

Forschungsbericht BWPLUS

## **Wirkungsbezogene Gesamtlärmsimulation und -bewertung**

### **Teilprojekt 1**

#### **Auralisationsinstrument zur subjektiven Bewertung von Lärm und Lärminderungsmaßnahmen**

von

Philip Leistner, Klaus Naßhan  
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart

### **Teilprojekt 2**

#### **Hörakustische Bewertung**

Peter Keilhacker  
Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt  
Professur für Arbeits-, Umwelt- und Gesundheitspsychologie  
Projektleitung: Prof. Dr. Jürgen Hellbrück

Förderkennzeichen: BWU 27006 + BWU 27007

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit  
Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Februar 2013

# Inhalt

## Teilprojekt 1

1	Motivation	4
2	Informationsteil des Auralisationsinstrumentes	4
3	Grundlage der Auralisation	5
4	Technische Realisation	7
4.1	Schallausbreitung	7
4.2	Lärmschutzwände, Fenster und Schalldämpfer	7
4.3	Räume	7
4.4	Schalle	8
4.5	Lautstärkeregelung	8
4.6	Internetanbindung	9
5	Ganzheitliche Auralisation	10
5.1	Komplexe Situationen	10
5.2	Eingabe einer Schallquelle	11
5.3	Starten der Auralisation	13
6	Zusammenfassung und Fazit	15
7	Literaturverzeichnis	16

## Teilprojekt 2

1	Umweltlärm und Lärmschutz	17
1.1	Organisatorische Rahmenbedingungen	18
2	Theoretischer Hintergrund	18
2.1	Lärm und Umweltlärm - Begriffsdefinitionen	18
2.2	Lautheit von Lärm	19
2.2.1	Einfluss des Frequenzspektrums auf die Lautheit - Bewertungspegel	20
2.2.2	Lautheit von pegelvariierenden Schallen: zeitliche Integration	21
2.3	Weitere psychoakustische Parameter	21
2.4	Lästigkeit	22
2.4.1	Einfluss von Lärmempfindlichkeit und Alter auf das Lästigkeitsurteil	24
2.5	Beurteilung der Lärminderung durch Lärmschutz - Befundlage	24
2.6	Beurteilung von Gesamtlärm	25
2.7	Sprachverständlichkeit unter Lärm	26
2.8	Skalierungsmethoden	28
2.8.1	Direkte Skalierungsmethoden	28
2.8.2	Indirekte Skalierungsmethoden: Paarvergleich	30
2.9	Empirische Fragestellungen	30
3	Empirische Untersuchungen	31
3.1	Untersuchung 1: Lästigkeit verschiedener Lärmquellen im Paarvergleich	31
3.1.1	Methode	31
3.1.2	Ergebnisse und Diskussion	32
3.2	Untersuchung 2: Bewertung von einzelnen und zusammengesetzten Lärmquellen - Gesamtlärm	33

3.2.1	Methode	34
3.2.2	Ergebnisse	35
3.2.3	Diskussion	38
3.3	Untersuchung 3: Beurteilung von Lärmschutzmaßnahmen	39
3.3.1	Methode	42
3.3.2	Ergebnisse	44
3.3.3	Diskussion	53
3.4	Untersuchung 4: Sprachverständlichkeit unter Lärm	54
3.4.1	Methode	54
3.4.2	Ergebnisse	55
3.4.3	Diskussion	61
4	Zusammenfassung und Fazit	61
5	Literaturverzeichnis	65

## Anhänge

A1	Bildschirmkopien vom Auralisationsbrowser (Version 1.0)
A2	Untersuchungsinstruktionen
A2.1	Instruktion für Paarvergleich (Untersuchung 1)
A2.2	Instruktion für die Skalierung nach semantischen Differenzialen (Untersuchung 2)
A2.3	Instruktion für das Fraktionierungsverfahren (Untersuchung 3)
A2.4	Instruktion für das Kategorienunterteilungsverfahren (Untersuchung 3)
A2.5	Instruktion für die Untersuchung zur Sprachverständlichkeit (Untersuchung 4)
A3	Schallanalysen
A3.1	Pegel und psychoakustische Parameter der in Untersuchung 2 verwendeten Schalle (Bemerkung: SS= Schwankungsstärke)
A3.2	Pegel ( $L_{Aeq}$ ) der in Untersuchung 3 verwendeten Schalle und Auralisationen
A3.3	Lautheit (N5) der in Untersuchung 3 verwendeten Schalle und Auralisationen
A4	Erweiterte Ergebnisdarstellungen
A4.1	Faktorenanalyse - Faktorwerte der Lärmarten (Untersuchung 2)
A4.2	Abbildung der Mittelwerte und Standardfehler für die Beurteilung der Lautheit in Abhängigkeit von Lärmart und Schallschutz (Untersuchung 3: Kategorienunterteilungsskala)
A4.3	Abbildung der Mittelwerte und Standardfehler für die Beurteilung der Lästigkeit in Abhängigkeit von Lärmart und Schallschutz (Untersuchung 3: Kategorienunterteilungsskala)
A4.4	Abbildung der Mittelwerte und Standardfehler für die Beurteilung der Restlautheit in Abhängigkeit von Lärmart und Schallschutz (Untersuchung 3: Fraktionierungsverfahren)
A4.5	Abbildung der Mittelwerte und Standardfehler für die Beurteilung der Restlästigkeit in Abhängigkeit von Lärmart und Schallschutz (Untersuchung 3: Fraktionierungsverfahren)

## Teilprojekt 1

### 1 Motivation

Die Noxe „Lärm“ führt zweifelsohne zu volkswirtschaftlich messbaren Schäden an Gesundheit und Leistungsvermögen der betroffenen Menschen. Beispielsweise fühlten sich 2004 mehr als 30% der Bevölkerung in Baden-Württemberg durch Straßenverkehrslärm und knapp 20% durch Fluglärm belästigt [1]. Zu diesen Geräuschquellen addieren sich die von Industrie und Freizeit erzeugten Geräusche. Bisher wurden die einzelnen Arten der Lärmquellen zumeist separat betrachtet. Es existieren einzelne Anforderungen, Rechen- und Messverfahren für die jeweiligen Lärmarten. Die Wirkung der einzelnen Lärmarten kann jedoch nicht getrennt berücksichtigt werden, sondern muss integral als Gesamtlärm bewertet werden. So können beispielsweise Lärmimmissionen durch Verkehr, Industrie und Freizeitaktivitäten einzeln als nicht lästig, in ihrer Gesamtheit jedoch als besonders störend beurteilt werden. In [2] ist eine umfassende Übersicht der Modelle zur Gesamtlärbetrachtung gegeben. Auch wird deutlich dargelegt, dass die Komplexität der akustischen und auch nicht-akustischen Effekte einem einfach anwendbaren und für Planungszwecke geeigneten Bewertungsverfahren im Weg stehen. Weiterhin wird ein pragmatisches Modell zur Gesamtlärbetrachtung vorgeschlagen. Sowohl dieser Vorschlag als auch alle Bewertungsverfahren der einzelnen Lärmarten fußen auf Beurteilungspegeln (A-bewerteten Summenpegeln zzgl. Zu- oder Abschlägen). In diesen sind die für die Bewertung des Gesamtlärms notwendigen zeitlichen, spektralen und auch inhaltlichen Informationen nicht enthalten! Es fehlt ein Bindeglied, welches die subjektiven Eindrücke von Gesamtlärm und Maßnahmen, die Lärm mindern, in Bezug zu (erweiterten) Anforderungen setzen kann.

Deshalb ist das Ziel dieses Vorhabens, ein einsatzfähiges Werkzeug zu schaffen, welches gleichzeitig unterschiedliche Schallimmissionen (z. B. Straße, Schiene, Industrie, Freizeit) und die Wirkung von verschiedenen angepassten Lärminderungsmaßnahmen (Lärmschutzwände und -fenster, Schalldämpfer) hörbar macht (auralisiert) und erläutert. Dieses Simulationswerkzeug soll aus drei Modulen bestehen:

*Allgemeine Informationen über Akustik.* Hier werden Begriffe wie „Lautstärke“, „Dezibel“, „Frequenz“ kurz erläutert und anhand von Hörbeispielen auralisiert.

*Berechnungsmodule.* In diesem Teil werden die Berechnungen zur Wirkung der unterschiedlichen Lärmursachen und Lärmschutzmaßnahmen implementiert. (Ein Beispiel: Das Verkehrsaufkommen einer kommunalen Straße erhöht sich, Lärmschutzwände sind jedoch nicht geplant. Gleichzeitig wird in einem Industrieunternehmen die Emissionslast mittels Schalldämpfer reduziert.) Es werden typische Modellsituationen implementiert; die Berechnungsverfahren orientieren sich an den derzeit gültigen Normen und Richtlinien sowie am aktuellen Stand der Forschung.

*Auralisationsmodul.* Hiermit werden die Berechnungsergebnisse mit Geräuschen aus einer Schallquellendatenbank verknüpft, sodass ein Höreindruck entsteht, der der interessierenden Situation entspricht. Die Berechnungen sollen in Echtzeit erfolgen, d. h. Änderungen im System (z. B. Art der Lärmschutzwand) werden unverzüglich hörbar.

### 2 Informationsteil des Auralisationsinstrumentes

Zu dem Informationsteil wurde die Webpräsenz <http://auralisation.ibp.fraunhofer.de> geschaffen. Dort werden allgemeine Informationen zur Akustik angeboten. Der volle Funktionsumfang, insbesondere die Auralisation, steht erst nach Installation des Auralisationsbrowsers zur Verfügung. Der Auralisationsbrowser vereint einen Webbrowser und ein Auralisationsprogramm. Alle nachfolgenden Aussagen beziehen sich auf die Verwendung des Auralisationsbrowsers. Bildschirmkopien der einzelnen Informationsseiten sind im Anhang A.1 dargestellt.

## *Einleitung*

Auf dieser Webseite werden Informationen zu Programm und Systemanforderungen sowie Hinweise zum Download gegeben. Auf der Unterseite „Bedienungshinweise“ werden Empfehlungen zur Benutzung des Programms gegeben. Auf einer weiteren Unterseite „Lautstärkeregelung“ ist es möglich, eine definierte Einstellung des Wiedergabesystems vorzunehmen. Damit soll erreicht werden, dass die Schallwiedergabe ungefähr in Originallautstärke erfolgt. Über eine weitere Unterseite erreicht man die Download-Links. Die vom Programm benutzten Datenbanken sind so vorbereitet, dass weitere Schalle, Außenbauteile oder Schalldämpfer mit geringem Aufwand eingepflegt werden können.

## *Grundlagen*

Hier wird auf zwei Unterseiten Grundlegendes zu „Schall“ und „Schallminderung“ erläutert. Verschiedene reine Sinustöne können angehört werden. Dabei ist die Frequenz frei wählbar.

## *Schallquellen*

Diese Seite enthält Informationen zu verschiedenen Schallquellen aus den Kategorien

- Schiene
- Straße
- Freizeit und Sport
- Industrie
- Kindergarten und Schule
- Flug

Beispiele realer Schalle aus diesen Bereichen können angehört werden.

## *Schallschutzmaßnahmen*

Auf dieser Seite werden die Möglichkeiten des Schallschutzes durch Lärmschutzwände, Schallschutzfenster und Schalldämpfer erläutert und die wesentlichen Einflussgrößen beschrieben. Außerdem besteht die Möglichkeit, entsprechende Bauteile zu gestalten und ihre Wirkung mittels verschiedener Schallquellen zu auralisieren. Dabei kann auch ein Hintergrundgeräusch zugeschaltet werden.

## *Komplexe Situationen*

Dies ist das Kernstück des Programms. Hier können verschiedene Schallquellen mit verschiedenen Schallschutzmaßnahmen versehen werden, einzeln oder zugleich angehört werden. Näheres dazu im Kapitel 5.

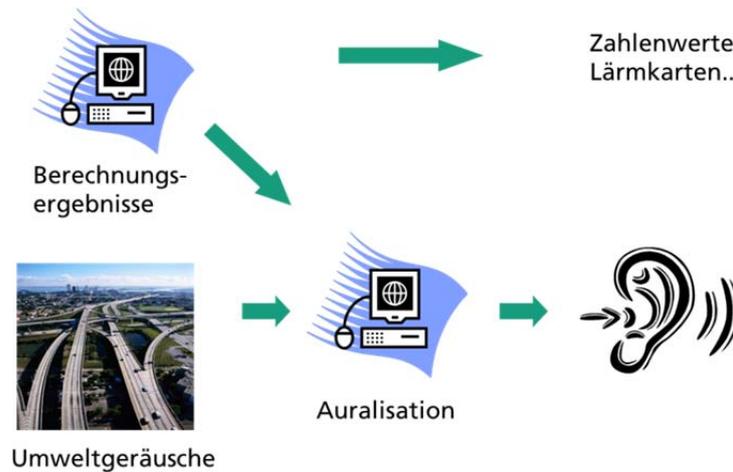
## *Bewertung*

Auf dieser Seite werden die wesentlichen Ergebnisse des Teilprojektes „Hörakustische Bewertung“ dargestellt.

## **3 Grundlage der Auralisation**

Bei der Auralisation werden Berechnungsergebnisse hörbar und erlebbar gemacht. Das Wesentliche dabei ist die Nachbildung der Schallübertragungswege. Sind diese bekannt - in aller

Regel durch eine Simulation ermittelt - kann jedes hallfreie Geräusch auf die jeweilige Situation umgerechnet und dargeboten werden.

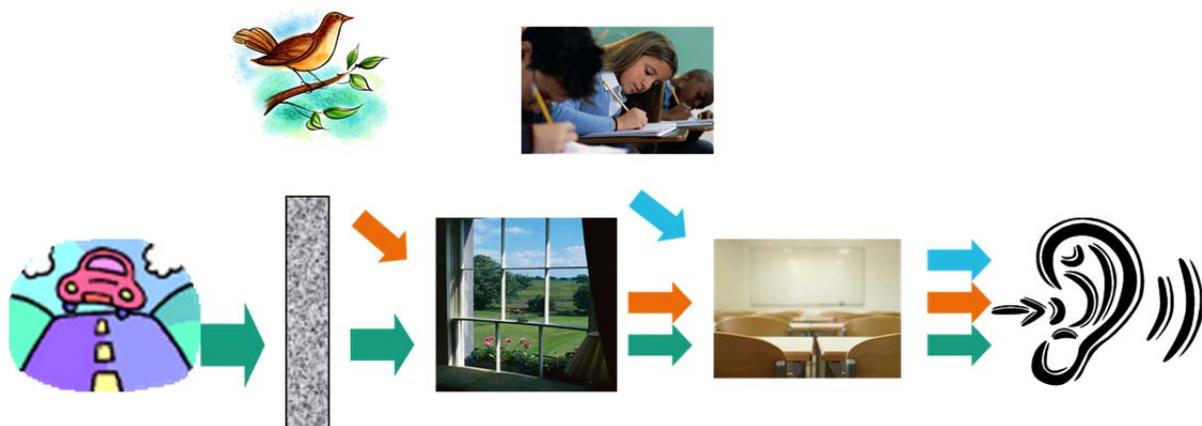


**Abbildung 1:** Grundlage der Auralisation

Folgende Übertragungswege wurden realisiert:

- Schallquelle → Übertragung → Hörer im Freien
- Schallquelle → Schallschutzmaßnahme → Übertragung → Hörer im Freien
- Schallquelle → Übertragung → Fenster → Raumakustik → Hörer in einem Gebäude
- Schallquelle → Schallschutzmaßnahme → Übertragung → Fenster → Raumakustik → Hörer in einem Gebäude

In allen Fällen kann für den Außenbereich ein Hintergrundgeräusch mit auralisiert werden. Dieses Hintergrundgeräusch wird von der Lärmschutzmaßnahme nicht beeinflusst, unterliegt jedoch, falls es im Gebäude angehört wird, der Schalldämmung des Fensters und der Raumakustik. Zusätzlich kann dem Hörer im Gebäude ein Innenraumgeräusch zugespielt werden. Dieses Hintergrundgeräusch unterliegt nur der Raumakustik. Dieser erstmals zur Anwendung kommende ganzheitliche Ansatz gestattet es, die jeweilige Situation unter den üblichen Nutzungsbedingungen anzuhören.



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung der Elemente der ganzheitlichen Auralisation für einen Hörer im Innenraum

## 4 Technische Realisation

### 4.1 Schallausbreitung

Für die Beschreibung der Schallausbreitung wird ein Programmobjekt „Soundpath“ generiert. Dieses beinhaltet neben dem Namen der Schalldatei die Position der Schallquelle und Verweise auf die Position des Hörers, auf eine Lärmschutzwand oder einen Schalldämpfer, auf ein Fenster und auf eine Raumnutzung. Verweis bedeutet dabei, dass nicht die Daten direkt eingebunden sind, sondern lediglich der Speicherort, wo die entsprechenden Daten stehen. Dadurch wird sichergestellt, sollte man z. B. ein Fenster austauschen, dass die Auralisation für alle Geräusche immer mit dem gleichen Fenster erfolgt. Bevor die Auralisation eines „Soundpath“ erfolgt, wird zunächst die "Transferdämmung" berechnet. Diese beinhaltet die Einfügungsdämmung der Lärmschutzwand oder des Schalldämpfers, die "Entfernungsdämmung" (Schallpegelabnahme mit der Entfernung zur Quelle) und die Schalldämmung des Fensters. Ferner wird die Nachhallzeit für die jeweilige Raumnutzung ermittelt. Aus diesen Werten werden die Stellgrößen für die DirectSoundAPI (Microsoft) ermittelt, das entsprechende DirectSound-Objekt initialisiert und gestartet.

Sollte sich im Ausbreitungsweg ein Fenster befinden, reicht die Dynamik der DirectSoundAPI nicht aus, um allein damit eine korrekte Auralisation durchzuführen. Für diesen Fall wurde vorab eine definierte Vorverzerrung durchgeführt, sodass das vorverzerrte Geräusch dennoch auralisiert werden kann. In seltenen Fällen kann es vorkommen, dass die Dynamik von DirectSound nicht ausreicht, um die Transferdämmung im ganzen Frequenzbereich genau abzubilden. Dann werden die leisen Stellen minimal angehoben, sodass gerade noch auralisiert werden kann. Dies erscheint zulässig, da in diesen Fällen die leisen Stellen mindestens 30 dB unter dem für dieses Frequenzband vorgesehenen Wert liegen.

