Studienphase 4 der Modellbildung

In der Studienphase 4 wurden die subjektiven Ergebnisse der Lästigkeitsbewertungen der ProbandInnen herangezogen und in Zusammenhang mit den objektiv gemessenen und berechneten akustischen Parametern aus den Messungen von der Fensterfront in Korrelation gebracht. Die objektiven Messergebnisse aus dem Wohnbereich der ProbandInnen haben ein sehr diffuses Bild in Bezug auf die akustischen Parameter gezeigt. Dies ist auf die Umgebungsgeräusche in den Innenräumen bei den ProbandInnen zurückzuführen. Darum wurden diese Daten in weiterer Folge nicht mehr für die Modellbildung verwendet.

Die Ergebnisse zeigen, dass 60,3% der Varianz der subjektiven Lästigkeit (Bestimmtheitsmaß) durch den Parameter Lautheit erklärt werden können. Weiters ist hier festzuhalten, dass 57,3% der Varianz der subjektiven Lästigkeit mit dem $L_{A,eq}$ erklärt werden können. Auch in dieser Studienphase zeigt sich, dass schon die Lautheit als einzelner Parameter einen größeren Teil der Varianz der Lästigkeit beschreibt, als der A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel. Diese Werte sind zwar deutlich geringer als die Laborergebnisse, zeigen jedoch das gleiche Verhalten was Schalldruckpegel und Laut-

heit betreffen. Die geringere Varianzerklärung ist auf mehrere Merkmalsausprägungen zurückzuführen. Die Hauptfaktoren sind das Design des Hörversuches, die Hörversuchsumgebung (Labor vs. Feld) und die Aufnahmen inkl. Umgebungsgeräusche. Für die Lästigkeit in Abhängigkeit der Lautheit, Schärfe und der tieffrequenten Schwankungsstärke werden 62,4% der Varianz durch diese drei Parameter gemeinsam erklärt. Damit ist neben der Lautheit und der LFFS die Schärfe der dritte signifikant beschreibende Parameter für die Lästigkeit in der Studienphase 4. Es zeigt sich somit in allen Studienphasen ein gleiches Muster, was den relevanten psychoakustischen Parametervektor zur Erklärung der subjektiven Lästigkeit betrifft. In der nachfolgenden Tabelle ist eine Gesamtübersicht der signifikanten Modellergebnisse aus der Studienphase 4 abgebildet.

Tabelle 17: Ergebnisse Studienphase 4 (N = 16) der einfachen & multiplen linearen Regressionsanalyse

Modell Studienphase 4: Lästigkeit (PNRS) vs. akustische Parameter	Adj. R²	p-value
Lästigkeit in Abhängigkeit des $L_{A,eq}$	0,573	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil)	0,603	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil), der Tieffrequente Schwankungsstärke (LFFS) und der Schärfe (50. Perzentil)	0,624	< 0.001

5.6 Zusammenfassung Ergebnisse Studienphase 1 bis 4 der Modellbildung

In der nachfolgenden Tabelle sind nochmal alle relevanten Ergebnisse der 4 verschiedenen Studienphasen als gesamte Übersicht abgebildet.

Tabelle 18: Ergebnisse Studienphasen 1 bis 4 (N = 402) der einfachen & multiplen linearen Regressionsanalyse

Modell Studienphase 1: Labor Straße		
Lästigkeit (PNRS) vs. akustische Parameter	Adj. R²	p-value
Lästigkeit in Abhängigkeit des L _{A,eq}	0,701	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil)	0,753	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil) und des Lautheitsüberschuss LKW-PKW (LUS)	0,766	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil), des Lautheitsüberschuss LKW-PKW (LUS) und der Schärfe (50. Perzentil)	0,863	< 0.001
Modell Studienphase 2: Labor Straße Fokus LKW		
Lästigkeit (PNRS) vs. akustische Parameter	Adj. R²	p-value
Lästigkeit in Abhängigkeit des L _{A,eq}	0,653	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil)	0,711	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil) und Tieffrequente Schwankungsstärke (LFFS)	0,742	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil), der Tieffrequente Schwankungsstärke (LFFS) und der Schärfe (50. Perzentil)	0,797	< 0.001
Modell Studienphase 3: Labor Straße und Schiene		
Lästigkeit (PNRS) vs. akustische Parameter	Adj. R²	p-value
Lästigkeit in Abhängigkeit des L _{A,eq}	0,672	< 0,001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil)	0,722	< 0,001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil), der Tieffrequente Schwankungsstärke (LFFS) und der Schärfe (50. Perzentil)	0,767	< 0,001
Modell Studienphase 4: Feld Straße und Schiene		
Lästigkeit (PNRS) vs. akustische Parameter	Adj. R²	p-value
Lästigkeit in Abhängigkeit des L _{A,eq}	0,573	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil)	0,603	< 0.001
Lästigkeit in Abhängigkeit Lautheit (50. Perzentil), der Tieffrequente Schwankungsstärke (LFFS) und der Schärfe (50. Perzentil)	0,624	< 0.001

5.7 Ergebnisse der Zielgrößenmodellierung (TNA_R)

Um die Modellergebnisse der kombinatorischen Analyse der subjektiven Hörversuchsergebnisse und der objektiven psychoakustischen Parameter in einer Zielgröße zusammenzufassen und in einen Zusammenhang mit dem Schalldruckpegel zu bringen, wurde folgende Vorgehensweise gewählt. Es wurden exemplarisch für die Studienphase 3 in einem ersten Schritt die Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse mit den drei signifikanten psychoakustischen Parametern herangezogen. In einem zweiten Schritt wurden für diese drei Parametern (Lautheit, Schärfe und tieffrequente Schwankungsstärke (LFFS)) die standardisierten Beta-Koeffizienten der Regressionsanalyse, als Anteil der Varianzerklärung am Bestimmtheitsmaß, extrahiert und anteilig in eine Kenngröße mit der Nomenklatur TNA_R zusammengefasst. Anschließend wurde die Ergebnisse der Hörversuche auf Basis der PNRS mit den TNA_R Werten in einen funktionalen Zusammenhang gebracht. Dabei wurde die Ergebnisse auf ganzzahlige Werte normiert, um eine vereinfachtes Skalenniveau für den TNA_R zu erhalten. Abschließend wurde mittels einer nachgelagerten Regressionsanalyse der funktionale Zusammenhang zwischen dem Schalldruckpegel und dem sogenannten TNA_R ermittelt, d.h. wenn für ein zukünftiges Geräuschsample ein Messergebnis für den Schalldruckpegel gibt, kann über die Regressionsfunktion der dazugehörige TNA_R Wert ermittelt werden. Es hat sich gezeigt, dass dieser finale Zusammenhang bei einer nichtlinearen Funktion eine höher Varianzerklärung zeigt, als bei einer linearen Funktion. Diese Ergebnisse sind natürlich und den hier definierten Rahmenbedingungen zu sehen. Jedoch zeigt diese detaillierte Analyse und Vorgehensweise in Bezug auf die Integration psychoakustischer Parameter, dass diese Thematik eine sehr relevante Unterstützungsleistung in Bezug auf die Beschreibung der Lärmwirkung im Verkehrswesen darstellen kann. In den nachfolgenden Tabellen und den drei Abbildungen sind noch die Detailergebnisse der drei Regressionsanalysen angeführt.