### 4.2 Lärmschutzwände, Fenster und Schalldämpfer

Lärmschutzwände sind entweder "einseitig", "beidseitig", "beidseitig absorbierend" oder nicht vorhanden. Sie haben eine Höhe und einen Abstand zur Fahrbahnmitte. Im Falle der beidseitigen Lärmschutzwand wird z. B. von einer zur Fahrbahnmitte symmetrischen Anordnung ausgegangen. Die Berechnung der Einfügungsdämmung erfolgt nach [3].

Die Schalldämm-Maße von Schallschutzfenstern wurden [4] entnommen. Dort sind aus zahlreichen Fenstermessungen die Schalldämm-Maße entsprechend der Schallschutzklassen gemittelt worden. Somit stehen in der Datenbank jeweils Schalldämm-Maße für ein mittleres Fenster der jeweiligen Schallschutzklasse. Die Daten für geöffnetes und gekipptes Fenster wurden am Fraunhofer IBP gemessen.

Die Einfügungsdämmmaße von typischen Schalldämpfern sind in einer Datenbank hinterlegt. Diese wurden mit der Software compas [5] berechnet.

### 4.3 Räume

Für verschiedene typische Räume wurden Nachhallzeiten entsprechend folgender Tabelle im Programm hinterlegt.

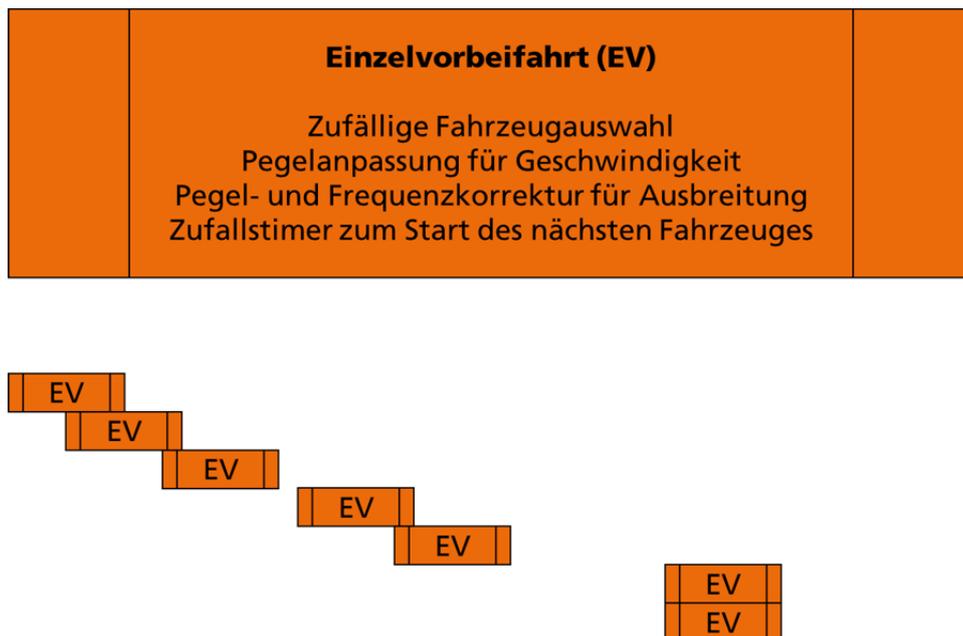
Raum	Nachhallzeit in s
Wohnzimmer	1,0
Schlafzimmer	0,8
Klassenzimmer, ideal	0,5
Klassenzimmer, schlecht	1,5
Turnhalle	2,8

Natürlich können auch hier die Nachhallzeiten anderen Raumnutzungen zugeordnet werden, z. B. 0,5 s einem bedämpften Wohnzimmer und dergleichen.

#### 4.4 Schalle

Allen Schall-Dateien liegen Tonaufnahmen zugrunde. Ihre Herkunft wird im Programm jeweils angegeben. Eine Beschreibung und Klassifizierung der Schalle ist in einer Datenbank hinterlegt. Nach Auswahl eines Schalls wird überprüft, ob die zugehörige Schalldatei bereits auf dem lokalen Rechner vorhanden ist und die gleiche Dateigröße wie auf dem Auralisationsserver hat. Ist dies nicht der Fall, wird die Schalldatei im Hintergrund heruntergeladen. Anschließend steht der ausgewählte Schall zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung.

Im Falle von Straßenverkehr besteht die Möglichkeit, sich ein Straßenverkehrsgeräusch zu synthetisieren. Dazu werden die jeweilige Anzahl von PKWs und LKWs pro Stunde und die zulässige Höchstgeschwindigkeit angegeben. Anhand dieser Angaben wird zufällig aus einer Datenbank von verschiedenen PKW- und LKW-Einzelvorbeifahrten eine Aufnahme ausgewählt. Eine weitere Zufallszahl aus einer Gleichverteilung mit dem Erwartungswert des mittleren zeitlichen Fahrzeugabstands bestimmt den Zeitpunkt, zu dem die Auralisation der Vorbeifahrt beginnt. Vor dem Starten der Auralisation eines Fahrzeugs wird nach dem gleichen Verfahren das Nachfolgefahrzeug vorbereitet. Beide Prozesse, die Auswahl von PKWs und LKWs, erfolgen unabhängig voneinander. Der „Soundpath“ ist für alle Fahrzeuge einer synthetischen Straßenverkehrssituation gleich, braucht daher auch nur einmal berechnet zu werden. Unterschiedliche Geschwindigkeiten werden durch eine Pegelanpassung berücksichtigt.



**Abbildung 3:** Prinzipskizze zur Straßengeräuschsynthese aus Einzelvorbeifahrten

Die Grenze des Verfahrens liegt bei etwa 60 000 Fahrzeugen pro Stunde. Diese Zahl kann auf verschiedene Straßen verteilt werden.

#### 4.5 Lautstärkeregelung

Da die Schallwahrnehmung pegelabhängig ist, erfordert eine genaue Auralisation eine Kalibrierung der Lautstärke. Im Labor erfolgt dies mit kostspieliger Technik, die bei einem „normalen“ Programmnutzer nicht vorausgesetzt werden kann. Daher wurde eine Art (Mit-)

Hörschwellenbestimmung implementiert. Dazu wird auf Mausklick ein Weißes Rauschen dargeboten, dessen Lautstärke von der leisesten Einstellmöglichkeit aus langsam erhöht wird. Der Benutzer ist aufgefordert, sobald er etwas hört, einen Mausklick zu tätigen. Nach dreimaliger Wiederholung werden Mittelwert und Standardabweichung ermittelt. Liegt die Standardabweichung der drei Messungen unter einer Grenze – Anfangswert ist 1dB – wird der Mittelwert verwendet, um die Lautstärke einzustellen. Sollte die Grenze überschritten sein, erhält der Benutzer drei Möglichkeiten:

#### Abbrechen

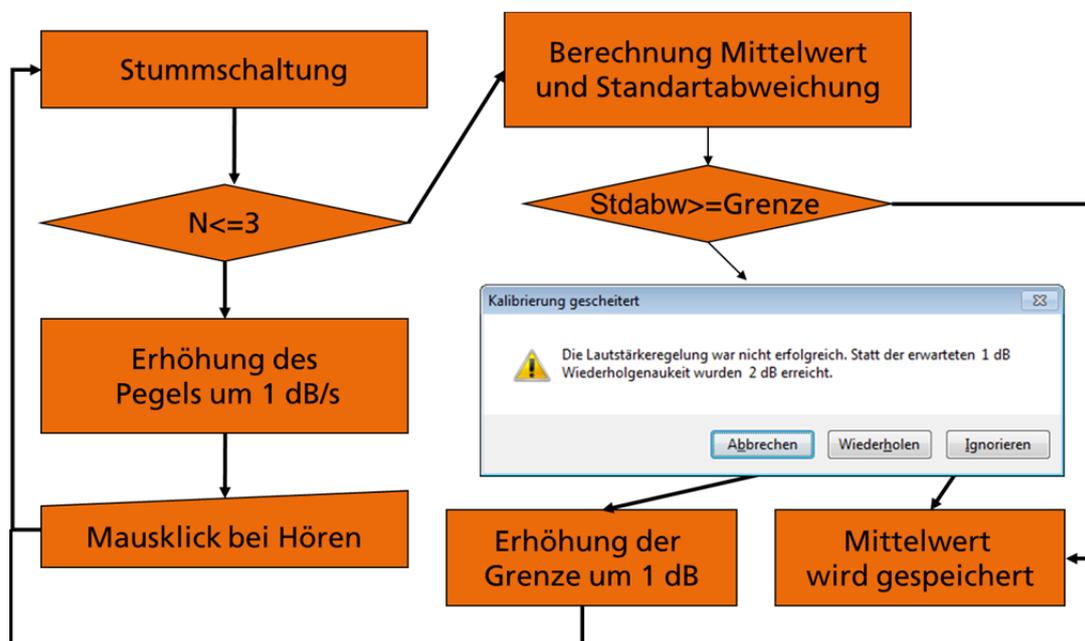
Das Verfahren wird abgebrochen, es erfolgt keine Lautstärkekalibrierung.

#### Wiederholen

Das Verfahren wird wiederholt, jedoch mit um 1 dB erhöhter Grenze.

#### Ignorieren

Das Verfahren wird abgebrochen und der Mittelwert trotz seiner Unsicherheit für die Lautstärkekalibrierung verwendet.



**Abbildung 4:** Prinzipskizze zur Lautstärkekalibrierung

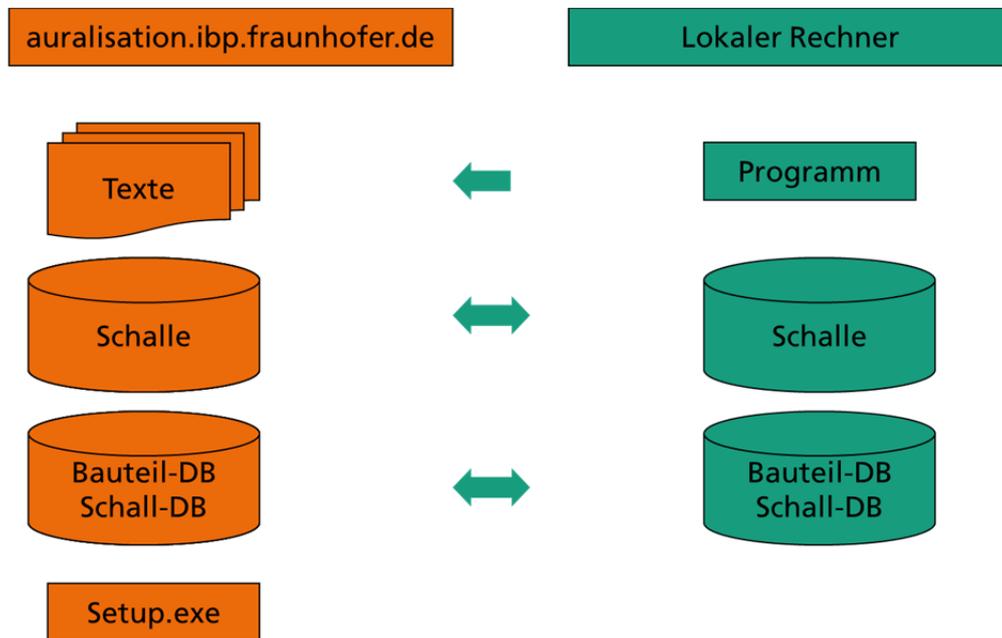
Bei der Einstellung der Lautstärke wird berücksichtigt, dass das Hörexperiment nicht in völliger Ruhe, wie etwa in einer audiologischen Kabine erfolgt. Es wird von einem Hintergrundpegel von 30 dB(A) ausgegangen. Entsprechend wird die Lautstärke reguliert.

## 4.6 Internetanbindung

Das Programm ist internetfähig. Dies ermöglicht, die Informationsseiten zu pflegen und zu erweitern, ohne dass der Nutzer sein Programm aktualisieren muss. Zugleich ist die Möglichkeit geschaffen, die Bauteile und Schalldatenbanken ebenfalls zu pflegen und zu erweitern. Allerdings ist es beim heutigen Stand der Technik leider noch nicht sinnvoll, alle Rechenprozesse auf einem Server laufen zu lassen und nur das Auralisationsergebnis zu streamen. Daher wurde ein Hybridsystem geschaffen: Daten, d. h. Schalle, Informationen und Beschreibungen, werden auf einem Webserver bereitgestellt. Auf einem lokalen Rechner ist ein Auralisationsbrowser installiert, der bei Bedarf seine Daten mit dem Webserver abgleicht, aber vor allem die rechenintensive

Auralisation lokal durchführt. Sobald der Auralisationbrowser zusätzliche Informationen, z. B. weitere Schalle benötigt, werden diese aus dem Internet nachgeladen und lokal gespeichert.

Vorteil dieses Konzeptes ist es, dass der erste Download, die Datei „setup.exe“, relativ kompakt (ca. 65 MByte) ist. Die während der Programmnutzung nachgeladenen Dateien sind jeweils einige MByte groß. Der Umfang des Programms wächst mit der Zeit, zugleich erfolgen Downloads seltener und das Programm wird scheinbar schneller.



**Abbildung 5:** Konzept der Internetanbindung des Auralisationsbrowsers (einfacher Pfeil: Datenzugriff, Doppelpfeil: Datenabstimmung)

Nachteilig ist, dass wegen der ständigen Internetzugriffe eine dauernde Internetanbindung erforderlich ist. Dies erscheint heutzutage in der Regel unproblematisch.

## 5 Ganzheitliche Auralisation

Projektziel war es, den Gesamtlärm zu auralisieren. Die Komplexität des Vorhabens zeigt ein Blick auf das wohl bekannteste Infrastrukturprojekt Baden-Württembergs: "Stuttgart 21" (siehe Abbildung 6). Der Hauptbahnhof wird von mehreren Hauptverkehrsstraßen umrahmt. Zusätzlich befindet sich auf dem Gelände eine Großbaustelle und schließlich können mehrere Immissionsorte betroffen sein. In dieser Situation sind zahlreiche Schallquellen zu berücksichtigen. Dem soll mit den „Komplexen Situationen“ Rechnung getragen werden.

### 5.1 Komplexe Situationen

Das Kernstück des Programms, „Komplexe Situationen“, erfordert zunächst Eingaben zum Aufenthaltsort (innen oder außen), zur Umgebung (innerstädtisch oder ländlich) und zur Höhe des Ohrs über dem ansonsten als eben angesehenen Gelände. Sollte man sich in einem Gebäude befinden, werden zusätzlich Auswahlmöglichkeiten zu Fenster und Aufenthaltsraum angeboten. Diese Daten werden für die weiteren Berechnungen benötigt und global verwaltet. Sie können zu jedem Zeitpunkt der Benutzung des Programms verändert werden.

Man kann auch das Bedienelement „Laden“ im unteren Bedienbereich betätigen, um eine zuvor abgespeicherte Situation zu laden.



Abbildung 6: Blick auf das Stuttgart 21 Gelände (Quelle: Google Earth)

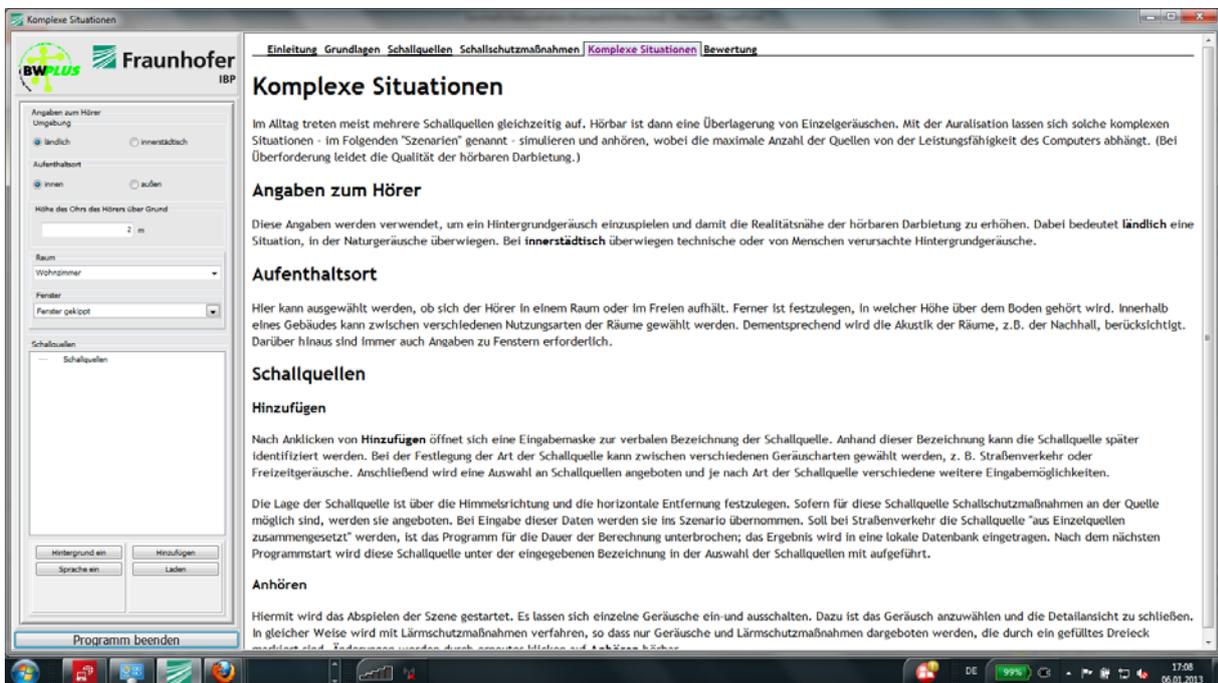


Abbildung 7: Startbildschirm "Komplexe Situationen"

## 5.2 Eingabe einer Schallquelle

Um eine Schallquelle zu generieren, klickt man „Hinzufügen“ an. Zunächst sollte eine eindeutige Beschreibung der Schallquelle eingegeben werden. Über die Auswahlbox „Art der Schallquelle“ wird eine Klasse von Geräuschen ausgewählt (Abbildung 8 ). Danach steht, außer für

„Straßenverkehr aus Einzelvorbeifahrten“, eine weitere Auswahlbox zur Auswahl des Geräuschs zur Verfügung (Abbildung 9).