Tabelle 19: Ergebnis Zielgrößenmodellierung der Studienphase 3

Modell Zielgröße Studienphase 3:		
Regression: $L_{A,eq}$ vs. TNA_R	Adj. R^2	p-value
$L_{A,eq}$ in Abhängigkeit von TNA_R – Lineare Funktion	0,720	< 0.001
$L_{A,eq}$ in Abhängigkeit von TNA_R – Arcustanges Funktion	0,743	< 0.001
$L_{A,eq}$ in Abhängigkeit von TNA_R – Logistische Funktion	0,768	< 0.001

5.7.1 Studienphase 3 - Lineare Regressionsanalyse

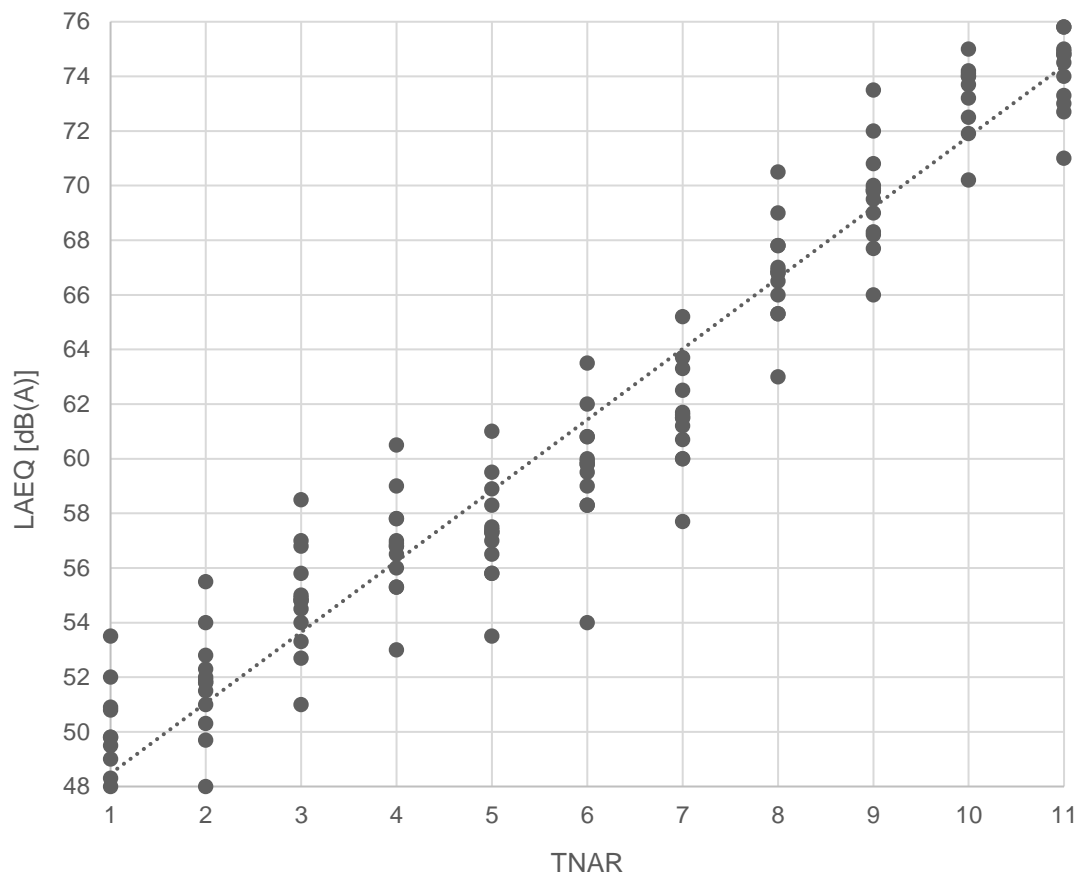


Abbildung 100: Ergebnis Zielgrößenmodellierung der Studienphase 3 der nichtlinearen Regressionsanalyse - Lineare-Funktion; Adj. $R^2 = 0,72$

5.7.2 Studienphase 3 - Nichtlineare Regressionsanalyse – Arcustangens Funktion

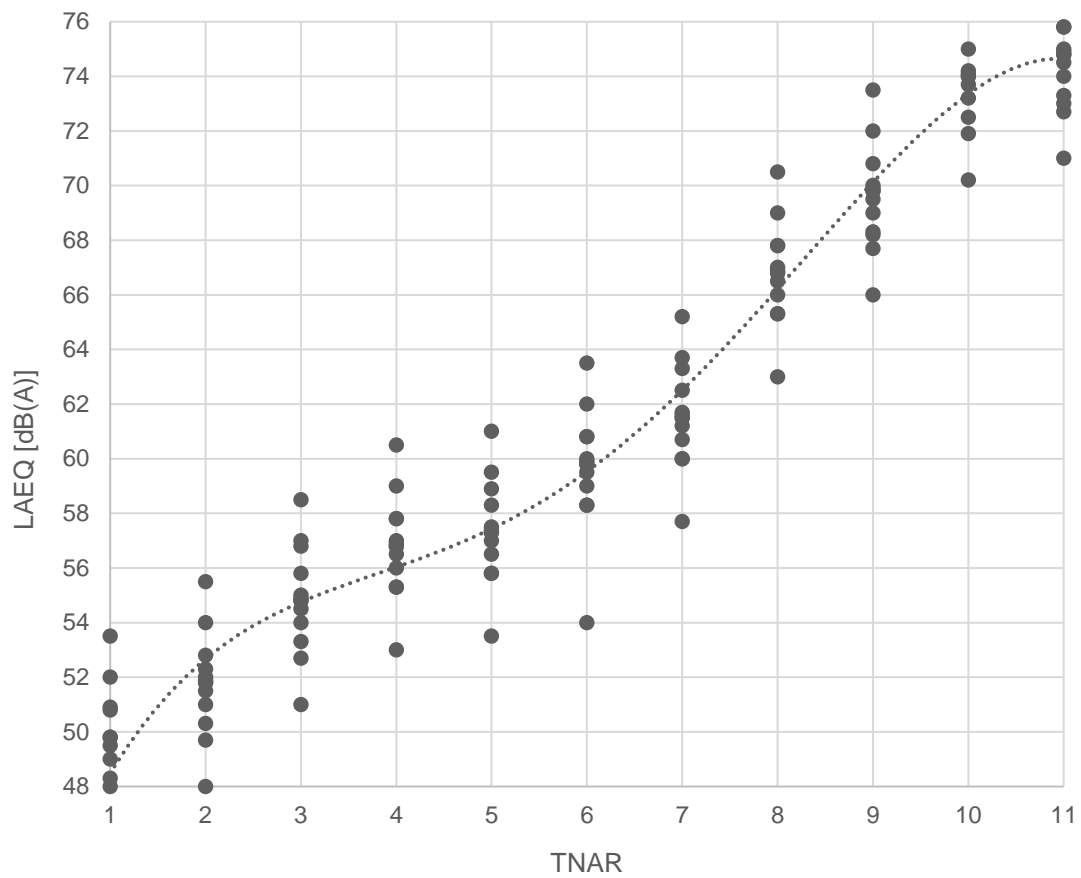


Abbildung 101: Ergebnis Zielgrößenmodellierung der Studienphase 3 der nichtlinearen Regressionsanalyse – Arcustangens Funktion; Adj. $R^2 = 0,743$

5.7.3 Studienphase 3 - Nichtlineare Regressionsanalyse – Logistische Funktion

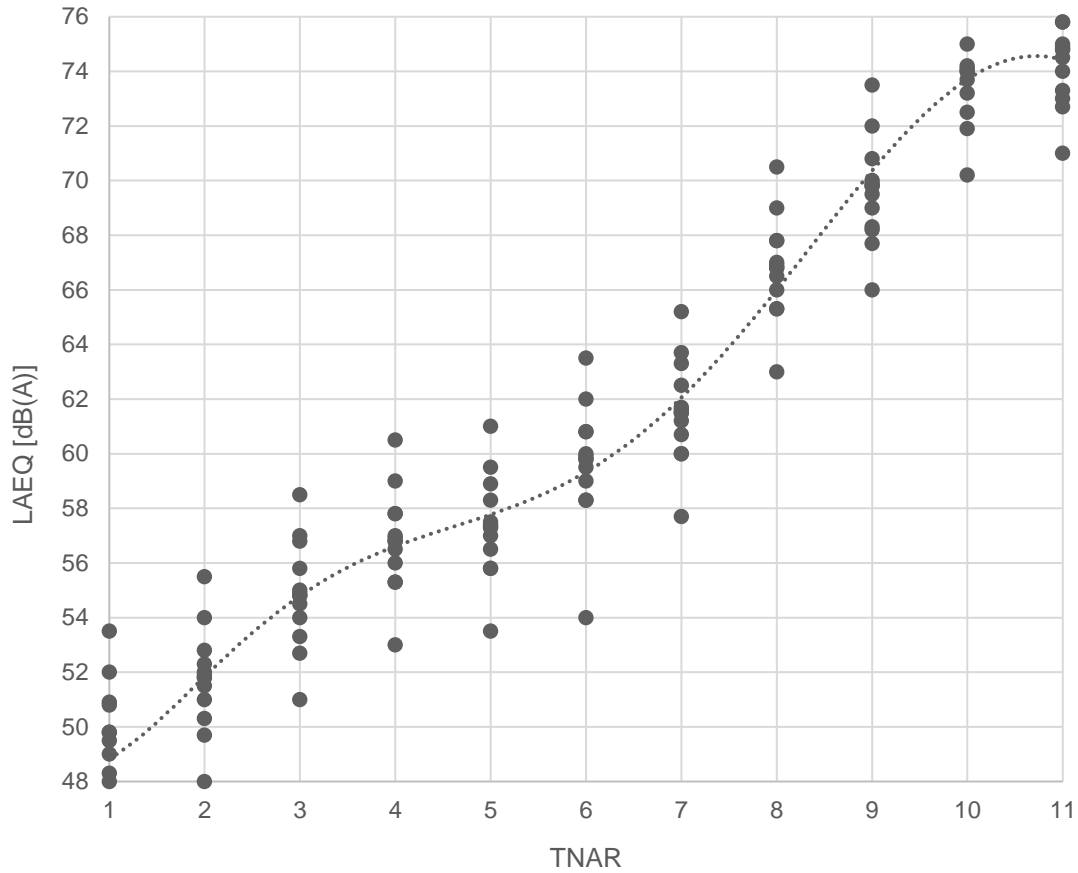


Abbildung 102: Ergebnis Zielgrößenmodellierung der Studienphase 3 der nichtlinearen Regressionsanalyse - Logistische Funktion; Adj. $R^2 = 0,768$

Die hier erzeugte Funktion (2) lässt sich auch wie folgt beschreiben:

$$TNA_{R,Phase3} = \frac{1}{0.01 + (b_1 \cdot N_{50} + b_2 \cdot S_{50} + b_3 \cdot LFFS) \cdot e^{-(b_1 \cdot N_{50} + b_2 \cdot S_{50} + b_3 \cdot LFFS)}} \quad (20)$$

Koeffizienten:

$$b_1 = 0.89; b_2 = 0.044; b_3 = 0.061$$

6 Fazit

Die Analyse von Lärm jeglicher Art ist ein komplexer Ablauf und bedarf mehrdimensionaler Betrachtungsweisen. Wenn sich Menschen in ihrer Umgebung durch Lärm belästigt fühlen und in Lärmgutachten mit dem A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel argumentiert, dann sind Missverständnisse und Probleme vorprogrammiert. Diese Arbeit hat sich genau diesem mehrdimensionalen Themenfeld gewidmet und versucht die Thematik der Lärmwirkung im Verkehrswesen mittels subjektiver und objektiver Merkmale in einer quantitativen Bewertung abzubilden.

6.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation verfolgte das Ziel, eine neuartige Bewertungs- und Berechnungsgröße zu entwickeln, die die subjektive Wirkung des Verkehrslärms auf den Menschen präziser abbildet als bestehende Größen. Zu diesem Zweck wurde in vier Studienphasen eine Zielgröße für Straßen- und Schienenverkehrslärm konzipiert.

Im Rahmen der empirischen Datenerhebung wurden binaurale Kunstkopfaudioaufnahmen von Einzelvorbeifahrten von Kraftfahrzeugen und Zügen auf homogenen Straßen- und Schienenabschnitten unter freier Schallausbreitung durchgeführt. In Summe wurde eine Datensatz mit 320 Stunden Audioaufnahmen in unterschiedlichen Merkmalsausprägungen erstellt. Diese Aufnahmen wurden in einer Geräuschdatenbank mit unterschiedlicher kategorialer Unterteilung (Fahrzeugtyp, Fahrbahnbelag, Geschwindigkeit usw.) zusammengefasst. Durch Audiosignalverarbeitung wurden synthetisch erzeugte Straßen- und Schienenverkehrslärmsamples erstellt, die mittels orthogonaler Versuchsplanung für die vier verschiedenen Studienphasen in experimentellen Versuchsplänen integriert wurden.

Diese Versuchspläne bildeten die Grundlage für psychoakustische Hörversuche mit 402 ProbandInnen. Dabei kamen drei verschiedene Bewertungsmethoden zum Einsatz: die Personal Noise Ranking Scale (PNRS) zur Lästigkeitsbewertung, Multidimensional Scaling (MDS) zur Ähnlichkeitsbewertung von Lärmsamples sowie die Handkraftmethode zur Lästigkeitsmessung. Parallel dazu erfolgte die Erfassung von Persönlichkeitsdaten (Sozio-Demographie, Audiometrie, Mehrdimensionale Befindlichkeit) und grundlegender Lärmempfindlichkeit der Probanden. Insgesamt wurden mehr als 500 Stunden Hörversuche im Labor durchgeführt.

Neben den subjektiven Bewertungen wurden objektive akustische Parameter der Lärmsamples berechnet, darunter $L_{A,eq}$ als Normparameter sowie die psychoakustischen Parameter Lautheit, Rauigkeit, Schärfe, Schwankungsstärke und Tonhaltigkeit. Zwei neue Parameter (Lautheitsüberschuss und tieffrequente Schwankungsstärke) auf Basis der Psychoakustik wurden entwickelt und implementiert.

Anhand der Hörversuchsergebnisse und der akustischen Parameter erfolgte eine umfassende statistische Modellbildung, einschließlich einfacher und multipler linearer sowie nichtlinearer Regressionsanalysen (logistische und Arkustangensfunktion) und Ähnlichkeitsstrukturanalysen auf Grundlage von Multidimensional Scaling.

Die Laborversuche führten bei einer multiplen nichtlinearen Regressionsanalyse mittels einer logistischen Funktion zu einer Bewertungsgröße mit signifikanten psychoakustischen Parametern, benannt als "Traffic Noise Annoyance on Roads and Rail," welche die subjektive Empfindung der Lästigkeit im

Laborbereich präziser beschreibt als der herkömmliche Parameter $L_{A,eq}$. Diese ist bei allen 3 Laborstudien zu sehen. Es hat sich gezeigt, dass dieser finale Zusammenhang bei einer nichtlinearen Funktion eine höher Varianzerklärung zeigt, als bei einer linearen Funktion.

Diese Ergebnisse sind natürlich und den hier definierten Rahmenbedingungen zu sehen. Jedoch zeigt diese detaillierte Analyse und Vorgehensweise in Bezug auf die Integration psychoakustischer Parameter, dass diese Thematik eine sehr relevante Unterstützungsleistung in Bezug auf die Beschreibung der Lärmwirkung im Verkehrswesen darstellen kann.