Eingabe einer Schallquelle

Beschreibung

Art der Schallquelle

- Flugzeuge
- Freizeit/Sport
- Industrie
- Kindergarten/Schule
- Schienenverkehr
- Straßenverkehr
- Straßenverkehr aus Einzelvorbeifahrten

Lage der Schallquelle

NW  N  NO

W  O

SW  S  SO

Entfernung zum Hörer [m]

50

Abbrechen

Abbildung 8: Eingabemaske für Schallquelle - Art der Schallquelle

Eingabe einer Schallquelle

Beschreibung

Art der Schallquelle

Schienenverkehr

Auswahl der Schallquelle

- Stadtbahn
- Bahnhof, Halt eines Nahverkehrszugs
- Güterzug auf verriegeltem Gleis
- ICE auf gutem Gleis
- IC mit 200 km/h, scheibengebremst
- Regionalbahn
- ICE auf verriegeltem Gleis
- keine

Lage der Schallquelle

NW  N  NO

W  O

SW  S  SO

Entfernung zum Hörer [m]

50

Abbrechen

Abbildung 9: Eingabe einer Schallquelle - Auswahl der Schallquelle

Sofern dies bei dem ausgewählten Geräusch sinnvoll ist, wird eine passende Schallschutzmaßnahme angeboten. Abbildung 10 zeigt die Eingabe einer Lärmschutzwand.

Die Lage der Schallquelle wird durch Himmelsrichtung und Entfernung zum Hörer bestimmt. Damit ist alles eingegeben, was zum Auralisieren benötigt wird. Durch Anklicken von „Daten übernehmen“ wird die so definierte Schallquelle in die Liste der Schallquellen übernommen.

**Abbildung 10:** Eingabe einer Schallquelle - Auswahl einer Schallschutzmaßnahme

Wurde als „Art der Schallquelle“ der „Straßenverkehr aus Einzelvorbeifahrten“ gewählt, sieht die Eingabemaske etwas anders aus (Abbildung 11). Es sind die Werte PKW/Stunde und LKW/Stunde sowie die Höchstgeschwindigkeit anzugeben. Die Eingabe von Schallschutzmaßnahme und Lage der Schallquelle erfolgt analog zu obigem Vorgehen. Wieder wird mit "Daten übernehmen" die Schallquelle in die Liste der Schallquellen eingetragen.

Wie viele Schallquellen so definiert werden können, hängt von der Größe der jeweiligen Schalldateien und dem Arbeitsspeicher des Rechners ab. Wie viele Schallquellen dann simultan auralisiert werden können, hängt von der Leistungsfähigkeit der Audio-Hardware ab.

### 5.3 Starten der Auralisation

Nach der Definition einiger Schallquellen ergibt sich z. B. die Baumstruktur in Abbildung 12. In ihr sind alle definierten Schallquellen mit allen Daten gelistet. Alle Daten zu der jeweiligen Schallquelle sind in dieser Darstellung änderbar. Sofern eine Schallquelle ausgewählt ist, kann sie auch aus der Liste entfernt werden.

Eingabe einer Schallquelle **Komplexe Situationen**

Beschreibung

Art der Schallquelle  
 Straßenverkehr aus Einzelvorbeifahrten

PKW/h: 6000    LKW/h: 200    Höchstgeschwindigkeit km/h: 80

Schallschutzmaßnahme  
 Lärmschutzwand, einseitig

Entfernung zur Schallquelle [m]: 5    Höhe [m]: 3

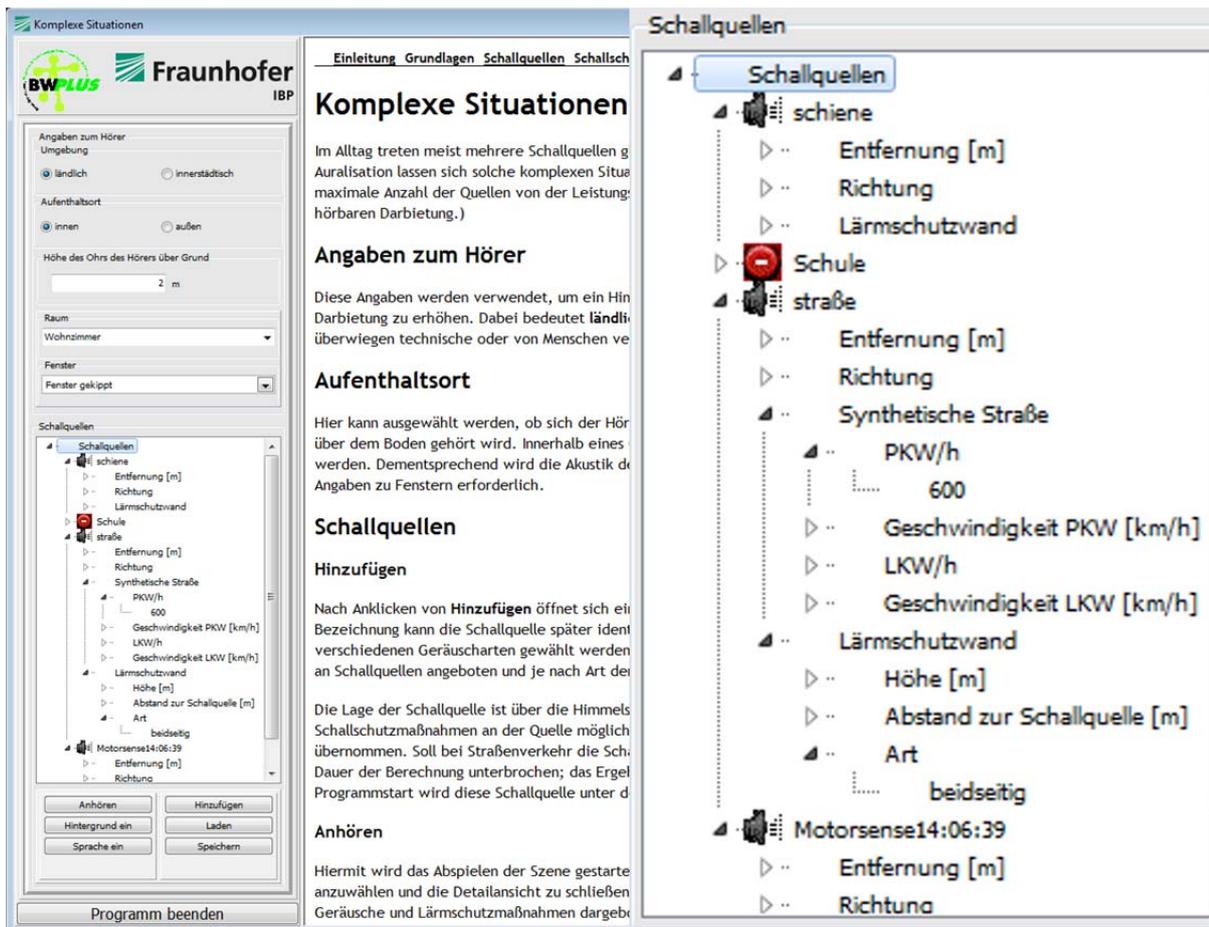
Lage der Schallquelle  
 NW     N     NO   
 W         O   
 SW     S     SO

Entfernung zum Hörer [m]

Daten übernehmen    Abbrechen

**Abbildung 11:** Eingabe einer Schallquelle - Straßenverkehr aus Einzelvorbeifahrten

Des Weiteren erkennt man aufgeklappte (aktive) Schallquellen - mit einem Lautsprechersymbol - und eingeklappte (inaktive) Schallquellen - mit einem roten Symbol. Nur die Schallquellen mit Lautsprechersymbol werden auralisiert. Dazu betätigt man das Bedienelement „Anhören“ - mehr ist nicht erforderlich. Um die Auralisation zu beenden, klickt man das dann sichtbare Bedienelement „Anhalten“. Die Frage, ob denn das Programm derzeit in der Lage ist, z. B. die in Abbildung 6 aufgezeigte komplexe Situation zu auralisieren, lässt sich eingeschränkt bejahen. Von der Anzahl der Schallquellen her ist dies bei einem sogenannten „Gamer-Rechner“ heutiger Bauart kein Problem. Bei den eingesetzten Baugeräten fehlen jedoch z. T. die Schallquellen. Und der Straßenverkehr kann zwar synthetisiert werden, nicht aber die Ampelstopps.



**Abbildung 12:** Komplexe Situationen - Auralisation (mit Ausschnittsvergrößerung der Schallquellen)

## 6 Zusammenfassung und Fazit

Mit dem vorliegenden Programm werden erstmalig die verschiedenen Geräusche einer Gesamtlärmsituation in Echtzeit auralisiert. Dazu gehört auch die Verwendung von Hintergrundgeräuschen, die unter Umständen die Störgeräusche maskieren, d. h. sie unhörbar machen oder weniger störend erscheinen lassen. Zugleich wird erstmalig der Straßenverkehr aus Einzelveifahrten synthetisiert. Des Weiteren wurde über den Projektauftrag hinaus ein Verfahren implementiert, das eine Kalibrierung der Lautstärke ohne Messgeräte gestattet. Das Programm selbst kann von jedermann für nicht-kommerzielle Zwecke kostenlos genutzt werden. Somit eröffnet es die Möglichkeit, sich - ohne Kenntnis akustischer Sachverhalte oder Kenngrößen - kraft eigenen Gehörs einen Eindruck von einer geplanten Infrastrukturmaßnahme zu verschaffen. Diese Möglichkeit ist sehr vorteilhaft, auch wenn sie normgerechte Prognosen nicht ersetzen kann.

Der modulare Aufbau des Programms ist eine günstige Voraussetzung für Erweiterungen, z. B. ein "Ampelmodul" für innerstädtischen Straßenverkehr oder die Implementierung von Fahr- oder Flugplänen. Die verfügbare Auralisationsleistung, nämlich 60 000 Fahrzeuge pro Stunde in der Straßenlärmsynthese plus weitere Geräusche aus der Datenbank simultan in Echtzeit zu auralisieren, reicht aus, um selbst sehr komplexe Situationen virtuell abzuhören. Von Nicht-Akustikern, die bislang als Testpersonen für die Programmnutzung eingesetzt wurden, kamen übereinstimmend Kommentare wie „Die komplexen Situationen machen richtig Spaß“.

Angesichts der Mächtigkeit des Programms sind natürlich noch nicht entdeckte Fehler zu vermuten, aber zugleich Erweiterungsideen vorstellbar. Beide Aspekte werden daher nach Projektabschluss weiter betreut und verfolgt. In jedem Fall ist aber mit dem entwickelten Instrumentarium das Ziel, akustische Wirkungen von Infrastrukturmaßnahmen ohne spezielle Vorkenntnisse erfahrbar zu machen und damit schwierige Diskussionen zu versachlichen, ein deutliches Stück näher gerückt.

## **7 Literaturverzeichnis**

- [1] Lärm bekämpfen - Ruhe schützen. LfU Baden-Württemberg (Hrsg.) 2004.
- [2] K. Tegeder: Summation von Schallpegeln verschiedener Geräuscharten - Pragmatischer Ansatz für eine ganzheitliche Lärmbeurteilung. LfU Baden-Württemberg (Hrsg.), 2000.
- [3] VDI 2720 Blatt 1: 1997-30: Schallschutz durch Abschirmung im Freien.
- [4] F. Bonikos: Schalldämmung von Fenstern bei Verkehrslärmanregung. Diplomarbeit, Universität Stuttgart (1997).
- [5] [www.fraunhofer.ibp.de](http://www.fraunhofer.ibp.de): „compas zu Berechnung von Schalldämpfern“ [Online]

## Teilprojekt 2

### 1 Umweltlärm und Lärmschutz

Umweltlärm stellt aufgrund der Zunahme des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs eine erhebliche Belastung des Menschen dar. Der Verkehr wird den Prognosen zufolge auch in Zukunft wachsen, und daher ist auch weiterhin mit steigender Belastung zu rechnen (siehe z. B. Kloepfer et al., 2006). Bezüglich der Bewertung der einzelnen Lärmarten existieren zumindest für Verkehrslärm die bekannten Dosis-Wirkungskurven (z. B. Miedema & Vos, 1998). Weniger untersucht, aber stark diskutiert ist Lärm aus Kindertagesstätten und Freizeiteinrichtungen. Weiterhin ist die Bewertung von kombiniertem Lärm aus verschiedenen Quellen ein weitgehend offenes Problem.

Bezüglich der Bewertung von Lärmschutz stellt sich das Problem der Abwägung zwischen den meist erheblichen Kosten, welche in der Regel von der öffentlichen Hand gedeckt werden müssen, und dem Nutzen der Lärmschutzmaßnahmen. Der Nutzen der Maßnahmen wird bislang in sehr abstrakten akustischen Kennwerten (z. B. Pegelminderung) angegeben. Lärmschutz dient jedoch dem Menschen, und deshalb sind dessen Reaktionen und Bewertungen ausschlaggebend. Aufgrund akustischer Kenngrößen können sich die betroffenen Menschen vor der Realisation einer Lärmschutzmaßnahme in der Regel keine Vorstellung davon bilden, wie sich die Lärmsituation nach der Maßnahme, beispielsweise der Errichtung einer Lärmschutzwand, verändern wird. Mittels der Technik der Auralisation, welche in den vorliegenden Untersuchungen angewandt wird, kann jedoch eine bestimmte Hörsituation simuliert werden. Die Betroffenen und die Entscheidungsträger können sich diese Simulationen über Kopfhörer oder Lautsprecher anhören und vergleichen. Wenn es um die Entscheidung für oder gegen bestimmte Lärmschutzmaßnahmen geht, können diese Auralisationen somit eine wichtige Hilfe geben.

In den vorliegenden Untersuchungen werden verschiedene Lärmsituationen von den Teilnehmern des Versuchs im Original und in seinen auralisierten bzw. gedämmten Versionen angehört und z. B. bezüglich ihrer Lästigkeit bewertet. Die Untersuchungen werden anhand einer breiten Palette unterschiedlicher Lärmarten durchgeführt, welche neben Verkehrslärm auch Freizeit-, Kinder-, Baustellen- und Maschinenlärm beinhaltet. Auralisiert wird die Dämmung durch verschiedene Schallschutzfenster und Lärmschutzwände. Die zentralen Untersuchungsfragen, welche in dieser Arbeit behandelt werden, sind wie folgt:

Umweltlärm kann in sehr unterschiedlichen Formen auftreten; neben Verkehrslärm wird auch über Lärm aus Sportstätten und Kindergärten geklagt. Kann die Lästigkeit dieser verschiedenen Lärmarten dennoch einheitlich auf deren Pegel bezogen werden oder spielen auch andere Eigenschaften, wie deren spektrale Zusammensetzung oder deren temporale Variation eine wichtige Rolle? Wie verhält es sich, wenn verschiedene Lärmquellen gleichzeitig auftreten? Addieren sich dann die Wirkungen der einzelnen Quellen oder dominiert eine Quelle die Bewertung?

Für die subjektive Bewertung der durch die Lärmschutzmaßnahme erzielten Pegelreduktion, welche den Schwerpunkt der Untersuchungen darstellt, wird die Annahme des Sone-Modells nach Stevens (siehe z. B. Stevens 1975) geprüft, wonach eine Pegelminderung um 10 dB eine Halbierung der wahrgenommenen Lautheit bewirken soll. Die Befundlage zu dieser 10-dB-Regel ist uneinheitlich; so findet Warren (1973, 2008) eine Lautheitshalbierung bereits bei einer Minderung von 6 dB. Für breitbandige Geräusche sowie für Verkehrslärm deuten hingegen die bisherigen Befunde darauf hin, dass eine Minderung um 10 dB für eine Halbierung der Lautheit nicht ausreicht (Fastl & Zwicker, 2007; Namba & Kuwano, 1991). Analog zur Lautheit stellt sich diese Frage auch bei der Reduktion der empfundenen Lästigkeit. Bei welcher Pegelminderung ist der Lärm nur noch halb so lästig? Neben diesen Verhältnisskalierungen wird auch ein Kategorienskalierungsverfahren eingesetzt, das auf absoluten Urteilen basiert. In einer

abschließenden Untersuchung wird geprüft, wie sich die Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit vom Lärmschutz verändert. Hierzu werden den Teilnehmern die auralisierten Lärmaufnahmen zusammen mit Sprache präsentiert. Wird durch eine Verbesserung des Lärmschutzes, z. B. durch eine höhere Schallschutzklasse des Fensters oder eine höhere Lärmschutzwand, die Kommunikationssituation signifikant positiver bewertet? Der theoretische Hintergrund dieser Arbeit gliedert sich folgendermaßen: Zunächst wird auf den Lärmbegriff im Allgemeinen und den Begriff Umweltlärm im Besonderen eingegangen. Anschließend werden Lautheit und Lästigkeit als die Beurteilungsdimensionen für Lärm vorgestellt, die durch Lärmschutzmaßnahmen vorrangig beeinflusst werden. Es werden weitere psychoakustische Parameter, wie Schärfe und Rauigkeit, vorgestellt, welche bei der Lärmbewertung eine Rolle spielen können. Im Anschluss wird die aktuelle Befundlage zur subjektiven Beurteilung von Lärminderungsmaßnahmen, zur Beurteilung von kombiniertem Lärm und zur Sprachverständlichkeit unter Lärm jeweils kurz umrissen. Im nächsten Schritt werden die psychometrischen Skalierungsmethoden vorgestellt, welche in den Untersuchungen Verwendung finden. Schließlich werden die empirischen Fragestellungen präsentiert.

## **1.1 Organisatorische Rahmenbedingungen**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Drittmittel-Projektes „Wirkungsbezogene Gesamtlärmsimulation und -bewertung“, welches vom Projektträger Karlsruhe am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) gefördert wurde. Das Projekt ist eingegliedert in das Programm „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ des Landes Baden-Württemberg (BW-PLUS). Die Arbeit im Projekt erfolgte in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) in Stuttgart. Das IBP stellte die erforderlichen Lärmaufnahmen und Auralisationen zur Verfügung. Die Aufgaben der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt erstreckten sich neben den subjektiven Beurteilungen der Aufnahmen und Auralisationen, auch auf Untersuchungen zur Auswirkung von Lärm und Lärmschutzmaßnahmen auf die Sprachverständlichkeit. Die im Projektantrag genannten Untersuchungen zu Lärmwirkungen auf kognitive Leistungen wurden nicht aufgegriffen, da sich in parallel laufenden Projekten (siehe z. B.: Schlittmeier, Hellbrück, Thaden, Vorländer, 2008) und in Vorversuchen gezeigt hat, dass zur Erzielung reliabler Ergebnisse ein sehr großer Messaufwand nötig gewesen wäre, der den zeitlichen Rahmen des vorliegenden Projektes gesprengt hätte.