Abschließend wurde die im Labor entwickelte Bewertungsgröße und Untersuchungsmethodik in einer Feldstudie mit 16 ProbandInnen in deren Wohnumgebung angewendet und evaluiert. Auch hier zeigt sich, dass trotz unterschiedlicher Umgebungseinflüsse die Berechnungen mit den psychoakustischen Parametern zu einer höher Varianzerklärung als der $L_{A,eq}$ führen. Diese Ergebnisse sind insofern von hoher Relevanz, da sie im Labor und im Feld zu den gleichen Erkenntnissen führen.

6.2 Erkenntnisse

Das Thema der Lärmwirkung und Lärmmessung im Verkehrswesen wirft wichtige Aspekte auf, die die Notwendigkeit von Untersuchungen und Berücksichtigungen in Forschungen aber auch in der Gesellschaft und politischen Entscheidungen betonen [Fiebig et al. 2015]. Nachfolgend werden wesentliche Schlussfolgerungen dieser Dissertation aufgelistet:

- **Begrenzte Verwendung der A-Bewertung:** Die gängige Verwendung der A-Bewertung bei der Schalldruckpegelmessung vernachlässigt oft Frequenz- und Zeitbereiche von Signalen, die in einigen Fällen eine erhebliche Auswirkung auf die Lärmbelästigung haben können.
- **Unzureichende Berücksichtigung von psychoakustischen Parametern:** Obwohl es DIN-Normen für psychoakustische Parameter wie Lautheit und Schärfe gibt, werden diese häufig nicht angewendet. Dies steht im Widerspruch zu den tatsächlichen Lärmempfindungen der Menschen.
- **Kognitive und psychologische Aspekte werden oft ignoriert:** Bei Lärmbeschwerden wird häufig vernachlässigt, wie kognitive und psychologische Faktoren das Lärmempfinden beeinflussen können. Das individuelle Empfinden von Lärm ist komplex und nicht allein durch Schalldruckpegel zu erklären.
- **Unabhängige Lärmbeanstandungen:** Menschen reagieren auf Geräusche unabhängig von ihrem A-bewerteten Schalldruckpegel. Die Qualität des Lärms und individuelle Unterschiede in der Lärmbelästigung spielen eine entscheidende Rolle.
- **Herausforderungen bei der Vorhersage von Lästigkeit:** Die Überlagerung von mehreren Schallquellen und die Vorhersage psychoakustischer Größen sind nicht linear und erweisen sich als komplex.
- **Abstandsgesetz und Lästigkeit:** Das einfache Abstandsgesetz reicht nicht aus, um die Lästigkeit in Abhängigkeit von der Entfernung vorherzusagen, da viele andere Faktoren eine Rolle spielen.
- **Bedeutung von Parametern:** Änderungen von einzelnen Parametern können oft bedeutsamer für die empfundene Belästigung sein als absolute Größen.

- **Notwendigkeit von mehr Wissen:** Zur Vorhersage der Auswirkungen von Umweltgeräuschen ist ein besseres Verständnis der Signalverarbeitung im Gehör und des menschlichen Geräuschempfindens erforderlich.
- **Unzureichende Berücksichtigung in Berechnungsmodellen:** Es ist festzustellen, dass Lärm in vielen Fällen aufgrund von Berechnungsmodellen und nicht tatsächlichen Messungen bewertet wird. Diese Modelle stimmen nicht immer mit der Realität überein und können zu Fehleinschätzungen führen.

Insgesamt verdeutlichen diese Punkte die Komplexität des Themas Lärmwirkung im Verkehrswesen und unterstreichen die Notwendigkeit einer umfassenden und interdisziplinären Herangehensweise, die die Vielschichtigkeit der Lärmproblematik angemessen berücksichtigt. Dies ist entscheidend, um evidenzbasierte Maßnahmen zur Lärminderung zu entwickeln und die Lebensqualität zu verbessern.

Diese Untersuchungen der Lärmwirkung im Verkehrswesen tragen dazu bei, unser Verständnis von Lärmquellen, -ausbreitung und -wirkung zu vertiefen. Dies trägt zur Identifizierung neuer Erkenntnisse über die Auswirkungen von Lärm auf die Gesundheit, die Umwelt und die Lebensqualität dar.

Die Evaluierung der Lärmwirkung mittels psychoakustischer Parameter stellt einen innovativen Ansatz dar, der über eine reine physikalische Berechnung hinausgeht. In dieser Forschungsrichtung liegt das Potenzial, zielgerichtete und effiziente Lärmschutzmaßnahmen zu entwickeln und umzusetzen. Die Besonderheit dieses Beitrags liegt in der Anerkennung der subjektiven Wahrnehmung von Lärm als entscheidendem Faktor für die Belastung von Individuen. Durch die Integration psychoakustischer Parameter in die Bewertung von Lärmwirkungen wird die Komplexität des menschlichen Hörempfindens berücksichtigt. Im Gegensatz zu reinen physikalischen Berechnungen, die den Lärm auf Schalldruckpegel reduzieren, ermöglicht die Berücksichtigung psychoakustischer Faktoren eine dem Stand der Wissenschaft entsprechende Einschätzung der tatsächlichen Belästigung und Beeinträchtigung. Die Dissertation trägt dazu bei, die Brücke zwischen der objektiven physikalischen Messung von Lärm und der subjektiven, individuellen Wahrnehmung zu schlagen. Dies eröffnet die Möglichkeit, Lärmschutzmaßnahmen gezielter auf die Bedürfnisse und Empfindungen der Menschen auszurichten. Durch die Einbindung psychoakustischer Parameter kann die Forschung präzisere Empfehlungen für Maßnahmen ableiten, die nicht nur den Schalldruckpegel reduzieren, sondern auch die individuelle Lärmempfindlichkeit berücksichtigen. Insgesamt leistet diese Forschungsrichtung somit einen bedeutenden Beitrag zur Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes im Lärmschutz. Die Integration psychoakustischer Parameter ermöglicht eine Feinabstimmung von Maßnahmen, die nicht nur effektiv, sondern auch auf die individuellen Bedürfnisse der Betroffenen zugeschnitten sind.

6.3 Ausblick

Zum Thema Lärmwirkung soll es in der Zukunft immer eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Akustikern, Psychoakustikern, Mediziner*innen, Soziologen, Psychologen und anderen wissenschaftlichen Disziplinen geben, um die geforderten Analysen und Interpretationen auch in einer für den Menschen notwendigen Qualität durchzuführen.

Es ist notwendig die Forschungsfragen vom Labor in das sogenannte Feld zu erweitern [siehe auch Fiebig et al. 2023]. Laborergebnisse haben immer nur begrenzte Möglichkeiten der Erklärung auf Basis

ihrer Rahmenbedingungen. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass Feldversuche nicht im Widerspruch zu den Laborbedingungen dieser Studie stehen, sondern vielmehr als eine Erweiterung betrachtet werden können. Die Integration von Felduntersuchungen eröffnet die Chance, nicht nur die Gesamtheit der Bevölkerung, sondern auch ihre individuellen Wohnumgebungen und die umgebende Klanglandschaft (Soundscape) angemessen zu berücksichtigen.

In Verbindung können Psychoakustik und Soundscape dazu verwendet werden, die akustische Umwelt besser zu verstehen, Lärmbelastungen zu bewerten und Strategien zur Schaffung angenehmer Klangumgebungen zu entwickeln [Genuit and Fiebig 2006, Yang and Kang 2013, Rey Gozalo et al. 2015, Genuit et al. 2023]. Beide Konzepte tragen dazu bei, wie Menschen ihre Umgebung auditiv erleben und wie diese Erfahrung ihr Wohlbefinden beeinflusst. Ein wesentliches Ziel muss es sein, diese kombinatorische Wirkung in eine ganzheitliche und standardisierte Umsetzung zu bringen.