## **2 Theoretischer Hintergrund**

### **2.1 Lärm und Umweltlärm - Begriffsdefinitionen**

Lärm wird definiert als unerwünschter Schall. Dies bedeutet, ohne den Menschen als Hörer gibt es keinen Lärm. Der Mensch urteilt, ob der Schall erwünscht ist oder nicht und klassifiziert entsprechend den Schall als Lärm. Zudem gibt es auch kaum Lärm ohne den Menschen als mittelbaren oder unmittelbaren Verursacher. Die Lärmarten, welche in dieser Arbeit untersucht werden, sind sämtlich durch den Menschen verursacht. Auch Lärm von Haustieren, wie der Hund des Nachbarn oder die Frösche in dessen Teich, werden eben diesem Nachbarn zugeschrieben. Es ist anzunehmen, dass der Mensch Naturgeräusche, welche durchaus sehr laut sein können, wie z. B. Donnergrollen oder große Wasserfälle, nicht nach deren „Unerwünschtheit“ beurteilen wird. Die Unerwünschtheit von Lärm setzt auch seine Vermeidbarkeit voraus, welche nur bei Geräuschen gegeben ist, die durch den Menschen verursacht werden.

Ursprünglich geht der Begriff Lärm auf das Italienische „all' arme“ zurück. Dies bedeutet: „zu den Waffen“. Damit ist bereits der ursprüngliche Signalcharakter des Lärms benannt. Der Lärm soll vor Gefahren in der Umwelt warnen, wie z. B. im Krieg vor dem Feind. Denkt man an typische Lärmquellen in der heutigen Zeit, können diese in Einzelfällen durchaus ein nützliches Warnsignal

darstellen: Das Geräusch eines herannahenden Fahrzeugs warnt davor, die Straße zu überqueren. Hört man hingegen den ganzen Tag über Straßenlärm durch das Fenster, hat dies keine sinnvolle Hinweiskfunktion mehr, obgleich der Verkehrslärm immer noch als störend erlebt wird.

An dieser Stelle soll kurz auf den Begriff *Umweltlärm* eingegangen werden, da auch die in den Untersuchungen verwendeten Schalle als solcher bezeichnet werden. Eine verbindliche Definition für den Begriff Umweltlärm existiert nicht. In der Praxis hat es sich aber eingebürgert, Lärmquellen, welche in die „freie“ Umwelt abstrahlen, unter dem Begriff Umweltlärm zu subsumieren. Lärm im Raum wie schreiende Kinder im Klassenzimmer oder Maschinengeräusche in der Fabrikhalle zählen demnach nicht zum Umweltlärm. Sie unterliegen nicht dem Bundes-Immissionsschutzgesetz bzw. der TA Lärm, sondern der Arbeitsstättenverordnung.

Prototypisch für Umweltlärm sind hingegen alle Arten von Verkehrslärm, von der Straße, von der Schiene und aus der Luft. Hinzu kommt der Lärm von Baustellen, von Industrieanlagen, von Freizeiteinrichtungen wie Fußballstadien und von Spielplätzen. Zu denken ist auch an Geräte zur Garten- und Feldbearbeitung wie Rasenmäher, Laubsauger und Motorsense.

## 2.2 Lautheit von Lärm

Die Empfindung der Lautheit hängt in erster Linie vom Schalldruckpegel ( $L$ ) ab, welcher in Dezibel ( $dB$ ) angegeben wird. Da das Dezibel eine logarithmische Maßeinheit darstellt, gibt die Differenz zwischen zwei  $dB$ -Werten nicht die Differenz zwischen zwei Schalldrücken wieder, sondern deren Verhältnis. So entspricht eine Pegelminderung durch Lärmschutz von  $6\text{ dB}$  einer Halbierung des Schalldrucks, bei einer Minderung um  $12\text{ dB}$  bleibt nur ein Viertel des ursprünglichen Schalldrucks übrig. Probleme bereitet die  $dB$ -Skala, wenn es um das *Verhältnis* von Lautheitsempfindungen geht. So werden  $30\text{ dB}$  nicht einfach halb so laut wie  $60\text{ dB}$  empfunden, sondern wesentlich leiser. Auf der Basis empirischer Untersuchungsdaten führte der amerikanische Psychophysiker S.S. Stevens daher eine eigene Skala für die Lautheit ( $N$ ) ein, nämlich die Sone-Skala (Stevens, 1936). Die Sone-Skala stellt eine Verhältnisskala dar: Ein Schall mit  $2\text{ sone}$  wird als doppelt so laut wie ein Schall mit  $1\text{ sone}$  empfunden, ein Schall mit  $4\text{ sone}$  als doppelt so laut wie ein Schall mit  $2\text{ sone}$  usw. Die Beziehung zwischen der Lautheit in Sone und Schalldruck ( $p$ ) ist nach Stevens (1936) durch eine Potenzfunktion (Stevenssches Potenzgesetz) beschreibbar:

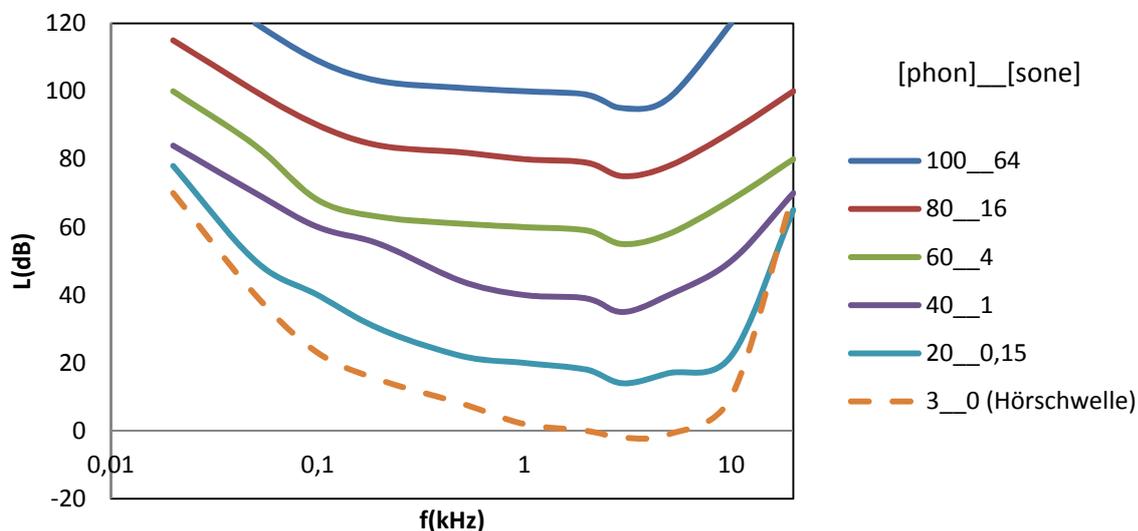
$$N = p^n$$

Der Exponent  $n$  beträgt für den Schalldruck  $0,6$ . Wenn statt des Schalldrucks  $p$  auf die Schallintensität  $I$  Bezug genommen wird, die zum Quadrat des Schalldrucks proportional ist, nimmt der Exponent den Wert  $0,3$  an. Gleichen Schalldruckverhältnissen bzw. Schallintensitätsverhältnissen entsprechen demnach gleiche Lautheitsverhältnisse. So führt ein Pegelzuwachs von  $10\text{ dB}$  jeweils zu einer Verdoppelung der Lautheit. Bezugspunkt für die Sone-Skala ist ein  $1\text{ kHz}$ -Ton von  $40\text{ dB}$ , dem die Lautheit  $1\text{ sone}$  zugewiesen wird. Ein doppelt so lauter  $1\text{ kHz}$ -Ton hat demnach  $2\text{ sone}$  und  $50\text{ dB}$ , ein viermal so lauter  $4\text{ sone}$  und  $60\text{ dB}$  usw. Bei Pegeln unter  $40\text{ dB}$  bis hin zur Hörschwelle werden die Pegelunterschiede, welche zu einer Verdoppelung der Lautheit führen, jedoch zunehmend geringer (siehe Fastl & Zwicker, 2007, S. 206). Bei niedrigen Pegeln gilt somit die Potenzfunktion nicht mehr. Für die Beurteilung von Lärminderung hat die Sone-Skala eine hohe Relevanz. Aus der Pegelminderung bzw. aus dem Verhältnis der Sone-Werte des Schalls mit und ohne Lärmschutz kann direkt vorhergesagt werden, um wie viel leiser der Lärm durch den Schallschutz empfunden wird. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass die Annahmen der Sone-Skala auch viel Kritik hervorgerufen haben. In einer umfangreichen Untersuchung findet Warren (1973), dass eine Halbierung der Lautheit bereits bei einer Pegelminderung von  $6\text{ dB}$  stattfindet und somit der Exponent der Potenzfunktion höher anzusetzen ist. Andere Untersuchungen kommen diesbezüglich wiederum zu anderen Ergebnissen. In einem

tabellarischen Überblick von Stevens (1955) variieren die entsprechenden Pegelminderungen von 2,1 dB bis 24 dB (siehe auch Sader, 1966; Warren, 2008). Wird für einzelne Personen eine Lautheitsfunktion bestimmt, weisen die Exponenten dieser individuellen Potenzfunktionen ebenfalls hohe Unterschiede auf (z. B. Hellbrück & Heller, 1981; Scharf & Houtsma, 1986).

### 2.2.1 Einfluss des Frequenzspektrums auf die Lautheit - Bewertungspegel

In geringerem Maße als vom Schalldruckpegel hängt die empfundene Lautheit auch von der Frequenz des Schalles oder Tones ab. Tiefe Töne (um 100 Hz) werden leiser wahrgenommen als mittlere Töne (um 1 kHz) mit dem gleichen Pegel. Der Lautstärkepegel, welcher die Einheit Phon trägt, soll diesem Umstand Rechnung tragen: Ein Ton mit beliebiger Frequenz innerhalb des Hörfeldes, welcher X Phon aufweist, wird als gleichlaut empfunden wie ein 1kHz-Ton mit X dB. Veranschaulicht wird die Pegelabhängigkeit der Lautheit mittels sogenannter Konturen gleicher Lautheit (Isophone) wie sie z. B. Fletcher und Munson (1933) oder Robinson und Dadson (1956) ermittelt haben. Ein Beispiel für Isophone ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1:** Hörschwelle und Kurven gleicher Lautheit (Isophone) nach Fastl und Zwicker (2007, S. 204). Rechts ist der Lautstärkepegel  $L_N$  in Phon und die Lautheit  $N$  in Sone der jeweiligen Kurve angegeben.

Die Isophone in Abbildung 1 weisen im Bereich um 4 kHz ein Minimum auf und steigen zu tieferen und höheren Frequenzen hin wieder an. Bei der Messung des Schallpegels in dB wird diese Frequenzabhängigkeit der Lautheit nicht berücksichtigt; für den Gesamtpegel werden alle Frequenzanteile gleich gewichtet. Als Alternative existieren die sogenannten Bewertungspegel, welche Pegelabschläge für tief- und hochfrequente Anteile eines Schalles vorsehen. Mittels der in den Schallpegelmessern eingebauten Filter werden die entsprechenden Frequenzanteile abgeschwächt. Gängig sind A, B und C-Bewertungsfilter, welche auch genormt sind (DIN 45633, B1. 1, Präzisions-Schallpegelmessers). Die A-Bewertung entspricht in etwa den untersten Kurven in Abbildung 1, von der Hörschwelle bis 30 Phon. Die B-Bewertung entspricht dem Bereich zwischen 30 und 60 Phon, die C-Bewertung höheren Pegeln ab 60 Phon. Entsprechend werden die tieffrequenten Anteile des Schalls von A nach C zunehmend weniger abgeschwächt. Die Abschwächung von hohen Frequenzen ab ca. 8 kHz ist hingegen für jede Bewertung fast identisch. Bei der Messung des Umweltlärms ist bereits seit einigen Jahrzehnten die A-Bewertung vorgeschrieben. Dieses Vorgehen wurde und wird immer wieder stark kritisiert, da der Lärm in der Regel höhere Lautstärkepegel als 30 Phon aufweist und somit eher eine B- oder C-Bewertung

angemessen wäre. Nichtsdestotrotz ist der A-bewertete Schallpegel international das Kriterium, auf dessen Grundlage rechtliche Entscheidungen (z. B. über Verpflichtungen zum Lärmschutz) getroffen werden.

Für die Lautheitsberechnung nach der Sone-Skala kann hingegen auf Bewertungsfilter verzichtet werden. Wie aus Abbildung 1 hervorgeht, finden die Sone-Werte ihre Entsprechung direkt in den Phon-Werten, wodurch die Frequenzabhängigkeit der Lautheit in die Sone-Skala integriert wird. Die moderne Sone-Skala, welche in DIN 45631 und ISO 532 B normiert ist und auf dem Lautheitsmodell von Eberhard Zwicker beruht, wurde gegenüber der ursprünglichen Skala von Stevens (1936) weiterentwickelt (siehe hierzu: Fastl & Zwicker, 2007). Bezüglich der Lautheitsverhältnisse haben sich die Annahmen der Sone-Skala jedoch nicht verändert: Bei einem Zuwachs von 10 dB bzw. 10 phon verdoppelt sich die Lautheit und somit beträgt der Exponent für den Schalldruck nach wie vor 0,6 und für die Schallintensität 0,3 (bei Pegeln über 40 dB). Einen geringeren Exponenten berichten Fastl und Zwicker (2007, S. 207) für Breitbandrauschen (Exponent bei *uniform exciting noise*: 0,23, bei *1-kHz Ton*: 0,3; Bezugsgröße war die Schallintensität). Ebenso finden Namba und Kuwano (1991; S. 232) für Verkehrslärm Exponenten im Bereich von 0,21 bis 0,23. Daher ist für die Verdoppelung bzw. Halbierung der Lautheit von breitbandigen Geräuschen und Umweltlärm eine höhere Differenz als 10 dB zu erwarten. Mit einem Exponenten von 0,21 wäre eine Differenz von etwa 14 dB, mit einem Exponenten von 0,23 eine Differenz von etwa 13 dB verbunden.

## 2.2.2 Lautheit von pegelvariierenden Schallen: zeitliche Integration

Umweltlärm variiert meist im Pegel, z. B. beim Stopp-and-Go-Verkehr auf der Straße. Auch auf Baustellen, an Kindergärten und Freizeitanlagen herrscht kein konstanter Lärmpegel. Beim fließenden Verkehr ist die Pegelvariation dagegen eher gering. Es stellt sich daher die Frage, wie der Pegel über einen bestimmten Zeitraum gemittelt werden kann, um zu einem Einzahlwert zu kommen. Hierfür hat sich der energieäquivalente Dauerschallpegel ( $L_{eq}$ ) weitgehend durchgesetzt. Beim  $L_{eq}$  wird kontinuierlich der momentane Schallpegel gemessen und die Werte anschließend über den gesamten Messzeitraum energetisch gemittelt. Das Ergebnis ist der Pegel, den ein gleich langes stationäres Schallsignal aufweisen müsste, um insgesamt auf dieselbe Schallenergie zu kommen. Eine ausführliche Erläuterung zur Berechnung des  $L_{eq}$  findet sich in Maue (2009, Kap. 6.4).

Für die Sone-Lautheit von pegelfluktierenden Schallen ist in der Norm DIN 45631/A1 die Perzentillautheit  $N5$  festgelegt. Das ist die Lautheit, welche in fünf Prozent der Schalldauer erreicht oder überschritten wird. Somit orientiert sich die  $N5$ -Lautheit an den Pegelspitzen und ist höher als die mittlere Lautheit. Die Grundlage für  $N5$  stellten Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen einem abschließenden Lautstärkeurteil und den momentanen Lautstärkeempfindungen dar, welche die japanische Forschergruppe um Namba und Kuwano durchführte. Die Beurteiler konnten hier während der Präsentation eines pegelvariierenden Schalls anhand einer Skala kontinuierlich angeben, wie laut sie momentan den Schall empfinden. Anschließend wurde ein Gesamtlautheitsurteil für den gehörten Schall abgegeben. Das Gesamtlautheitsurteil fiel dabei höher aus als die gemittelten Momentanurteile (Fastl & Zwicker, 2007, Kap. 16.1.4; Kuwano, 2007b; Kuwano & Namba, 1985, 2010).

## 2.3 Weitere psychoakustische Parameter

Neben der Lautheit existieren auch noch andere Eigenschaften von Schall, die vom Menschen wahrgenommen und subjektiv bewertet werden können. Diese psychoakustischen Größen werden

hier kurz beschrieben. Für eine ausführliche Erläuterung zu deren Berechnung sei auf Fastl und Zwicker (2007) verwiesen.

Die Empfindung *Schärfe* entsteht in erster Linie bei Geräuschen mit dominanten hochfrequenten Anteilen. Auch der Pegel beeinflusst die Ausprägung der Schärfeempfindung: Ein scharfes Geräusch wird bei einer Erhöhung seiner Lautstärke als noch schärfer empfunden. Zur Quantifizierung im psychoakustischen Experiment werden z. B. Skalen verwendet, welche von stumpf bis scharf reichen. Gemessen wird die Schärfe in der Einheit *acum*.

Die Empfindung *Tonhaltigkeit* entsteht, wenn im Geräusch einzelne Töne wahrnehmbar sind. Dies kommt unter anderem bei Maschinen mit rotierenden Komponenten, wie z. B. einer Kreissäge vor. Die Tonhaltigkeit ist umso höher, je mehr sich die tonalen Komponenten in ihrem Pegel vom Hintergrundgeräusch abheben. Eine gängige Einheit für die Tonhaltigkeit hat sich bisher nicht umfassend etabliert. Das Schallanalyseprogramm ArtemiS<sup>®</sup>, welches auch in der vorliegenden Arbeit verwendet wird, berechnet die Tonhaltigkeit nach den Vorschlägen von Terhardt und Aures (Aures, 1984; Terhardt & Stoll, 1982) und gibt als Einheit *tu* an.

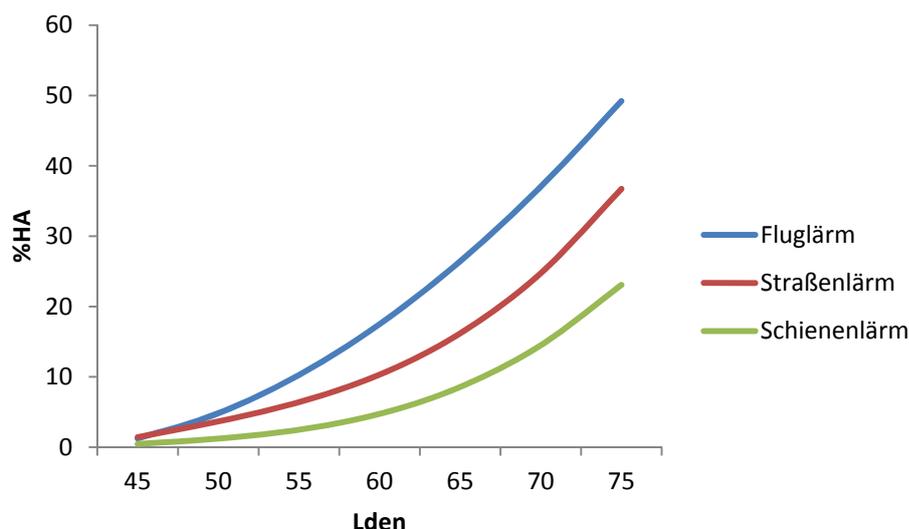
Die Empfindung *Schwankungsstärke* entsteht in erster Linie durch periodische Schwankungen in der Lautstärke (Amplitudenmodulation) eines Geräusches. Am stärksten ausgeprägt ist diese Empfindung bei einer Amplitudenmodulation von 4 Hz. Auch Frequenzmodulationen, also periodische Veränderungen der Tonhöhe, können die Empfindung von Schwankungsstärke hervorrufen. Die Schwankungsstärke wird mit zunehmendem Pegel höher. Gemessen wird sie in der Einheit *vacil*. Bei Modulationsfrequenzen ab etwa 15 Hz geht die Empfindung Schwankungsstärke in die Empfindung *Rauigkeit* über. Maximale Rauigkeit wird bei einer Modulationsfrequenz um 70 Hz erreicht. Gemessen wird die Rauigkeit in der Einheit *asper*.

## 2.4 Lästigkeit

Die Lästigkeit eines Schalls kann darin begründet sein, dass dieser zu laut ist und/oder unangenehm klingt, kann also auf Wahrnehmungseigenschaften des Schalls beruhen. Bekannte Ansätze zur Analyse des Wohlklangs bzw. Missklangs von Geräuschen sind die „sensorische Angenehmheit“ (sensory pleasantness) nach Fastl und Zwicker (2007, Kap. 9.4) und die „wahrgenommene Lärmigkeit“ (perceived noisiness) nach Kryter (1985). Bei diesen wird aus dem Pegel des Schalls sowie seinen spektralen und temporalen Eigenschaften der Wohlklang bzw. die „Lärmigkeit“ vorhergesagt. Mit zunehmender Lautheit, Schärfe und Rauigkeit wird ein Schall unangenehmer.

Aber auch Schall, der diese sensorischen Eigenschaften nicht aufweist, kann lästig sein. Guski führt Belästigung auf die erwartete oder tatsächliche Störung einer Tätigkeit zurück (Guski, 1991; Guski, 2002; Guski & Bosshardt, 1992; Guski et al. 1999). Gemäß einer Studie von Guski, Felscher-Suhr und Schuemer (1999) wird Belästigung auch am häufigsten mit dem Begriff „Störung“ assoziiert. In Kloepfer et al. (2006, S. 156) wird Belästigung definiert als „ein Gefühl der Verärgerung und der Unzufriedenheit, mit dem zu rechnen ist, wenn aktuelle Tätigkeiten oder Gefühle gestört werden.“ Für grundlegende menschliche Tätigkeiten und Bedürfnisse wie Kommunikation und Schlaf bestimmt vorrangig der Pegel des Lärms dessen Störpotential: Je lauter der Lärm desto mehr wird Sprache maskiert (Kryter, 1985) und desto wahrscheinlicher sind Aufwachreaktionen (Griefahn, 2002). Daher stehen Schallpegel und Lästigkeit in einem positiven Zusammenhang (siehe z. B. Fastl, 1992, 1999; Kuhnt et al., 2008; Martín, Tarrero, González & Machimbarrena, 2006; Namba & Kuwano, 2004), welcher in Dosis-Wirkungskurven veranschaulicht wird (z. B. Fidell, Barber & Schulz, 1991; Miedema & Oudshoorn 2001; Miedema & Vos, 1998). Hierzu wird der Schallpegel über einen längeren Zeitraum, z. B. über 24 Stunden, gemessen und ein sogenannter Tag/Nacht Pegel (day/night level –  $L_{dn}$ ), oder ein Tag/Abend/Nacht Pegel (day/evening/night level –  $L_{den}$ ) errechnet. Sowohl beim  $L_{dn}$  als auch beim  $L_{den}$  wird im

Zeitraum von 22 bis 6 Uhr zu dem gemessenen Pegel ein Zuschlag (Malus) von 10 dB addiert, da Schlafstörungen als besonders gravierende Lärmfolgen zu bewerten sind (Griefahn, 2002). Beim  $L_{den}$  wird zusätzlich auch für die Zeit zwischen 18 und 22 Uhr ein Zuschlag von 5 dB einkalkuliert. Diese 24 Stunden Pegel werden dann in Beziehung gesetzt zur Belästigungsreaktion. Dabei wird jedoch nicht das arithmetische Mittel des Lästigkeitsurteils über alle Beurteiler verwendet, sondern der prozentuale Anteil an „stark“ Belästigten (*Percent Highly Annoyed* - %HA) auf der Ordinate abgetragen. Zu den sehr stark Belästigten zählen Personen, welche ihr Urteil in den oberen 28 Prozent einer Belästigungsskala einordnen (Schultz, 1978). Durch das Verwenden eines solchen definierten Skalenbereichs lassen sich verschiedene Lästigkeitsskalen und somit auch unterschiedliche Untersuchungen zur Lästigkeit besser miteinander vergleichen. In manchen Studien wird hingegen auf eine Lästigkeitsskala ganz verzichtet. Stattdessen sollen die Probanden angeben, ob sie ein Geräusch lästig finden oder nicht. Namba und Kuwano (Namba & Kuwano, 2004) finden eine Korrelation von .98 zwischen dem A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel ( $L_{Aeq}$ ) von Verkehrslärm und dem Prozentsatz der Personen, die sich durch diesen Lärm gestört fühlen. Alternativ werden als Prädiktor für die Lästigkeit auch andere Kenngrößen als der  $L_{Aeq}$  vorgeschlagen. Cik (2009) und Nilsson (2007) ließen Verkehrslärm beurteilen und fanden eine bessere Korrelation des Lästigkeitsurteils mit der Lautheit in Sone als mit dem  $L_{Aeq}$ . Diese beiden Autoren untersuchten auch den Zusammenhang zwischen der spektralen Zusammensetzung von Verkehrslärm und der Lästigkeit. Nilsson (2007) ließ Straßenverkehrslärmszenarien mit unterschiedlich ausgeprägten Anteilen an tiefen Frequenzen beurteilen. Je mehr tieffrequente Anteile im Schall enthalten waren, desto höher waren die Lästigkeitsurteile. Er schlägt daher vor, bei der Beurteilung von Verkehrslärm anstatt der A-Bewertung die C-Bewertung zu verwenden. Umgekehrt können aber auch viele hochfrequente Anteile im Schall zu höheren Lästigkeitsurteilen führen. Quantifiziert werden kann dies am oben vorgestellten psychoakustischen Parameter *Schärfe* (Fastl & Zwicker, 2007). In den Untersuchungen zu Straßen- und Schienenverkehrslärm von Cik (2009) sowie von Roßberg und Guidati (2008) zeigte sich ein positiver Zusammenhang zwischen Schärfe und Lästigkeitsurteil. In Bezug auf Verkehrslärm spielt auch die Verkehrsart eine Rolle. Bei gleichen Pegeln wird Fluglärm als lästiger erlebt als Straßenlärm und dieser wiederum lästiger als Schienenlärm (Fastl, Filippou, Schmid, Kuwano & Namba, 1998; Miedema & Oudshoorn 2001; Miedema & Vos, 1998; Möhler, Liepert, Schuemer, Schuemer-Kohrs, Schreckenberger & Mehnert et al., 2000; Schuemer & Möhler 2003). In Abbildung 2 sind beispielhaft anhand der Untersuchung von Miedema und Vos (1998) die unterschiedlichen Dosis-Wirkungskurven für Flug-, Straßen- und Schienenverkehr dargestellt.



**Abbildung 2:** Anteil stark belästigter Personen (%HA) in Abhängigkeit von  $L_{den}$  und der Art des Verkehrslärms (nach Miedema und Vos, 1998, S. 3443).

Die größere Lästigkeit von Fluglärm gegenüber anderen Verkehrslärmarten wird auch durch neuere Untersuchungen bestätigt (Bayazit, San, Kose, Bicer, Buyukgoz & Celik et al., 2009; McGuire & Davies, 2009). Da Schienenlärm die geringste Lästigkeit aufweist, erhält er in Deutschland einen Bonus von 5 dB. Dies bedeutet, dass Pegelgrenzen beim Schienenverkehr um 5 dB höher angesetzt werden als beim Straßenverkehr. An dieser Stelle soll eine Feldstudie aus Korea erwähnt werden, in der Schienenverkehr lästiger eingestuft wurde als Straßenverkehr (Ko, Chang & Kim, 2009). Möglicherweise spielen bei der Lärmbeurteilung auch kulturelle Faktoren eine Rolle, wie etwa verschiedene Einstellungen gegenüber den einzelnen Verkehrsträgern (Kuwano et al., 1999). Neben diesen interkulturellen sind auch interindividuelle Differenzen hinsichtlich der Lärmempfindlichkeit sowie das Lebensalter zu berücksichtigen.

#### **2.4.1 Einfluss von Lärmempfindlichkeit und Alter auf das Lästigkeitsurteil**

Der Zusammenhang zwischen Lärmempfindlichkeit und Lästigkeitsurteil ist anhand vieler Studien belegt (Fields, 1993; Miedema, 2007; Miedema & Vos, 1999; Möhler, Liepert, Schuemer, Schuemer-Kohrs, Schreckenberger, Mehnert et al., 2000; van Kamp, Job, Hatfield & Haines, 2004). Wenig konsistente Ergebnisse finden sich hingegen für den Zusammenhang zwischen Alter und Lästigkeit. Thomas und Jones (1981) fanden eine positive Korrelation zwischen Lästigkeit und Alter, Weinstein (1980) hingegen eine negative. Schütte, Marks, Wenning und Griefahn (2007) konnten bei der Validierung ihres Lärmfragebogens „NoiSeQ“ keinen bedeutsamen Einfluss des Alters auf die Lärmempfindlichkeit nachweisen. In einer umfangreichen Metaanalyse von Miedema und Vos (1999), welche 34 Studien zur Lärmbelastigung mit insgesamt über 49.000 Befragten beinhaltet, wird ein Alterseffekt berichtet. Jedoch besagt dieser, dass Personen mittleren Alters (zwischen 30 und 50) höhere Lästigkeitsurteile abgeben als jüngere und ältere Personen (siehe auch: Van Gerven, Vos, Van Boxtel, Janssen & Miedema, 2009).

#### **2.5 Beurteilung der Lärminderung durch Lärmschutz - Befundlage**

Durch den Lärmschutz wird der Pegel des Lärms gemindert und dementsprechend sollte sich auch die empfundene Lautheit und Lästigkeit reduzieren. Dies wird in den entsprechenden Studien bestätigt, sowohl in Feldstudien (Griffiths & Raw, 1987; Kastka, 1981; Kastka, Buchta, Ritterstaedt, Paulsen & Mau, 1995; Raw & Griffiths, 1990), als auch in Laborstudien (Felscher-Suhr & Höger, 2002; Felscher-Suhr & Schreckenberger, 2000; Joynt & Kang, 2010). In den zitierten Feldstudien wurde die Situation vor und nach der Installation von Lärminderungsmaßnahmen verglichen. Für die Vorher-Situation wurden Dosis-Wirkungskurven erstellt und geprüft, ob diese Kurven auch die Belästigung in der Nachher-Situation vorhersagen können. Bei den Studien von Kastka (Kastka, 1981; Kastka et al. 1995) bestanden die Lärminderungsmaßnahmen in Lärmschutzwänden und Lärmschutzwällen. Die Befragungen wurden von Kastka zu drei Zeitpunkten durchgeführt: Ein Jahr vor der Maßnahme, ein Jahr danach und noch einmal nach zehn Jahren. Kastka differenzierte bei den Fragen zur Belästigung zwischen einer reizzentrierten und einer Verhaltenskomponente. Die reizzentrierte Belästigung sank stärker ab als es die Dosis-Wirkungskurve der Vorher-Situation prognostizierte. Ein anderes Bild ergab sich für die Verhaltenskomponente z. B. für die Störung des Wohlbefindens: Diese sank weniger stark als vorhergesagt. In den Studien von Griffiths und Raw (Griffiths & Raw, 1987; Raw & Griffiths, 1990) ergab sich hingegen durchgehend eine stärkere Belästigungsreduktion als vorhergesagt. Die Lärminderung in den Studien von Griffiths und Raw bestand in einer Reduktion der Verkehrsdichte. Möglicherweise wird sowohl in Bezug auf Verkehrsminderung als auch auf Lärmschutzwände der Kontrast zur Vorher-Situation überdeutlich wahrgenommen, wobei sich die entsprechenden Effekte auch Jahre nach der Maßnahme zeigten (Raw & Griffiths, 1990). Diskutiert wird weiterhin, dass in den Bewertungen das Gefühl von „Ernstgenommensein“ und Dankbarkeit zum Ausdruck kommt: Das tatsächliche Durchführen von

Lärmschutzmaßnahmen zeigt den Betroffenen, dass ihre Klagen ernstgenommen werden. Als „Gegenleistung“ – so die Annahme - wird in den Befragungen angegeben, dass sich die Situation stark verbessert habe (Schuemer & Schreckenber, 2000). In Bezug auf Kastkas Studien zu Lärmschutzwänden ist zu beachten, dass solche passiven Schallschutzmaßnahmen die Lärmquelle selbst nicht verändern. Von den Anwohnern wurde die Pegelreduktion zwar deutlich wahrgenommen, jedoch scheint sich dies kaum auf das Verhalten im täglichen Leben ausgewirkt zu haben (z. B. sich wenig im Garten aufhalten, Fenster selten öffnen, Kinder von der Straße fernhalten).

In Bezug auf Lärmschutzwände wird diskutiert, ob auch visuelle Eindrücke die Urteile beeinflussen. So wurde geprüft, ob eine visuelle Abschirmung von der Quelle einen Einfluss auf die wahrgenommene Wirksamkeit von Lärmschutz hat. In den Laboruntersuchungen von Felscher-Suhr und Joynt (Felscher-Suhr & Höger, 2002; Felscher-Suhr & Schreckenber, 2000; Joynt & Kang, 2010) wurden transparente Wände (durch die die Lärmquelle noch zu sehen war) als weniger wirksam eingestuft als nicht transparente Wände.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Beurteilung von Lärminderung vor allem anhand von Feldstudien untersucht wurde. Gefragt wurde dabei in erster Linie nach der Belästigung. Dadurch kommen viele nicht-akustische Einflussfaktoren zum Tragen und entsprechend konnten auch aufgrund deren Vielfalt keine stabilen Dosis-Wirkungskurven berichtet werden. Aber auch in den angeführten Laborstudien wurde nicht das reine Hörerleben beurteilt, sondern zusätzlich visuelle Faktoren wie die Transparenz von Lärmschutzwänden mit einbezogen. In den vorliegenden Untersuchungen wird daher neben der Lästigkeit auch die Lautheit als unmittelbare Hörwahrnehmung erfasst. Außerdem soll neben einem Vorher- und einem Nachher-Urteil auch das Ausmaß der Lärmreduktion selbst beurteilt werden.

## 2.6 Beurteilung von Gesamtlärm

Im letzten Abschnitt wurde auf die Unterschiede zwischen verschiedenen Verkehrslärmquellen hinsichtlich der empfundenen Lästigkeit eingegangen. Wie aber verhält es sich, wenn unterschiedliche Lärmarten gleichzeitig auftreten? In der Literatur finden sich zu dieser Thematik im Wesentlichen drei verschiedene Modellannahmen, das *Energie-Summationsmodell* (energy summation), das *Dominanzmodell* (dominant source) und das Modell der *äquivalenten Belästigung* (annoyance equivalence).

Alle drei Modelle versuchen, die Lästigkeit von zusammengesetzten Lärmquellen vorherzusagen. Der einfachste Ansatz ist das *Energie-Summationsmodell*. Hier werden die Pegel der einzelnen Quellen energetisch zu einem Gesamtpegel addiert (z. B. Taylor, 1982). Das Lästigkeitsurteil wird nach diesem Modell aus dem Gesamtpegel der Lärmquellen vorhergesagt. Im Energie-Summationsmodell spielt die Art der einzelnen Lärmquellen also keine Rolle, entscheidend ist nur der Schallpegel. Somit wird von einer einheitlichen Dosis-Wirkungskurve für jedwede Lärmquelle ausgegangen. Gegen diese Annahme spricht der im letzten Abschnitt aufgeführte Befund, dass unterschiedliche Verkehrslärmarten bei gleichem Pegel als unterschiedlich lästig empfunden werden. In der Praxis kann jedoch das Energie-Summationsmodell bereits befriedigende Vorhersagen liefern (z. B. Kuhnt et al., 2008).