Die Bedeutung der Lärmwirkung spielt aber auch eine ganz entscheidende Rolle bei der Umsetzung von Maßnahmen in Infrastrukturprojekten mit langfristiger Wirkung. Ein Aspekt, welcher in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurde, war die Untersuchung der Variation des Abstands zwischen Schallquelle und Empfänger. Hieraus ergibt sich ein erheblicher Forschungsbedarf für die Zukunft unter anderem in der Entwicklung von psychoakustischen Schallausbreitungsmodellen. Dabei ist zu beachten, dass aktuelle Ausbreitungsmodelle zusätzliche Parameter und einen ganzheitlichen Blick auf den Merkmalsraum erfordern.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Zukunft ist die Integration der Psychoakustik in die künftige Richtlinienarbeit und Umsetzung in der Praxis, um diesem Themenfeld den notwendigen Stellenwert in der Technik und Gesellschaft zu geben.

Literatur

Ahnert W., Feistel R. (1991) Binaural Auralization from a Sound System Simulation Program. Presented at the 91st Convention of the Audio Engineering Society, New York: 1991, preprint no. 3127.

Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Straßenbau (2012) Dienstanweisung Lärmschutz Straße.

ANSI S3.4-2007 American National Standard Procedure for the Computation of Loudness of Steady Sound.

Aures, W. (1984). Akustik – Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale, ein Beitrag zur gehörbezogenen Schallanalyse. Dissertation, Technische Universität München.

Babisch W., van Kamp I. (2009) Exposure-response relationship of the association between aircraft noise and the risk of hypertension. *Noise & Health* 11, 161-168.

Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., & Weiber, R. (2006) Multivariate Analysemethoden, 11. Aufl., Berlin.

Banks S., Dinges D.F. (2007) Behavioral and physiological consequences of sleep restriction. *Journal of Clinical Sleep Medicine* 3, 519-528.

Basner M., Müller U., Elmenhorst, E.M. (2011) Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation. *Sleep* 34, 11-23.

Basner M., Müller U., Elmenhorst E.M., Kluge G., Griefahn B. (2008) Aircraft noise effects on sleep: a systematic comparison of EEG awakenings and automatically detected cardiac activations. *Physiological Measurement* 29, 1089-103.

Basner M., Müller U., Griefahn B. (2010) Practical guidance for risk assessment of traffic noise effects on sleep. *Applied Acoustics* 71, 518-522.

Beelen R., Hoek G., Houthuijs D. et al. (2009) The joint association of air pollution and noise from road traffic with cardiovascular mortality in a cohort study. *Occupational and Environmental Medicine* 66: 243-250.

Blauert J. (1974) Räumliches Hören. Stuttgart: Hirzel.

Bismarck, G. von. Extraktion und Messung von Merkmalen der Klangfarbenwahrnehmung stationärer Schalle, Dissertation, München, 1972.

Brooker P., Critchley J.B., Monkman D.J., Richmond C. (1985) United Kingdom Aircraft Noise Index Report Civil Aviation Authority, Department of Transport. Report DR 8402. London (UK).

Bundesgesetz über die Prüfung der Umweltverträglichkeit (Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000 - UVP-G 2000).

CALM II Network (2007) Research for a quieter Europe in 2020. An updated strategy paper of the CALM II Network. Brussels: European Commission, Research Directorate-General. ISBN 983-3200-010441-3.

Campbell J. (1983) Ambient Stressors. *Environment and Behavior*, 15, 355-380.

Cik M., Fallast K., Fellendorf M. (2012) Annoyance of traffic noise on roads and rail. Transportation research record, 2270(1), 16-22.

Cohen C.E. (1981) Person categories and social perception: Testing some boundaries of the processing effect of prior knowledge. Journal of Personality and Social Psychology, 40(3), 441–452.

Dang-Vu T.T., McKinney S.M., Buxton O.M., Solet J.M., Ellenbogen J.M. (2010) Spontaneous brain rhythms predict sleep stability in the face of noise. Current Biology 20, R626-R627.

Davies H., Van Kamp I. (2011) Noise and cardiovascular disease: A review of the literature 2008-2011. In: Proceedings of ICBEN 2011. London, UK: Imperial College, p. 302 – 311.

De Boer K., Vermeulen R. (1939) Eine Anlage für einen Schwerhörigen. In: Philips' technische Rundschau, Jahrgang 4 (1939), H. 11, S. 329-332.

Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (2008) Kompendium zur Durchführung von Hörversuchen in Wissenschaft und industrieller Praxis (Entwurf), Fachausschuss Hörakustik, September 2008.

DIN 45631/A1:2010-03 (2010) Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum – Verfahren nach E. Zwicker - Anhang 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche. Deutsches Institut für Normung, Berlin.

DIN 45692:2009-08 (2009) Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe. Deutsche Institut für Normung, Berlin.

DIN 45681 (2006) Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen. Deutsches Institut für Normung, Berlin.

EBU Tech. 3276 – 2nd edition, 5/1998.

Europäische Kommission (1996) Grünbuch der Europäischen Kommission vom 4. November 1996 über die künftige Lärmschutzpolitik. KOM (96)540. Brüssel: Europäische Kommission.

Fahrenberg J., Myrtek, M. (2011) Psychophysiologie in Labor, Klinik und Alltag. 40 Jahre Projektarbeit der Freiburger Forschungsgruppe Psychophysiologie. Kommentare und neue Perspektiven. In M. Myrtek & J. Fahrenberg (Hrsg.), Psychophysiologie in Labor und Feld, Band 14. Frankfurt: Peter Lang.

Fastl H., Zwicker E. (2007) Psychoacoustics - facts and models (3rd ed.). Heidelberg: Springer.

Fiebig A., Genuit K. (2015) Der Einsatz der Psychoakustik zur Bewertung von Umweltgeräuschen, DAGA 2015 - Jahrestagung für Akustik, Herausgeber: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Nürnberg 2015.

Fiebig A., Templiner J., Haselhoff T., Moebus S. (2023) Psychoakustische Analysen von Umgebungsgeräuschen in einer Langzeitperspektive Fortschritte der Akustik - DAGA 2023 - Jahrestagung für Akustik, Herausgeber: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Hamburg 2023.

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 recommendation. J Sound Vibr 242: 641-679.

Finke H.O., Guski R., Rohrmann B. (1980) Betroffenheit einer Stadt durch Lärm. Bericht über eine interdisziplinäre Untersuchung. Berlin / Braunschweig: Umweltbundesamt / Physikalisch-Technische Bundesanstalt, UBA-Forschungsbericht 80-10501301.

Fleischer G., Hoffmann E., Müller R., Lang R. (1998) Kinderknallpistolen und ihre Wirkung auf das Gehör. In: HNO 46:815-820.

Floud S., Vigna-Taglianti F., Hansell A., Blangiardo M., Houthuijs D., Breugelmans O., Jarup L. (2011) Medication use in relation to noise from aircraft and road traffic in six European countries: Results of the HYENA study. *Occupational and Environmental Medicine* 68(7), 518-524.

Forschungsverbund Leiser Verkehr (2013) Geschäftsstelle im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Bericht zur Situation der Lärmwirkungsforschung in Deutschland.

Fritschi L., Brown A.L. Kim, R., Schwela D.H., Kephelopoulos S., (eds. 2011). Burden of disease from environmental noise. Bonn, Germany: World Health Organization (WHO).

Gan W.Q., Davies H.W., Demers P.A. (2011) Exposure to occupational noise and cardiovascular disease in the United States: the National Health and Nutrition Examination Survey 1999-2004. *Occupational and Environmental Medicine* 68: 183-190.

Genuit K. (1994): Verknüpfung der gehörgerechten Schallmeßtechnik mit einer Mehrkanal-Schwingungsanalyse. *Soundengineering / kundenbezogene Akustikentwicklung in der Fahrzeugtechnik*, edited by Q.- H. Vo, Expert-Verlag, D-Renningen.