Im *Dominanzmodell* (Rice & Izumi, 1986) werden hingegen nicht mehr die Pegel der einzelnen Quellen miteinander verrechnet. Hier hängt die Lästigkeit des zusammengesetzten Lärms allein von der Lästigkeit der dominierenden Quelle ab. Die dominierende Lärmquelle ist diejenige, die als am lästigsten empfunden wird. Rice und Izumi (1986) hatten beobachtet, dass die Lästigkeitsratings für zusammengesetzte Lärmquellen nicht höher ausfallen als das Lästigkeitsurteil über diejenige Lärmquelle, die einzeln beurteilt als am lästigsten eingestuft wurde. Die Anwendung des Dominanzmodells erfordert damit natürlich auch mehr Untersuchungsaufwand

als das Energie-Summationsmodell: Während bei Letzterem lediglich die Lästigkeit des kombinierten Lärms erhoben wird, muss bei Ersterem jede einzelne Quelle nach Ihrer Lästigkeit beurteilt werden. Welche Quelle als die lästigste beurteilt wird, kann sich aber auch individuell unterscheiden, insbesondere wenn alle Quellen etwa den gleichen Pegel aufweisen. Das Lästigkeitsurteil für die dominante Quelle, welches als Prädiktor im Dominanzmodell fungiert, kann sich daher individuell auf unterschiedliche Quellen beziehen. Problematisch ist dies, wenn solche heterogenen Lästigkeitsratings über alle Personen gemittelt werden. Es sollte daher immer die Übereinstimmung der Befragten bezüglich der lästigsten Einzelquelle angegeben werden. Bisher liegen wenige Arbeiten vor, welche sich eingehender mit dem Dominanzmodell auseinandersetzen. In den Untersuchungen von Botteldooren (Botteldooren, Dekoninck, de Greve, de Coensel & Lercher, 2007) und Yano (Yano, Nguyen, Nishimura & Sato, 2009) wird von hohen Zusammenhängen zwischen den Lästigkeitsratings für den kombinierten Lärm und den Ratings für den lästigsten Einzellärm berichtet, z. B. ein  $r$  von 0,91 in der Untersuchung von Yano. Miedema (1987) hingegen stellte fest, dass auch Pegelveränderungen der nicht dominanten Quelle Einfluss auf das Lästigkeitsurteil haben, ein Befund der dem Dominanzmodell widerspricht.

Im *Modell der äquivalenten Belästigung* nach Miedema (2004) wird wiederum eine Pegelsummutation angewandt. Der Unterschied zum Energie-Summationsmodell ist jedoch, dass hier zunächst eine „äquivalente Quelle“ ausgewählt wird, z. B. Straßenverkehr. Die Pegel der anderen Quellen werden der Äquivalenzquelle angepasst. Ein kurzes hypothetisches Beispiel soll dies veranschaulichen: Man nehme Schienenlärm und Straßenlärm mit einem Pegel von jeweils 60 dB(A). In den entsprechenden Dosis-Wirkungskurven habe der Straßenverkehr bei diesem Pegel einen Lästigkeitswert von 5, der Schienenverkehr einen Lästigkeitswert von 4. Der Straßenlärm dient als Äquivalenzquelle, d.h. in die Pegelsummutation kann direkt der Straßenlärmpegel von 60 dB(A) eingehen. Der Pegel des Schienenverkehrs wird hingegen dem Straßenverkehr angepasst: Es wird ermittelt, welcher Straßenverkehrspegel die gleiche (äquivalente) Lästigkeitsreaktion hervorruft, die beim Schienenlärm auftrat. Bezogen auf das konkrete Beispiel: Bei welchem Straßenverkehrspegel liegt der Lästigkeitswert bei 4? Da der Schienenlärm eine geringere Lästigkeit aufweist als der Straßenverkehrslärm (bei gleichem Pegel), muss der Schienenlärmpegel somit nach unten korrigiert werden, im Beispiel auf weniger als 60 dB(A). Alternativ können als Annäherung auch die bekannten Pegel-Zuschläge und Pegel-Abschläge verwendet werden. Entsprechend dem offiziellen Schienenbonus in Deutschland werden somit beim Schienenlärm 5 dB subtrahiert. Um das Modell der äquivalenten Belästigung verwenden zu können, müssen für die fraglichen Lärmquellen Dosis-Wirkungskurven vorhanden sein. Für Straßen, Schienen, und Fluglärm ist dies auch der Fall, bei Lärm aus Kindergärten und Sportstätten hingegen nicht.

## 2.7 Sprachverständlichkeit unter Lärm

Die Störung der sprachlichen Kommunikation gehört zu den am häufigsten beklagten Lärmwirkungen. Dies betrifft nicht nur die direkte Unterhaltung zwischen zwei oder mehreren Personen, sondern auch den Medienkonsum über das Ohr, wie Radio hören und Fernsehen. Die Maskierung von Sprache durch Lärm hat gravierende negative Folgen im Arbeitsleben, in der Schule und in der Freizeit. Im Arbeitsleben führen Störungen der Kommunikation zu Missverständnissen zwischen Kollegen und in der Folge zu mehr Fehlern und Verzögerungen im Arbeitsablauf. Eine besonders hohe und vieldiskutierte Relevanz hat die Qualität der Kommunikation im schulischen Bereich. Beim Verstehen von Sprache werden Kinder mehr als Erwachsene durch Störgeräusche beeinträchtigt (Johnson, 2000; Neuman, Wroblewski, Hajicek, & Rubinstein, 2010; Oh & Wightman, 2001). Generell wirkt sich eine schlechte Sprachverständlichkeit in Unterrichtsräumen negativ auf die Zufriedenheit und Motivation der dort Lernenden und Lehrenden aus (Klatte, Hellbrück, Seidel, & Leistner, 2010; Schick, Klatte, & Meis, 1999).

Im Experiment kann die Beeinträchtigung der Kommunikation mittels Sprachverständlichkeitstests gemessen werden. Dabei wird Sprache mit einem Störgeräusch gemischt und dem Teilnehmer über Kopfhörer oder Lautsprecher dargeboten. Beispiele hierfür sind der Oldenburger Satztest (Wagener, Kühnel, & Kollmeier, 1999), oder der HSM-Satztest (Hochmair-Desoyer, 1997). Ausgewertet wird in diesen Tests, wie viele der präsentierten Wörter richtig wiedergegeben werden können. Systematisch wird dabei der *Signal-Geräuschabstand* (*Signal-to-Noise Ratio, SNR*) variiert. Dieser Abstand ist definiert durch die Differenz zwischen dem Pegel der Sprache und dem Pegel des Störschalls. Ist der Pegel des Störschalls lauter als der Pegel der Sprache, so ergeben sich negative Werte für den Signal-Geräuschabstand. Mit zunehmendem Signal-Geräuschabstand steigt die Sprachverständlichkeit. Als Geräusch wird bei den oben genannten Sprachverständlichkeitstests ein stationäres CCITT-Rauschen (CCITT = „Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique“) verwendet, welches in seiner Frequenzzusammensetzung der menschlichen Sprache nachgebildet ist.

Welche Eigenschaften des Störgeräusches oder des Umgebungslärms wirken sich besonders nachteilig auf das Sprachverstehen aus? Für die Frequenzzusammensetzung des Störgeräusches gilt, dass eine Maskierung umso besser gelingt, je ähnlicher die Frequenzen von Signal und Rauschen sind. Gesprochene Sprache befindet sich in einem Frequenzbereich von etwa 300 bis 5000 Hz. Entsprechend hat Lärm, welcher hohe Pegel in diesem Frequenzbereich aufweist, ein besonders hohes Störpotential. Zusätzlich zu berücksichtigen sind Effekte der sogenannten *asymmetrischen Maskierung*: Tiefere Frequenzen maskieren höhere stärker als umgekehrt (Fastl, 1976). Ein erster Ansatz das Störpotential von Lärm auf die Sprachverständlichkeit zu messen, war der Artikulationsindex (AI) (French & Steinberg, 1947). Lärmspektrum und Sprachspektrum werden überlagert, und der Artikulationsindex gibt prozentual an, welcher Anteil des Sprachspektrums vom Lärmspektrum *nicht* überlagert wird. Deshalb gilt: Je höher der AI, desto höher die Sprachverständlichkeit. Ab einem AI von 60 Prozent kann die Sprache laut Beranek (1947) mühelos verstanden werden. Eine Weiterentwicklung des AI ist der Sprach-Störpegel (Speech Interference Level; SIL). Dieser Parameter gibt den mittleren Pegel des Stör-Schalls in den Oktavbändern 600 – 1200 Hz, 1200 – 2400 Hz, 2400 – 2800 Hz wieder. Damit ist der SIL im Gegensatz zum AI negativ mit der Sprachverständlichkeit korreliert: Je höher der SIL, desto niedriger ist die Sprachverständlichkeit. Kritisch ist anzumerken, dass diese Indizes für die Sprachverständlichkeit nur sehr wenig über die tatsächliche Qualität der Kommunikationssituation aussagen. Wenn einzelne Wörter oder Satzteile schon nicht mehr verstanden werden, ist bereits von einer sehr schlechten Qualität auszugehen. Aber auch eine Situation, in der die Sprache immer noch verstanden wird, kann bereits als sehr belastend empfunden werden. Bei einer Störung durch Lärm stehen meist noch Mittel zur Verfügung, diese Störung zu kompensieren, sei es durch lauterer Sprechen, Lauterstellen des Radios oder Schließen der Fenster. Mitunter kann der Hörer im Gespräch auch viel Inhalt aus dem Kontext erschließen, es muss also nicht jedes einzelne Wort verstanden werden. Jedoch verlangt dieses Erschließen aus dem Kontext eine erhöhte Höranstrengung, welche auf die Dauer als sehr belastend empfunden werden kann. Aus diesem Grunde wird mittlerweile versucht, nicht nur die reine Sprachverständlichkeit anhand der nicht verstandenen Wörter zu messen, sondern auch die subjektiv empfundene Qualität der Kommunikationssituation (Lazarus, 2007; Schepker, Rennies, Holube & Kollmeier, 2012). Neben einem allgemeinen Urteil über die Sprachverständlichkeit auf Skalen, welche von sehr gut bis sehr schlecht reichen, kann auch spezifisch nach der empfundenen Höranstrengung gefragt werden. Bei Untersuchungen zu Auswirkungen von Umweltlärm wird die Höranstrengung nur selten erfasst. Die bisherigen Untersuchungen zum Thema sind vor allem im klinischen Bereich anzutreffen, z. B. bei Trägern von Hörgeräten und Cochlea-Implantaten (z. B. Noble, 2006). Eine Ausnahme stellt eine Untersuchung von Sust et al. (Sust, Lazarus, Steckel, Kulka, & Kurtz, 2009, Sust, Steckel, Kulka, Lazarus, & Kurtz, 2007) zur Sprachverständlichkeit unter Verkehrslärm dar. Hier wurden Sprachverständlichkeitstests mit Störgeräuschen, welche aus Straßen- und Schienenverkehr bestanden, durchgeführt. Neben den reinen Testscores wurden dabei auch Fragebögen verwendet, auf welchen die Teilnehmer ihre subjektiven Einschätzungen darüber angaben, wie sehr sie sich konzentrieren mussten, um die Sprache zu verstehen. Es zeigte sich, dass auch bei einer weitgehend fehlerfreien Wiedergabe der gehörten Sprache diese subjektiven

Einschätzungen immer noch stark differenzierten. Sust et al. empfehlen einen Signal-Geräuschabstand von mindestens +15 dB, um eine anstrengungslose Kommunikation zu gewährleisten.

## 2.8 Skalierungsmethoden

Die Ergebnisse der Messung von Empfindungsgrößen, z. B. der funktionale Zusammenhang zwischen Reiz und Urteil, sind teilweise von der verwendeten Methodik abhängig. Daher soll an dieser Stelle kurz auf allgemeine theoretische Grundlagen und Befunde zu den in der vorliegenden Untersuchung eingesetzten Skalierungsmethoden eingegangen werden. Die genauen Beschreibungen der verwandten Skalen finden sich dann in den Abschnitten, in denen die Methodik der einzelnen Untersuchungen beschrieben wird.

### 2.8.1 Direkte Skalierungsmethoden

Bei direkten Skalierungsmethoden wird der Empfindungsstärke direkt ein Skalenwert entsprechend einer Messvorschrift zugeordnet. Zwei direkte Skalierungsmethoden werden in diesem Projekt eingesetzt, nämlich die Größenschätzung und die Kategorienskalisierung.

#### **Verfahren der Größenschätzung**

Größenschätzung (*magnitude estimation, ME*) nach Stevens (1975) bezeichnet die direkte Zuordnung von Zahlen zu Empfindungsgrößen. Diese Zuordnung geschieht entsprechend den Empfindungsverhältnissen. Wenn ein Reiz beispielsweise doppelt so stark empfunden wird wie ein anderer, bekommt er den doppelten Zahlenwert zugewiesen. Die Sone-Skala von Stevens (1936) basiert auf solchen Größenschätzungen. Größenschätzungen existieren in vielen Varianten (siehe z. B. Gescheider, 1997), in dieser Arbeit wird die *Fraktionierung* angewandt. Das Fraktionierungsverfahren zählt zu den Versionen der Größenschätzung, in denen ein Standardreiz mit einem festgelegten Zahlenwert (*Modulus*) vorgegeben wird. Die Vergleichsreize werden in Bezug auf diesen Standardreiz beurteilt. Der Standardreiz weist bei der Fraktionierung eine höhere Intensität auf als die Vergleichsreize. Die Beurteilung muss dabei nicht zwingend anhand einer Zahl erfolgen, die Einschätzung des Reizes kann auch anhand einer vorgegebenen Linie abgetragen werden. Wird z. B. der Vergleichsreiz halb so intensiv empfunden wie der Standard, markiert der Beurteiler die Mitte der Linie. Bisher wurde Umweltlärm selten mittels Größenschätzung untersucht. Den umfangreichsten Beitrag hierzu hat die japanische Forschergruppe um Namba und Kuwano geleistet. Diese untersuchte systematisch verschiedene Arten von Umgebungslärm mittels Größenschätzung und fand einen sehr engen Zusammenhang zwischen A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegel des Lärms und Urteil in Form einer Potenzfunktion. Die als Maß für die Güte der Anpassung angegebenen Korrelationskoeffizienten lagen sämtlich über  $r = .98$  (Namba & Kuwano, 1991; siehe auch: Fastl & Zwicker, 2007; Namba & Kuwano, 1984). Auch bei eher affektiven Eindrücken wie dem sensorischen Wohlklang von Geräuschen, zeigt sich eine Potenzfunktion zwischen Größenschätzungen und Pegel (Zeitler, 2002).

#### **Kategorienskala**

Bei der Kategorienskalisierung wird das Urteil einer von mehreren Kategorien zugeordnet, welche verbal (z. B. leise, mittel, laut) oder rein numerisch bezeichnet sein können. Die Kategorien weisen jeweils gleich große Abstände zueinander auf. Die Kategorienskala zählt damit zu den Partitionsmethoden, deren Grundidee es ist, das Empfindungskontinuum in gleichgroße Abstände zu unterteilen. Die „Gleichabständigkeit“ wird in der Regel vorausgesetzt und nicht axiomatisch überprüft. Man spricht daher auch von „Per-Fiat“-Messungen (Bortz, 2005, S. 26). Man „vertraut“ also darauf, dass die entsprechenden Messungen das Niveau einer Intervallskala aufweisen und

aus ihnen Mittelwerte berechnet werden können, welche inhaltlich sinnvoll interpretierbar sind. Nach dem Weber-Fechnerschen Gesetz ergibt sich eine logarithmische Funktion zwischen der Reizstärke und den Kategorienurteilen. In den Untersuchungen zur Lautheit von Umweltlärm zeigt sich diese logarithmische Funktion in Form einer linearen Beziehung zwischen Urteil und Pegel (Hellbrück, 1987, 1996; Namba & Kuwano, 1991; Zeitler, 2002).

#### *Das Kategorienunterteilungsverfahren nach Heller (Heller, 1985)*

Wie erwähnt, können Kategorien verbal oder mittels Zahlen bezeichnet werden. Für die vorliegende Untersuchung soll ein Verfahren angewandt werden, welches bei der Beurteilung der Lautheit beides in Kombination anwendet, nämlich das Kategorienunterteilungsverfahren nach Heller (KU-Verfahren oder KU-Skala; Heller, 1985). Bei dieser Methode werden die Lautheitsurteile zunächst einer von fünf Kategorien zugeteilt, namentlich „sehr laut“, „laut“, „mittel“, „leise“ und „sehr leise“. Jede Kategorie hat nochmals zehn Unterteilungen, welche wiederum mit Zahlen bezeichnet sind. So weist die Kategorie „sehr leise“ die Zahlen 1 -10 auf, die nächste Kategorie „leise“ die Zahlen 11 – 20 usw. Nach der Auswahl der verbalen Kategorie hat der Beurteiler so noch die Möglichkeit einer Feinabstufung. Weiterhin ist die KU-Skala an den Extremen der Lautheitsempfindung „verankert“. Es gibt einen Nullpunkt der KU-Skala, welcher mit „nicht gehört“ bezeichnet ist und am oberen Ende eine Kategorie „schmerzhaft“. In dieser Kategorie können beliebig hohe Zahlenwerte verwendet werden, die Skala ist also nach oben hin offen. Die KU-Skala hat sich als reliables Messinstrument bei der Beurteilung von Umweltlärm bewährt (Hellbrück, 1996; Hellbrück, Zeitler & Gold, 1996).

#### **Semantische Differenziale**

Semantische Differenziale stellen eine besondere Unterart der Kategorienskala dar. Ein semantisches Differenzial beinhaltet mehrere bipolare Skalen, deren Enden mit gegensätzlichen Adjektivpaaren bezeichnet sind, z. B. warm - kalt. Meist wird beim semantischen Differenzial eine siebenstufige Skala verwendet (3-2-1-0-1-2-3). Die Mitte 0 markiert den Neutralwert „weder-noch“. Man bezeichnet das semantische Differenzial auch als Polaritätenprofil.