Genuit K., Fiebig A. (2007) Die Psychoakustik im Bereich der Lärmwirkungsforschung. ISSN 1861-6704 *Prakt. Arb. med.* 2007-9, S. 14-18.

Genuit K., Fiebig A. (2014) A critical view on measurements of noise: Improvements on noiseannoyance predictions by psychoacoustics, vol. 9, pp. 12–19, Jan. 2014.

Genuit K., Sottek R. (2010) *Sound-Engineering im Automobilbereich*. Springer. Berlin, Heidelberg.

Genuit K., Fiebig A. (2006) Psychoacoustics and its benefit for the soundscape approach. *Acta Acust united with Acust* 92:952–958.

Genuit, K., Schulte-Fortkamp, B., Fiebig, A. (2023) Psychoacoustics in Soundscape Research. In: Schulte-Fortkamp, B., Fiebig, A., Sisneros, J.A., Popper, A.N., Fay, R.R. (eds) *Soundscapes: Humans and Their Acoustic Environment*. Springer Handbook of Auditory Research, vol 76. Springer, Cham.

Glasberg B. R., Moore B. C. J. (2002) A model of loudness applicable to time-varying sounds. *Journal of the Audio Engineering Society* 50: 331–342.

Greiser E., Greiser C., Jahnsen K. (2007) Night-time aircraft noise increases prevalence of prescriptions of antihypertensive and cardiovascular drugs irrespective of social class — the Cologne-Bonn Airport study. *Journal of Public Health* 15, 327 -337.

Guski R. (1987) *Lärm, Wirkungen unerwünschter Geräusche*. Bern: Huber.

Guski R. (1999) Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise and Health*; 3:45-56.

Guski R. (2003) How to predict future annoyance in planning? Proceedings of the 8th International Congress on Noise as a Public Health Problem, Paper 85t6a.pdf, Rotterdam, NL.

- Helfer M. (2005) Aeroakustik. In: Hucho, WH. (eds) Aerodynamik des Automobils. ATZ/MTZ-Fachbuch. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Hellbrück J. (2008) Das Hören in der Umwelt des Menschen. In Herbert Bruhn et al. (Hrsg.), Musikpsychologie. Das neue Handbuch (S. 17-36). Reinbek: Rowohlt.
- Hellbrück, J., Guski, R. & Schick, A. (2010) Schall und Lärm. In V. Linneweber, E.D. Lantermann & E. Kals (Hrsg.). Enzyklopädie der Psychologie, Serie 9, Umweltpsychologie Bd. 2: Spezifische Umwelten und Umweltprobleme, Göttingen: Hogrefe. 3-44.
- Hellman R.P., Zwicker E. (1987) Why can a decrease in dB(A) produce an increase in loudness? The Journal of the Acoustical Society of America, 82 5, 1700-5.
- Huss A., Spoerri A., Egger M., Rösli M. (2010) Aircraft noise, air pollution, and mortality from myocardial infarction. Epidemiology 21, 829-836.
- Ising H., Ising M. (2002) Chronic cortisol increases in the first half of the night caused by road traffic noise. Noise & Health 4(16): 13-21.
- ISO 532-1:2017 (2017) Acoustics Methods for calculating loudness Part 1: Zwicker method.
- ITU-R BS. 775 und ITU-R BS. 1116-1.
- Jansen G., Notbohm G. (1994) Lärm. In: Wichmann, H.E.; Schlipköter, H.W.; Fülgraff, G. (Hrsg.): Handbuch der Umweltmedizin. Landsberg: ecomed 1982. 3. Erg.Lfg. 1/94, Kap. VII-1.
- Janssen S., Vos H., van Kempen E., Breugelman O., Miedema H. (2011) Trends in aircraft noise annoyance: The role of study and sample characteristics. Journal of the Acoustical Society of America 129, 1953-1962.
- Jarup L., Babisch W., Houthuijs D. et al. (2008) Hypertension and exposure to noise near airports: the HYENA study. Environmental Health Perspectives 116, 329-33.
- Kalivoda M.T., Steiner J.W. (Hrsg.) (1998) Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik. Springer, Wien.
- Klatte M., Hellbrück J., Seide J., Leistner P. (2010) Effects of classroom acoustics on performance and wellbeing in elementary school children: A field study. Environment & Behavior 42, 659-692.
- Kloepfer M., Griefahn B., Kaniowski A. M., Klepper G., Lingner S., Steinebach G., Weyer H. W. und Wysk P. (2006) Leben mit Lärm? Risikobeurteilung und Regulation des Umgebungslärms im Verkehrsbereich. Springer. Berlin, Heidelberg.
- Larson R., Csikszentmihalyi M. (1983) The Experience Sampling Method. New Directions for Methodology of Social & Behavioral Science, 15, 41-56.
- Lazarus-Mainka, G. (1993). Faktoren der Belästigung bei der sprachlichen Kommunikation unter Geräuscheinwirkung. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 40, 129-139.
- Lercher P. (1996) Environmental noise and health: An integrated research perspective. Environ. Int. 1996, 22, 117-129.

- Lindau A. (2006) Ein Instrument zur softwaregestützten Messung binauraler Raumimpulsantworten in mehreren Freiheitsgrade. Magisterarbeit, Technische Universität Berlin.
- Lindvall T., Radford E.P. (1973) Measurement of annoyance due to exposure to environmental factors. *Environmental Research*, 6:1-36.
- Lord F.M., Novick M.R. (1968) Statistical theories of mental test scores. Addison-Welsley, Reading, MA 1968.
- Lübcke E. (1935) Schallwahrnehmung, Lautstärke und Geräuschestellung, *Siemens-Zeitschrift* 1935, 15, 5.
- Maempel H.J. (2008) Perzeptive Messung und Evaluation, Skript Labor Kommunikationstechnik, Technische Universität Berlin.
- Mathar, R. (1997) Multidimensionale Skalierung: Mathematische Grundlagen und algorithmische Aspekte, Teubner Skripten zur Mathematischen Stochastik, Stuttgart.
- Miedema H.M.E. (1987) Annoyance from combined noise sources. In: Koelega HS, Ed. *Environmental annoyance: Characterization, measurement, and control*. Amsterdam: Elsevier; 313-142.
- Miedema H.M., Oudshoorn C.G. (2001) Annoyance from transportation noise: Relationships with exposure Metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environmental Health Perspectives* 109, 409 -416.
- Miedema H.M.E., Vos H. (1998) Exposure-response relationships for transportation noise. *Journal of the Acoustical Society of America* 104, 3432-3445.
- Nelson J.P. (2008) Hedonic Property Value Studies of Transportation Noise: Aircraft and Road Traffic. In A. Baranzini; J. Ramirez; C. Schaerer; P. Thalmann (Eds.): *Hedonic Methods in Housing Markets*. Berlin: Springer, pp. 57-82.
- Oswald I., Taylor A.M., Treisman M. (1960) Discriminative responses to stimulation during human sleep. *Brain* 83, 440-53.
- ÖAL-Richtlinie Nr. 6/18 (2011) Die Wirkungen des Lärms auf den Menschen. Beurteilungshilfen für den Arzt. Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung.
- ÖNORM S 5001-3 (1993) Akustik - Größen, Einheiten und Begriffsbestimmungen - Schallmeß- und Beurteilungsgrößen.
- ÖNORM S 5004 (2020) Messung von Schallimmissionen.
- ÖNORM S 5005 (2011) Messung der Schallimmissionen von Schienenverkehr.
- ÖVE/ÖNORM EN 61672-1 (2015) Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2013).
- Penn-Bressel G. (1988). Subjektive Wirksamkeit von Lärmschutzmaßnahmen. *Fortschritte der Akustik, DAGA'88*, 213-216.
- Rey Gozalo G., Trujillo Carmona J., Barrigón Morillas J.M. (2015) Relationship between objective acoustic indices and subjective assessments for the quality of soundscapes. *Appl Acoust* 97:1–10.