Ursprünglich wurde von Osgood, der das semantische Differenzial in der empirischen Forschung etablierte (Osgood, 1952; Osgood & Suci, 1955), ein fester Katalog an Adjektivpaaren vorgeschlagen, der auf alle zu beurteilenden Objekte angewandt wird. Alternativ kann statt einer universellen Liste an Adjektiven eine speziell auf die Beurteilungsgegenstände zugeschnittene Liste bzw. ein kontextspezifisches Polaritätsprofil verwendet werden (Bortz & Döring, 2006). Das Erstellen eines Beschreibungsvokabulars für die fraglichen Reize erfolgt anhand strukturierter Interviews, in welchen z. B. gefragt wird, bezüglich welcher Eigenschaften sich ein Reiz von dem anderen unterscheidet. Aus den gefundenen Eigenschaften können in einem zweiten Schritt kontextspezifische semantische Differenziale gebildet werden, anhand derer die Wahrnehmungseigenschaften eines Schalls quantifiziert werden können.

Namba und Kuwano (Namba, 1996; Namba & Kuwano, 1991) wandten ein Semantisches Differential mit 14 Adjektivpaaren auf verschiedene Arten von Umweltlärm an. Eine anschließende Faktorenanalyse ergab drei Faktoren, welche bei der Beurteilung des Lärms wesentlich waren.

- Kraftvoll (powerful): Dieser Faktor umfasst sowohl Lautheit als auch Lästigkeit des Schalles.
- Angenehm (pleasant): Dieser Faktor stellt den Wohlklang (sensory pleasantness) des Schalles dar.
- Metallisch (metallic): Dieser Faktor umfasst Härte, Schärfe und Schrilheit des Schalles.

Interessant an diesem Ergebnis ist, dass Lautheit und Lästigkeit hoch auf demselben Faktor laden. Auffällig ist weiterhin, dass der Wohlklang, nicht einfach der Antagonist von Lästigkeit ist, sondern eine unabhängige Dimension darstellt. Während der Faktor „kraftvoll“ einen hohen Zusammenhang mit der Lautheit in Sone und der Faktor „metallisch“ gut mit der

psychoakustischen Größe „Schärfe“ korrelierte, konnte für den Faktor „angenehm“ kein eindeutiger psychoakustischer Prädiktor bestimmt werden.

## 2.8.2 Indirekte Skalierungsmethoden: Paarvergleich

Bei indirekten Skalierungen wird den Empfindungen nicht unmittelbar ein Skalenwert zugeordnet. Stattdessen werden die Reize in einem A-B-Vergleich beispielsweise hinsichtlich der Lästigkeit miteinander verglichen (welches Geräusch ist lästiger?), wobei jeder Reiz mit jedem kombiniert wird. Für den Beurteiler ist ein Paarvergleich relativ einfach. Allerdings steigt der Untersuchungsaufwand bei einer größeren Anzahl von Reizen sehr schnell an. Sofern man eine vollständige Paarvergleichsmatrix für  $N$  verschiedene Reize realisieren will, sind  $\binom{N}{2}$  Paarvergleiche durchzuführen. Bei zehn verschiedenen Reizen ergeben sich somit 45 Paarvergleiche, bei 20 Reizen wären es bereits 190. Nach der Durchführung einer solchen Paarvergleichsuntersuchung kann versucht werden, die einzelnen Reize in eine Rangreihe zu bringen. Das setzt voraus, dass die Urteile eine innere Konsistenz aufweisen um das Transitivitätsaxiom zu erfüllen. Bei drei Reizen A, B und C bedeutet dies: Wenn  $A < B$  und  $B < C$ , dann muss gelten:  $A < C$ . Ist die Konsistenz für ein solches Reiztripel verletzt, spricht man von einer zirkulären Triade. Eine hohe Anzahl an zirkulären Triaden ist ein Anzeichen dafür, dass entweder der Beurteiler mit der Aufgabe nachlässig umgegangen ist oder überfordert war oder aber die Reize auf der verwendeten Dimension nicht klar unterschieden werden konnten. Um nun eine Aussage darüber treffen zu können, ob eine bestimmte Anzahl an zirkulären Triaden signifikant höher oder niedriger ist, als bei einer völlig zufälligen Vergabe der Präferenzurteile zu erwarten wäre, muss sie in Beziehung gesetzt werden zu der Anzahl an zirkulären Triaden, welche maximal möglich ist. Diese Maximalanzahl hängt wiederum davon ab, wie viele Reize zu beurteilen waren. Zur Bestimmung der Häufigkeit zirkulärer Triaden und deren inferenzstatistischer Prüfung sei auf Kendall (Kendall & Gibbons, 1990) verwiesen. Sofern nur wenige zirkuläre Triaden auftreten, wird geprüft, inwieweit die Untersuchungsteilnehmer in ihren Urteilen übereinstimmen. Kendall (Kendall & Gibbons, 1990) schlägt als Maß hierfür den Übereinstimmungskoeffizienten (Coefficient of Agreement) *upsilon* ( $u$ ) vor, dessen Höhe an der Chi-Quadrat Verteilung geprüft werden kann.

## 2.9 Empirische Fragestellungen

### *Fragenkomplex 1: Einflussfaktoren von Lästigkeit und Gesamtlärm*

Welche wahrgenommenen Eigenschaften des Lärms werden als besonders belästigend empfunden? Entsprechend obiger Darlegungen gelten Lautheit, Schärfe und Rauigkeit als Determinanten der Lästigkeit. Die Frage ist, welchen Anteil diese Faktoren am Lästigkeitsurteil haben. Bezüglich der Beurteilung von Gesamtlärm werden zwei Modelle zur Vorhersage der Lästigkeit kombinierter Quellen gegenübergestellt – das Energie-Summationsmodell und das Dominanzmodell. Gemäß dem Energie-Summationsmodell sollte der über die einzelnen Lärmarten summierte Pegel den entscheidenden Lästigkeitsprädiktor darstellen. Nach dem Dominanzmodell hängt das Lästigkeitsurteil für einen kombinierten Lärm hingegen vom Urteil für die lästigste Einzelquelle im „Lärm-Mix“ ab.

### *Fragenkomplex 2: Veränderung der Lärmbeurteilung durch Lärmschutzmaßnahmen*

Dieser Fragenkomplex bildet den Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchungen. Es werden verschiedene Lärmarten beurteilt, wobei jede Lärmart sowohl ungedämmt als auch durch verschiedene Schallschutzmaßnahmen gedämmt vorliegt. Die gedämmte Version wird durch

Auralisation hergestellt. Aus anwendungstechnischer Sicht interessiert dabei zunächst das Ausmaß der Veränderung und inwieweit sich durch schallschutztechnische Eingriffe (Wahl der Schallschutzklasse der Fenster bzw. Höhe der Lärmschutzwand) signifikante Reduktionen der empfundenen Lautheit und Lästigkeit erzielen lassen. Als Methoden werden hierzu die Größenschätzung in Form der Fraktionierung und die Kategorienskalisierung in Form der KU-Skala gegenübergestellt. Für die Kategorienskalisierung wird analog zu den Befunden aus früheren Studien (Hellbrück, 1987, 1996; Namba & Kuwano, 1991; Zeitler, 2002) eine lineare Beziehung zwischen Urteil auf der Kategorienskala und A-bewertetem äquivalentem Dauerschallpegel  $L_{Aeq}$  erwartet. Für die Größenschätzungen wird die Hypothese aufgestellt, dass sich das relative Urteil bezüglich des Lärmschutzes (Um wie viel leiser?) direkt aus den Verhältnissen der Lautheit in Sone zwischen gedämmten und ungedämmten Lärm vorhersagen lässt. So sollte z. B. das Urteil *halb so laut* einer Halbierung der Lautheit in Sone entsprechen. Im Hintergrund steht hier die Frage, ob die klassische 10-dB-Regel von Stevens gilt, nach der eine Pegelminderung von 10 dB mit einer Halbierung der wahrgenommenen Lautheit einhergeht. Weiterhin interessiert die Höhe des Zusammenhangs zwischen Schallpegel einerseits und Lautheits- bzw. Lästigkeits-Urteil andererseits. Zusätzlich wird geprüft, ob Lebensalter und Lärmempfindlichkeit einen signifikanten Einfluss auf das Lästigkeitsurteil besitzen. Die Frage nach dem Einfluss des Lebensalters ist nach den oben berichteten Befunden umstritten, die in Selbstbeurteilungen angegebene Lärmempfindlichkeit sollte jedoch mit den Lästigkeitsurteilen positiv korrelieren.

### Fragenkomplex 3: *Sprachverständlichkeit unter Lärm*

Inwieweit lassen sich durch schallschutztechnische Modifikationen (Erhöhen der Schallschutzklasse von Fenstern oder Erhöhen der Lärmschutzwand) signifikante Verbesserungen der Sprachverständlichkeit erzielen? Der Fokus liegt dabei auf der Beurteilung der Höranstrengung.

## 3 Empirische Untersuchungen

### 3.1 Untersuchung 1: Lästigkeit verschiedener Lärmquellen im Paarvergleich

In der ersten Untersuchung werden Paare von Lärmquellen im Hinblick auf ihre Lästigkeit verglichen. Die Aufgabe der Versuchsteilnehmer ist anzugeben, welche Quelle lästiger ist und warum. So kann mittels indirekter Skalierung eine Rangreihe der Lärmarten gebildet werden, von *am wenigsten lästig* bis hin zu *am meisten lästig*. Mittels der Begründungen für die Antwort soll ermittelt werden, welche Schalleigenschaften das Lästigkeitsurteil beeinflussen.

#### 3.1.1 Methode

##### **Teilnehmer**

Es nahmen 11 Probanden (7 Frauen, 4 Männer) im Alter von 21 bis 55 Jahren an der Untersuchung teil. Alle gaben normales Hörvermögen an. Die Teilnahme wurde mit 8 Euro pro Stunde entlohnt.

##### **Stimuli**

Die Stimuli wurden aus einer vom IBP erstellten Lärmdatenbank ausgewählt. Es handelt sich dabei um zehn 30-sekündige Aufnahmen von Umweltlärm (siehe Tabelle 1 für eine genauere Beschreibung der Aufnahmen). Die Sampling Rate der Aufnahmen betrug 44,1 kHz. Die Aufnahmen wurden den Teilnehmern per Kopfhörer in der Original- Lautstärke präsentiert.

Tabelle 1

*Art und Pegel der verwendeten Aufnahmen mit Beschreibung der Lärmszene. Die Länge der Aufnahmen beträgt jeweils 30 sec.*

Lärmart	$L_{eq}$ in dB(A)	Beschreibung
Autobahn	72,48	Sechsspurige Autobahn, Verkehrsdichte: 517 PKW + 95 LKW in fünf Minuten
Baustelle	72,33	Tiefbauarbeiten, Lärm von Bagger und Einschlagen von Nägeln
Busanfahrten	63,44	Bushaltestelle, Zwei Busse fahren nacheinander im Abstand von ca. 10 sec. los
Fluglärm	71,89	Startendes mittelgroßes Flugzeug (Boeing 737 am Flughafen Stuttgart, Überflug
Fußballtraining	50,96	Etwa zehn Teilnehmer, keine Zuschauer
Kinder	72,61	Pausenhof einer Grundschule, etwa 30 Kinder
Motorsense	70,55	Beim Zuschneiden von Sträuchern aufgenommen
PKW	67,94	Vorbeifahrt von fünf PKW nacheinander
Regionalbahn	66,45	Vorbeifahrt einer Regionalbahn
U-Bahn	63,41	Vorbeifahrt einer U-Bahn

### **Apparat**

Die Versuchssteuerung und Datenaufzeichnung wurde mittels der Programmiersprache Java™ realisiert. Als Rechner wurde ein HP Compaq dc5850 Miditower mit 19 Zoll Bildschirm verwendet. Es wurde eine DMX 6fire Soundkarte von Terratec benutzt. Die Soundkarte wurde digital mit einem HEAD PEQ V Kopfhörerverstärker verbunden, an dem zwei Kopfhörer (Sennheiser HD650) angeschlossen waren. Mit dieser Anordnung war es möglich, die Untersuchung mit zwei Personen gleichzeitig durchzuführen. Zur Kalibrierung des Systems wurde der Schalldruckpegel der Kopfhörer mit einem künstlichem Ohr (Brüel & Kjør, type 4153) und einem Schallpegelmesser (Brüel & Kjør, type 2231) geprüft.

### **Ablauf**

Die Instruktion lag schriftlich vor (siehe Anhang A2.1). Der Teilnehmer sollte sich vorstellen, er wäre tagsüber an seinem Wohnort regelmäßig dem gehörten Lärm ausgesetzt. Die Präsentation der Stimuli erfolgte paarweise. Die Aufnahmen konnten innerhalb eines Paarvergleichs auf Wunsch auch mehrfach gehört werden. Die Versuchspersonen sollten nach dem Hören der Aufnahme entscheiden, welchen Lärm sie als lästiger empfinden und die Entscheidung begründen. Die Aussagen des Probanden wurden vom Versuchsleiter handschriftlich protokolliert. Entsprechend der zehn Lärmarten waren 45 Paarvergleiche durchzuführen. Die Präsentation der Paare erfolgte randomisiert, ebenso war die Reihenfolge (erster und zweiter Lärm) im jeweiligen Paarvergleich randomisiert. Der Versuch dauerte etwa 60 Minuten.

### **3.1.2 Ergebnisse und Diskussion**

Die zehn Lärmarten wurden bezüglich ihrer Lästigkeit in eine Rangreihe gebracht. Über alle Paarvergleiche und Beurteiler hinweg wurde ermittelt, wie oft ein Lärm als der lästigere empfunden wurde. Die Rangreihe der zehn Schalle von *am wenigsten lästig* bis zu *am meisten lästig* ist wie folgt:

Fußballtraining - U-Bahn - Regionalbahn - Busanfahrten - Kinder - PKW - Fluglärm - Autobahn - Baustelle - Motorsense

Anschließend wurden die Urteile der einzelnen Teilnehmer auf ihre Konsistenz hin geprüft. Hierzu wurde jeweils die Anzahl an zirkulären Triaden ermittelt und zu der maximal möglichen Anzahl an zirkulären Triaden in Beziehung gesetzt. Bei zehn Reizen sind theoretisch 40 zirkuläre Triaden möglich. Im Durchschnitt traten bei den elf Teilnehmern 4,18 ( $SD = 4,98$ ) zirkuläre Triaden auf. Drei Personen urteilten völlig konsistent. Die höchste Anzahl an zirkulären Triaden war 15. Aber auch diese Anzahl ist signifikant niedriger als zu erwarten wäre, wenn die Präferenzurteile rein zufällig vergeben würden ( $\chi^2 = 38,17, p < .01$ ). Somit wurden alle Datensätze in die weitere Auswertung mit einbezogen.

Der *Coefficient of Agreement*  $u$  nach Kendall (Kendall & Gibbons, 1990) lag bei  $u = .40$ . Eine perfekte Übereinstimmung aller Beurteiler ergäbe einen Wert von  $u = 1$ . Dennoch ist auch der Wert  $.40$  signifikant höher als es bei rein zufällig vergebenen Präferenzurteilen zu erwarten wäre ( $\chi^2 = 280, p < .01$ ).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Teilnehmer konsistent urteilten und in ihren Urteilen gut übereinstimmten. Die Befragungen der Teilnehmer darüber, wie sie zu ihren Einschätzungen kamen und welche Schalleigenschaften entscheidend für das Empfinden von Lästigkeit waren, lieferten eine Fülle von Adjektiven und Einschätzungen. Für eine Weiterverwendung der Ergebnisse war es notwendig, die große Anzahl an Beschreibungen zu reduzieren. Ein Kriterium bei der Auswahl der Attribute war, dass diese auf eine größere Bandbreite an Lärmarten anwendbar sein sollten. Beispielsweise wurde beim Baustellenlärm das Hämmern als lästig empfunden, allerdings kam die Eigenschaft „hämmernd“ bei keiner anderen Lärmart vor. Letztendlich wurden die Attribute ausgewählt, welche am häufigsten in der angegebenen oder semantisch ähnlicher Form genannt wurden. In Tabelle 2 werden die gewählten Attribute aufgelistet.

Tabelle 2:

Anhand des Paarvergleichs extrahierte Attribute mit semantisch ähnlichen Begriffen

extrahierte Attribute	semantisch ähnliche genannte Begriffe
ungleichmäßig	unrhythmisch, unruhig, unzusammenhängend, variabel, ständige Lautstärkewechsel, inkonstant
vielfältig	verschieden
unvorhersehbar	erschreckend, unkontrolliert
penetrant	durchdringend, massiv, mächtig
hoch	hohe Frequenzen
schrill	surrend, tönend, schneidend, pfeifend, quietschend, kreischend
stark ablenkend	irritierend
laut	-

### 3.2 Untersuchung 2: Bewertung von einzelnen und zusammengesetzten Lärmquellen - Gesamtlärm

In der zweiten Untersuchung werden einzelne und zusammengesetzte Lärmquellen im Hinblick auf ihre Lästigkeit und unter Zuhilfenahme der Attribute aus Untersuchung 1 beurteilt. Dazu wurden

insgesamt neun elfstufige Skalen konstruiert. Die Bezeichnungen der Skalen des semantischen Differenzials samt ihrer positiven und negativen Pole sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3:

Semantisches Differenzial aus Untersuchung 2 mit positiven und negativen Polen

Name	negativer Pol	positiver Pol
Gleichmäßigkeit	ungleichmäßig	gleichmäßig
Vielfalt	vielfältig	einheitlich
Vorhersehbarkeit	unvorhersehbar	vorhersehbar
Penetranz	penetrant	unauffällig
Höhe	hoch	tief
Schrillheit	schrill	dumpf
Ablenkung	stark ablenkend	nicht ablenkend
Lautheit	laut	leise
Lästigkeit	lästig	angenehm

In einem ersten Schritt soll die Reliabilität der einzelnen Ratingskalen getestet werden. Als Maß für die Reliabilität wird die Übereinstimmung der Beurteiler auf den Skalen geprüft (Interrater-Reliabilität). Der statistische Kennwert für das Ausmaß der Übereinstimmung ist die Intraklassen-Korrelation deren Wert mit Cronbachs Alpha identisch ist (Diehl & Staufenberg, 2002). Skalen mit geringer Reliabilität können somit für weitere Untersuchungen eliminiert werden. Des Weiteren sollen die Zusammenhänge zwischen den Skalen untersucht werden. Anhand einer Faktorenanalyse wird ermittelt, ob es sich bei den Skalen um unabhängige Beurteilungsdimensionen handelt oder ob mehrere Skalen, welche miteinander hoch korrelieren, zu Faktoren zusammengefasst werden können. Ziel ist ein Regressionsmodell mit den Faktorwerten der Schalle als Prädiktoren und dem globalem Lästigkeitsurteil als Kriterium.