Richtlinie Lärmschutz an bestehenden Landesstraßen (RiLL) (2011).

RVS (Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen) 04.02.11 (2019) Berechnung von Schallemissionen und Lärmschutz.

Sandberg U., Ejsmont J. (2002) Tyre/road noise. Reference book.

Schick A. (1997) Das Konzept der Belästigung in der Lärmforschung. Pabst Science Publishers, Lengerich.

Schienenverkehrslärm-Immissionsschutzverordnung – SchIV, ausgegeben am 25.06.1993, BGBl. Nr. 415: Verordnung des Bundesministeriums für öffentliche Wirtschaft und Verkehr über Lärmschutzmaßnahmen bei Haupt-, Neben- und Straßenbahnen.

Schönpflug W., Wieland R. (1982) Untersuchungen zur Äquivalenz schwankender Schallpegel. Schwankende Schallpegel, Leistungshandeln und der Wechsel von Arbeit und Erholung. Berlin: Freie Universität & Umweltbundesamt.

Schreckenbergs D., Meis M. (2006) Gutachten: Belästigung durch Fluglärm im Umfeld des Frankfurter Flughafens - Endbericht. Bochum: ZEUS GmbH.

Schreckenbergs D. (2011) Befragung der Bewohner ausgewählter Wohneinheiten in der Stadt Raunheim zur Akzeptanz und Nutzung passiver Schallschutzmaßnahmen. Ergebnisse einer Telefonbefragung in Wohngebieten der Stadt Raunheim. Hagen: SCR Schreckenbergs Consulting and Research.

Sechstes Umweltaktionsprogramm (2001) Mitteilung der Kommission an den Rat, das europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen zum sechsten Aktionsprogramm der Europäischen Gemeinschaft für die Umwelt. Brüssel: Kommission der Europäischen Gemeinschaften.

Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV) (2012) Anlage 2 (zu § 4) Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03).

Selander J., Nilsson M.E., Bluhm G., Rosenlund M., Lindqvist M., Nise G., Pershagen G. (2009) Long-term exposure to road traffic noise and myocardial infarction. *Epidemiology* 20: 272-279.

Sottke R. (1993) Modelle zur Signalverarbeitung im menschlichen Gehör. Dissertation, RWTH Aachen.

Staatsen B.A.M., Nijland H.A., Kempen E.M.M. van, Hollander A.E.M. de, Franssen E.A.M., Kamp I. van (2004) Assessment of health impacts and policy options in relation to transport noise exposures. Topic paper noise. The Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment. Report No 815120002.

Statistik Austria (2020) Umweltbedingungen, Umweltverhalten 2019, Ergebnisse des Mikrozensus. Wien.

Steven H. (2000) Pkw-Reifen/Fahrbahngeräusche bei unterschiedlichen Fahrbedingungen. In: FAT Schriftenreihe Bd. 157. , Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), Frankfurt am Main.

Stevens S.S. (1975) Psychophysics. New York.

Steyer R., Schwenkmezger P., Notz P., Eid, M (1997) Der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen (MDBF). Göttingen: Hogrefe.

Sturmann D. (1991) Spürbar real? Virtuelle Wirklichkeit und menschliche Wahrnehmung. In: Waffender M. (Hrsg.): Cyberspace-Ausflug in virtuelle Wirklichkeiten. Reinbeck bei Hamburg: Rowohlt, 1991, S. 120.

Sust C.A. (1989) Geräusche mittlerer Intensität - Auswirkungen auf Büro- und Verwaltungstätigkeiten. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 36, 2-7.

UVP-G 2000 (Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000) Bundesgesetz über die Prüfung der Umweltverträglichkeit.

Van Kamp I. (1990) Coping with Noise and its Health Consequences; Dissertation; Styx & PP Publications: Groningen, The Netherlands.

Vogt K. (2010) Sonification of Simulations in Computational Physics. Dissertation, Universität Graz.

Weinzierl S. (2008) Handbuch der Audiotechnik. Springer Verlag, Berlin und Heidelberg.

World Health Organization (2009) Night noise guidelines for Europe. Copenhagen, Denmark: World Health Organisation (WHO).

WHO Europe (2018) Environmental Noise Guidelines for the European Region. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark. ISBN 978 92 890 5356 3.

Widmann U. (1992) Ein Modell der psychoakustischen Lästigkeit von Schallen und seine Anwendung in der Praxis der Lärmbeurteilung. Dissertation, München Technischen Universität.

Yang M., Kang J. (2013) Psychoacoustical evaluation of natural and urban sounds in soundscapes. J Acoust Soc Am 134:840–851.

Zimmer K., Ellermeier W. (1998) Ein Kurzfragebogen zur Erfassung der individuellen Lärmempfindlichkeit. Umweltpsychologie. 2, 54-63.

Zwicker E. (1991) A proposal for defining and calculating the unbiased annoyance. In Contributions to Psychological Acoustics, (A. Schick et al. eds.), 1987-202.

Zwicker E., Fastl H. (1990) Psychoacoustics – Facts and Models. Neuauflage 1999, Springer, Berlin, Heidelberg.

Anhang

Lästigkeitsindex - Fragebogen

1. Wohnen Sie in der Nähe einer stark befahrenen Straße?

trifft nicht zu	trifft eher zu	trifft sehr zu
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2. Welche Räume in Ihrer Wohnung liegen zur Straße hin?

<input type="checkbox"/> Küche	<input type="checkbox"/> Wohnzimmer	<input type="checkbox"/> Schlafzimmer	<input type="checkbox"/> Arbeitszimmer
<input type="checkbox"/> Kinderzimmer	<input type="checkbox"/> Sonstige Räume		

3. Fühlen Sie sich tagsüber durch Verkehrslärm belästigt?

nicht belästigt	mittelmäßig	sehr belästigt
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4. Fühlen Sie sich nachts durch Verkehrslärm belästigt?

nicht belästigt	mittelmäßig	sehr belästigt
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5. „Ich fühle mich durch den Verkehrslärm gestört beim...“

a. Entspannen in der Wohnung

nicht gestört	mittelmäßig	sehr gestört
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

b. Entspannen im Freien

nicht gestört	mittelmäßig	sehr gestört
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

c. Unterhalten in der Wohnung

nicht gestört	mittelmäßig	sehr gestört
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

d. Unterhalten im Freien

nicht gestört	mittelmäßig	sehr gestört
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

e. Arbeiten, Lesen, Konzentrieren

nicht gestört	mittelmäßig	sehr gestört
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

f. Radiohören, Fernsehen

nicht gestört	mittelmäßig	sehr gestört
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

g. Schlafen

nicht gestört	mittelmäßig	sehr gestört
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

6. Fühlen Sie sich durch Nachbarschaftslärm belästigt?

nicht belästigt	mittelmäßig	sehr belästigt
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Im folgenden Teil lesen Sie einige Aussagen. Bitte nennen sie jeweils, wie sehr diese Aussagen auf Sie zutreffen bzw. wie sehr sie diesen Aussagen zustimmen.

7. Ich glaube, ich kann mich gut gegen Lärm schützen.

trifft nicht zu	trifft eher zu	trifft sehr zu
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

8. Ich glaube, ich bin ziemlich geräuschempfindlich.

trifft nicht zu	trifft eher zu	trifft sehr zu
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

9. Bewohner von lärmbelasteten Gebieten werden häufiger krank.

trifft nicht zu	trifft eher zu	trifft sehr zu
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

10. Ich finde, dass ich mich leicht an Lärm gewöhnen kann.

trifft nicht zu	trifft eher zu	trifft sehr zu
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

11. Zu Ihrer Person

Geschlecht männlich ☐ weiblich ☐

Alter Jahre.....

Adresse

Herzlichen Dank!

Der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen (MDBF) [Steyer et al. 1997]

Im Moment fühle ich						Im Moment fühle ich					
überhaupt nicht			sehr			überhaupt nicht			sehr		
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
1. zufrieden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	13. schläfrig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. ausgeruht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	14. wohl	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. ruhelos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	15. ausgeglichen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. schlecht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16. unglücklich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. schlapp	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	17. wach	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. gelassen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	18. unzufrieden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. müde	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	19. angespannt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. gut	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	20. frisch	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9. unruhig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	21. glücklich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10. munter	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	22. nervös	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11. unwohl	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	23. ermattet	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12. entspannt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	24. ruhig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

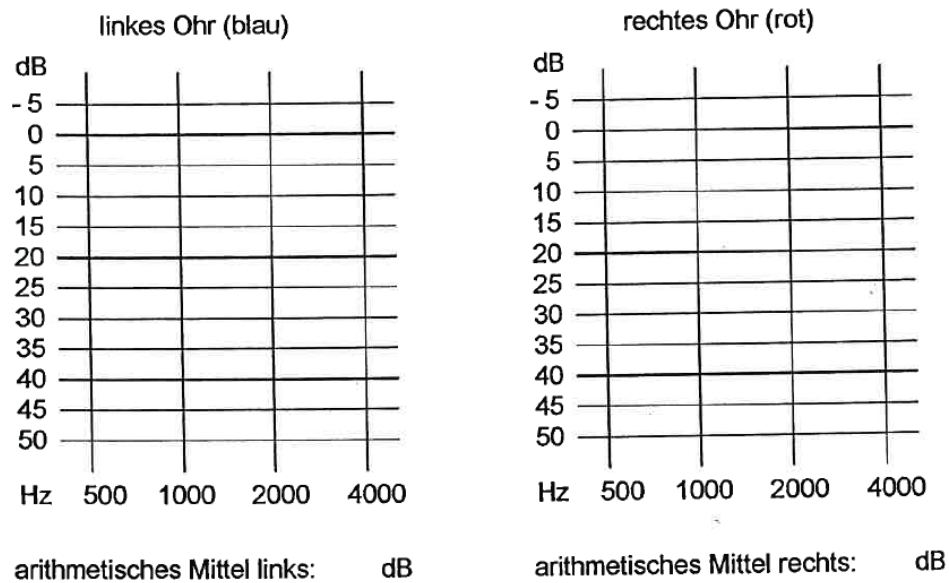
Audiometrie

Erhebung der Hörstörungen (Fragebogen)

A) Befragung

- Existieren derzeit Einschränkungen im Hörvermögen?
Wenn ja welche:
- Benützen sie derzeit ein Hörgerät oder eine Hörhilfe?
- Hatten Sie früher mal vorübergehende Hörstörungen?
(Hörsturz, Phantomgeräusche)
- Standen Sie heute bereits unter starker Lärmbelastung?

B) Audiometrie



Klassifizierung: ☐ normal (< 20 dB) ☐ leicht (< 40 dB) ☐ stark schwerhörig

Lärmempfindlichkeitsfragebogen

Im Folgenden möchten wir Sie bitten, Aussagen zu verschiedenen Geräuschen zu machen.

Gehen Sie bitte die Aussagen der Reihe nach durch und lassen Sie keine aus. Versuchen Sie bitte, sich in die jeweilige Situation hineinzusetzen und antworten Sie spontan und ohne lange zu überlegen.

Kreuzen Sie die Antwortmöglichkeit an, die Ihrer Meinung nach am besten auf Sie zutrifft.

Sie dürfen für jede Aussage nur 1 Kreuzchen vergeben.

Uns interessiert Ihre ganz persönliche Meinung zu den Aussagen, die wir Ihnen vorgeben. Aus diesem Grund gibt es auch keine richtigen oder falschen Antworten.

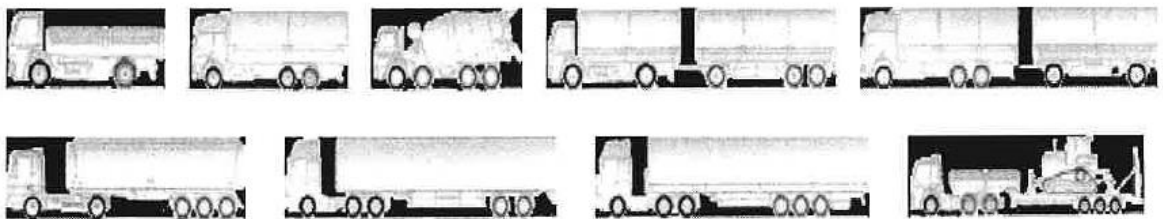
Wenn Sie sich nicht sicher sind, welche Antwortmöglichkeit Sie ankreuzen sollen, wählen Sie bitte diejenige, die am ehesten auf Sie zutrifft.

	stimmt genau	stimmt eher	stimmt eher nicht	stimmt gar nicht
1. Sich unterhalten macht keinen Spaß, wenn nebenbei das Radio läuft.				
2. Ich bemerke störende Lärmquellen später als andere.				
3. Ich vermeide laute Freizeitveranstaltungen wie z.B. Fußballspiele oder Jahrmärkte.				
4. Ich wache beim geringsten Geräusch auf.				
5. Ich kann auch in lauter Umgebung schnell und konzentriert arbeiten.				
6. Wenn ich in der Stadt bin und einkaufe, überhöre ich den Straßenlärm.				
7. Nach einem Abend in einem lauten Lokal fühle ich mich wie ausgelaugt.				
8. Wenn ich einschlafen will, stört mich kaum ein Geräusch.				
9. Am Wochenende bin ich gerne an ruhigen Orten.				

Erhebung LKW Merkmale

Erhebungsbogen Hörversuchsphase 2 - LKW

- Gruppe:
- LKW-Nummer (fortlaufend nummeriert):
- Ankunftszeit:
- Abfahrtszeit:



- Kennzeichen vorne:
- Kennzeichen hinten:
- Zugmaschine Merkmale vorne (Firmenname, Farbe):
- Hänger Merkmale Seite (Farbe, Firmenlogo, Firmenname):
- Nationalität:
- Marke LKW:
- Type:
- Hubraum:
- Leistung:
- Baujahr:
- Zulässiges Gesamtgewicht:
- Beladung in Prozent:
- Lärmarmes (grünes L): ja / nein

Erhebungsbogen Hörversuchsphase 2 - Profiltiefe

Gruppe: _____

LKW-Nummer (fortlaufend nummeriert): _____

Bereifung rechte Seite:

	Reifenhersteller	Profilbezeichnung	Reifenbreite/Verhältnis	Felgend.	Profiltiefe
Lenkachse E					
Antriebsachse E / Z					
Achse 3 E / Z					
Achse 4 E / Z					
Achse 5 E / Z					
Achse 6 E / Z					

Bereifung linke Seite:

	Reifenhersteller	Profilbezeichnung	Reifenbreite/Verhältnis	Felgend.	Profiltiefe
Lenkachse E					
Antriebsachse E / Z					
Achse 3 E / Z					
Achse 4 E / Z					
Achse 5 E / Z					
Achse 6 E / Z					

Beispiel:

Achse Y E / Z	Michelin	XDA2	315/60	R22,5	22 mm
--------------------------------	----------	------	--------	-------	-------

Einblicke in die Messungen



Messort Asphaltbeton Hörversuchsphase 3



Messort Asphaltbeton Hörversuchsphase 1



Messung mit Kunstkopf



Messung Seitenradar (Geschwindigkeit) und Videodetektion (Fahrzeugzuordnung über Kennzeichen)



Erhebung der LKW Merkmale mit Polizeiunterstützung



Erhebung der LKW Profilitiefe