In Untersuchung 2 wird außerdem regressionsanalytisch geprüft, ob das Energie-Summodationsmodell oder das Dominanzmodell bessere Vorhersagen für die Lästigkeit kombinierter Quellen liefert. Für das Dominanzmodell ist der Prädiktor das Lästigkeitsurteil für die dominante Quelle (die lästigste Quelle in der Einzelbewertung). Für das Energie-Summodationsmodell fungiert hingegen der Summenpegel des kombinierten Lärms ( $L_{Aeq}$ ) als Prädiktor. Die entsprechenden Determinationskoeffizienten können anschließend miteinander verglichen werden. Das dritte Modell zur Lästigkeit zusammengesetzter Lärmquellen, das Äquivalenzmodell, kann in diesem Rahmen nicht überprüft werden, da für viele der eingesetzten Lärmarten wie Baustellenlärm und Kinderlärm keine Dosis-Wirkungskurven etabliert sind.

### 3.2.1 Methode

#### **Teilnehmer**

Es nahmen insgesamt 21 Personen (13 Frauen, 8 Männer) im Alter von 19 bis 36 Jahren ( $Md = 21$ ) teil. Alle gaben normales Hörvermögen an. Die Teilnehmer wurden entlohnt mit 8 €/h.

#### **Stimuli**

Es wurden wiederum die zehn Aufnahmen aus Experiment 1 verwendet. Dazu kamen 26 zusammengesetzte Lärmquellen, welche durch Mischen dieser zehn Aufnahmen erstellt wurden. 24 Schalle enthielten einen Mix aus zwei Lärmquellen, zwei Schalle enthielten einen Mix aus drei Lärmquellen. Bei der Auswahl der Lärmkombinationen wurde beachtet, dass diese auch in der Realität vorkommen. Da sich z. B. keine Kindergärten unmittelbar neben Autobahnen befinden, wurde Kinderlärm nicht mit Autobahnlärm kombiniert. Ebenso wurden keine Lärmarten kombiniert,

welche sich um mehr als 20 dB im Pegel unterschieden, um zu vermeiden, dass eine Lärmart komplett von der anderen maskiert wird. In Anhang A3.1 sind die einzelnen und zusammengesetzten Lärmquellen samt ihrer Pegel und ihrer Lautheit aufgeführt.

### **Apparat**

Es wurden dieselben Geräte wie in Experiment 1 verwendet.

### **Ablauf**

Nach einer schriftlichen Instruktion am Bildschirm (siehe Anhang A2.2) wurden zunächst die Schalle abgespielt, welche in Untersuchung 1 als am lästigsten und als am wenigsten lästig beurteilt worden waren. Dies geschah, um den Probanden eine Orientierung über die Bandbreite der Lästigkeit der Lärmarten zu ermöglichen. Anschließend wurden die 36 einzelnen und zusammengesetzten Schalle dem Probanden in randomisierter Reihenfolge präsentiert. Nach jeder Darbietung wurde der Lärm anhand des semantischen Differenzials bewertet (siehe Tabelle 3). Für die zusammengesetzten Lärmquellen war zusätzlich anzugeben, welche Lärmquelle als am lästigsten empfunden wurde. Die gesamte Untersuchung dauerte etwa eine Stunde.

## **3.2.2 Ergebnisse**

Zunächst wurden die Reliabilitäten der einzelnen Bewertungsskalen bestimmt. Die Intraklassen-Korrelation für die Skala Vorhersehbarkeit lag bei .89; alle anderen Intraklassen-Korrelationen lagen über .90. Aufgrund dieser sehr hohen Werte wurden alle Skalen für eine weitere Auswertung verwendet. Als nächstes wurde mittels Hauptkomponentenanalyse (*Principal Component Analysis - PCA*) ermittelt, welche Zusammenhänge zwischen den einzelnen Skalen bestehen. Als Grundlage dienten die Bewertungen der einzelnen Schalle auf den Skalen, gemittelt über die 21 Teilnehmer. Die Eignung der Korrelationsmatrix der Skalen für eine PCA liegt bei 0,75 (Kaiser-Mayer-Olkin-Kriterium), was als relativ gut angesehen werden kann (Hair, Black & Babin, 2006). Die Ladungsmatrix der orthogonal rotierten Lösung (Rotationsmethode: Varimax) ist in Tabelle 4 zu sehen.

Tabelle 4:

*Faktorladungsmatrix der rotierten Lösung (Rotationsmethode: Varimax)*

Skala	Komponente		
	1 (Glattheit)	2 (Aufdringlichkeit)	3 (Schärfe)
Ablenkung	0,28	0,93	0,22
Unregelmäßigkeit	0,96	0,18	0,14
Höhe	0,10	0,18	0,97
Lautheit	0,18	0,95	0,16
Penetranz	0,13	0,96	0,19
Schrillheit	0,11	0,24	0,96
Vielfalt	0,96	0,15	0,10
Unvorhersehbarkeit	0,95	0,22	0,04

Die PCA führte zu einer Lösung mit drei Komponenten bzw. Faktoren, welche zusammen 97 Prozent der Varianz in den ursprünglichen Skalenwerten aufklärten. Aus Tabelle 4 ist zu entnehmen, dass die Eigenschaften Unregelmäßigkeit, Vielfalt und Unvorhersehbarkeit hoch auf den ersten Faktor laden, welcher als Glattheit bezeichnet wird. Ablenkung, Lautheit und Penetranz

laden hoch auf den zweiten Faktor, welcher als Aufdringlichkeit benannt wird. Auf den dritten Faktor laden vor allem die Skalen Schrägheit und Höhe. Dieser Faktor wird als „Schärfe“ bezeichnet. Es wurde ermittelt, wie stark die einzelnen Faktoren mit den psychoakustischen Parametern Schwankungsstärke, Rauigkeit, Schärfe, Tonalität und Lautheit korrelieren. Die entsprechenden Werte sind aus der Korrelationsmatrix in Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5

*Korrelationen (r) zwischen den Faktoren und psychoakustischen Parametern.*

Psychoakustische Parameter	Faktoren		
	Glattheit	Aufdringlichkeit	Schärfe
Schwankungsstärke ( <i>vacil</i> )	-.47	.36	-.08
Rauigkeit ( <i>asper</i> )	-.64	.48	.22
Schärfe ( <i>acum</i> )	-.03	.61	.53
Tonalität ( <i>tu</i> )	.35	.47	.65
Lautheit ( <i>N5</i> )	-.33	.81	-.09

Wie Tabelle 5 zeigt, besteht die mit Abstand höchste Korrelation zwischen der Lautheit und der Aufdringlichkeit. Der Glattheitsfaktor korreliert negativ mit Rauigkeit und Schwankungsstärke. Der Aufdringlichkeitsfaktor hängt neben der Lautheit auch mit der Schärfe zusammen. Je mehr Schärfe der Schall aufweist, desto höher ist sein Wert auf dem Faktor Aufdringlichkeit. Der Faktor „Schärfe“ korreliert ähnlich hoch mit dem psychoakustischen Parameter „Schärfe“ und in noch stärkerem Maß mit der Tonalität.

Wie hängen nun die gefundenen drei Beurteilungsfaktoren mit dem Lästigkeitsurteil zusammen? Um diese Frage zu beantworten, wurde eine schrittweise multiple Regressionsanalyse durchgeführt. Das Lästigkeitsrating jedes einzelnen Schalles, gemittelt über alle 21 Versuchspersonen, fungierte dabei als Kriteriumsvariable. Die Faktorwerte auf den drei extrahierten Faktoren dienten als Prädiktorvariablen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6

*Zusammenfassung der schrittweisen multiplen Regressionsanalyse mit der Lästigkeit als abhängige Variable und den extrahierten Faktoren als unabhängigen Variablen (N = 36)*

Faktor	B	SE B	$\beta$
Schritt 1			
Aufdringlichkeit	1,12	0,04	0,98
Schritt 2			
Aufdringlichkeit	1,12	0,04	0,98
Glattheit	0,13	0,03	0,11
Schärfe	0,11	0,03	0,10

*Bemerkung.*  $R^2 = .95$  für Schritt1;  $\Delta R^2 = .02$  für Schritt 2.

Tabelle 6 zeigt, dass bereits 95 Prozent der Varianz in den Lästigkeitsurteilen durch den Faktor *Aufdringlichkeit* erklärt werden können. Die Faktoren *Glattheit* und *Schärfe* können zusammen nur 2 Prozent an zusätzlicher Varianz aufklären. Somit wird das Regressionsmodell, welches lediglich den Faktor Aufdringlichkeit beinhaltet, gewählt, da es trotz seiner Einfachheit einen sehr hohen Varianzanteil in den Lästigkeitsratings aufklärt.

Schließlich sollten die Lästigkeitsurteile für die zusammengesetzten Lärmquellen dahingehend untersucht werden, inwieweit sie vom Pegel bzw. der Lästigkeit der einzelnen Lärmarten abhängen. Das Energie-Summodationsmodell schlägt diesbezüglich als Prädiktor die energetisch aufsummierten Pegel der einzelnen Lärmquellen vor, also nichts anderes als den Pegel ( $L_{Aeq}$ ) des kombinierten Lärms. Alternativ zum  $L_{Aeq}$  wurde an dieser Stelle auch die Lautheit  $N5$  des kombinierten Lärms als Prädiktor geprüft. Beim Dominanzmodell ist der Prädiktor das Lästigkeitsurteil für die dominante Quelle. Als dominante Quelle wurde diejenige Gesamtlärm-Komponente ausgewählt, für die in der Einzelbeurteilung das höchste Lästigkeitsurteil vergeben wurde. Ein kurzes Beispiel soll das Vorgehen verdeutlichen: Ein Beurteiler vergab für eine Kombination aus Straßen- und Schienenverkehrslärm ein Lästigkeitsurteil von 9 auf der verwendeten elfstufigen Skala. Einzel präsentiert erhielt Straßenlärm eine 7 und Schienenlärm eine 6 im Lästigkeitsrating. Somit war für diesen Beurteiler der Straßenlärm die dominante Quelle. In dem Zusammenhang ist Folgendes zu betonen: Die dominante Quelle muss nicht für jede Person die gleiche sein. So könnte im Beispiel ein anderer Beurteiler für den Schienenlärm das höhere Urteil vergeben haben. Im Experiment stimmten die Beurteiler zu 78,5 Prozent über die dominante Quelle überein. Lediglich bei zwei Lärmkombinationen, nämlich Motorsense-Regionalbahn und Fluglärm-Fußball wurde von allen Teilnehmern die Motorsense bzw. der Fluglärm als die lästigste Quelle eingeschätzt. Beim Mitteln der Ratings für die dominante Quelle wird diese Diskrepanz der Beurteiler jedoch nicht berücksichtigt. Daher werden in dieser Auswertung nicht nur die Mittelwerte der Lästigkeitsratings über alle Teilnehmer betrachtet, sondern auch die individuellen Urteile. Hierzu wurden für jeden Teilnehmer die Korrelationen zwischen dessen Lästigkeitsurteilen für die kombinierten Lärmquellen und dessen Urteilen für die dominanten Quellen berechnet. Anschließend wurden diese Korrelationen über alle Teilnehmer gemittelt. Die entsprechenden Transformationen nach Fisher (Fisher-Z) wurden bei der Mittelung berücksichtigt (siehe Bortz, 2005, S. 218f.). Tabelle 7 enthält sowohl die Korrelationen für die gemittelten Lästigkeitsurteile als auch die mittleren Korrelationen für die individuellen Urteile. Beim Dominanzmodell ergeben sich sowohl gemittelt als auch individuell die höchsten Korrelationen. Tabelle 7 zeigt auch deutlich, dass die Korrelation zwischen der mittleren Lästigkeit des kombinierten Lärms und den verschiedenen Prädiktoren durchgehend höher ausfällt als die gemittelte Korrelation zwischen Einzelurteil und Prädiktoren.

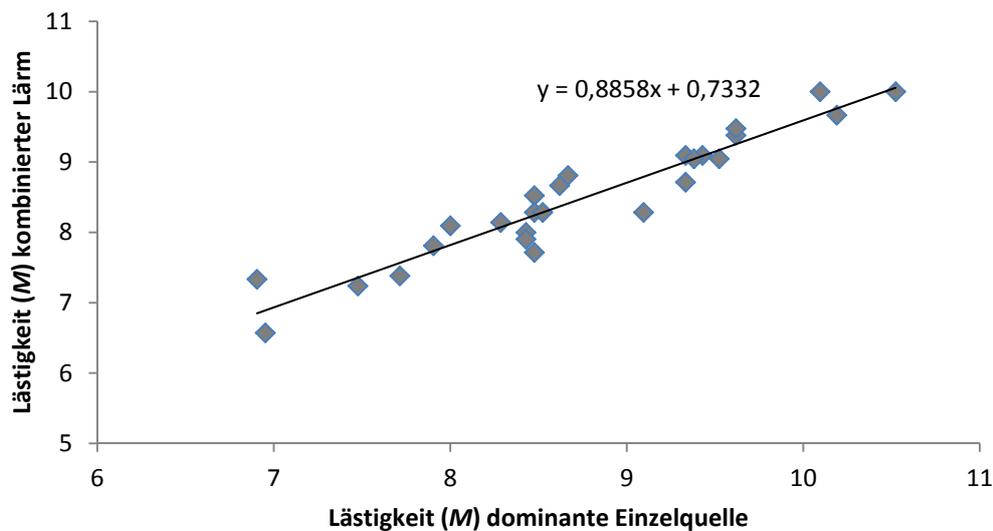
Tabelle 7

Korrelationen verschiedener Prädiktoren mit dem Lästigkeitsrating für kombinierte Lärmquellen

		Lästigkeit kombinierter Lärm			
		Mittelwert	Einzelrating		
Prädiktor	Modell	$r$	$r$ (mittel)	$r$ (max)	$r$ (min)
$L_{Aeq}$ (komb. Lärm)	ES	.74	.43	.76	.04
$N5$ (komb. Lärm)	-	.71	.53	.75	.17
Lästigkeit der als dominant empfundenen Lärmquelle	Dominanz	.95	.55	.85	.18

*Bemerkung.* ES = Energie-Summodation. Die Korrelationskoeffizienten bei den Einzelratings wurden über alle Teilnehmer gemittelt [ $r$ (mittel)], und es ist auch die höchste [ $r$ (max)] und niedrigste Korrelation [ $r$ (min)] angegeben.

Für das Dominanzmodell ist neben dem Korrelationskoeffizienten, der lediglich die Stärke eines ungerichteten Zusammenhangs angibt, auch die Regressionsgleichung von Bedeutung, welche die Höhe der Lästigkeit des kombinierten Lärms aus der Lästigkeit der dominanten Quelle vorhersagt. Schließlich könnte unabhängig von der Höhe der Korrelation das Urteil für den dominanten Lärm konstant größer ausfallen als das Urteil für die dominante Quelle. Das entsprechende Punktdiagramm mit Regressionsgleichung zeigt Abbildung 3. Demnach fällt das Lästigkeitsurteil für die kombinierte Quelle im Schnitt um mehr als eine halbe Kategorie (0,73) höher aus als das Urteil für die dominante Quelle allein.



**Abbildung 3:** Lästigkeitsrating des kombinierten Lärms in Abhängigkeit vom Lästigkeitsrating der dominanten Quelle auf einer elfstufigen Skala (1 = angenehm; 11 = lästig).

### 3.2.3 Diskussion

Die Urteile auf den eingesetzten Skalen zeigten eine hohe Übereinstimmung zwischen den Teilnehmern. Eine Faktorenanalyse ergab, dass die Skalen sehr gut zu drei verschiedenen Beurteilungsdimensionen zusammengefasst werden können. Die Dimensionen wurden benannt mit *Aufdringlichkeit*, *Glattheit*, und *Schärfe*. Das eigentliche Lästigkeitsurteil hängt indessen fast ausschließlich mit der Aufdringlichkeitsdimension zusammen ( $r^2 = .95$ ) während die restlichen Dimensionen nur jeweils ein Prozent an zusätzlicher Varianz aufklären können. Eine mögliche Erklärung ist, dass im Paarvergleich das Kriterium Glattheit noch mit einbezogen wird, bei der Skalierung über viele Lärmarten hinweg gegenüber der Lautheit jedoch nur noch eine sehr untergeordnete Rolle spielt. Der Faktor Aufdringlichkeit beinhaltet die temporale Variabilität des Schalls zu einem gewissen Teil, da er mit der Rauigkeit und Schwankungsstärke korreliert ( $r = .48$  bzw.  $r = .36$ ; siehe Tabelle 5). Bei der Zusammensetzung der Aufdringlichkeitsdimension fällt weiterhin auf, dass hier neben der Lautheit auch die Skala „Ablenkung“ enthalten ist. Die Teilnehmer scheinen also den Begriff Lästigkeit bereits intuitiv zu assoziieren mit der Erwartung, durch den jeweiligen Lärm von einer Tätigkeit abgelenkt zu werden, was auch den Ergebnissen von Guski et al. (1999) entspricht.

Die Gesamtlärmproblematik war ein zentrales Thema in Untersuchung 2. Inwieweit hängt die Lästigkeit zusammengesetzter Lärmquellen von den Eigenschaften und Beurteilungen der einzelnen Lärmquellen ab? Diesbezüglich wurden das Energie-Summationsmodell und das Dominanzmodell empirisch verglichen. Wenn es um gemittelte Lästigkeitsurteile über alle Teilnehmer geht, liefert das Dominanzmodell eindeutig die besseren Vorhersagen. Allerdings ist die Schlussfolgerung, dass einer lästigen Lärmquelle bedenkenlos eine weitere, weniger lästige Quelle hinzugefügt werden kann, nicht zulässig. Das Lästigkeitsurteil für den kombinierten Lärm fällt im Schnitt um mehr als eine halbe Kategorie höher aus als das Urteil für die dominante Quelle. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Teilnehmer nicht einheitlich eine Lärmkomponente als die dominantere beurteilten. Somit wurden das Dominanzmodell und das Energie-Summationsmodell auf der individuellen Ebene genauer betrachtet. Bezüglich der durchschnittlichen individuellen Korrelationen fällt die Überlegenheit des Dominanzmodells weit geringer aus, vor allem wenn statt

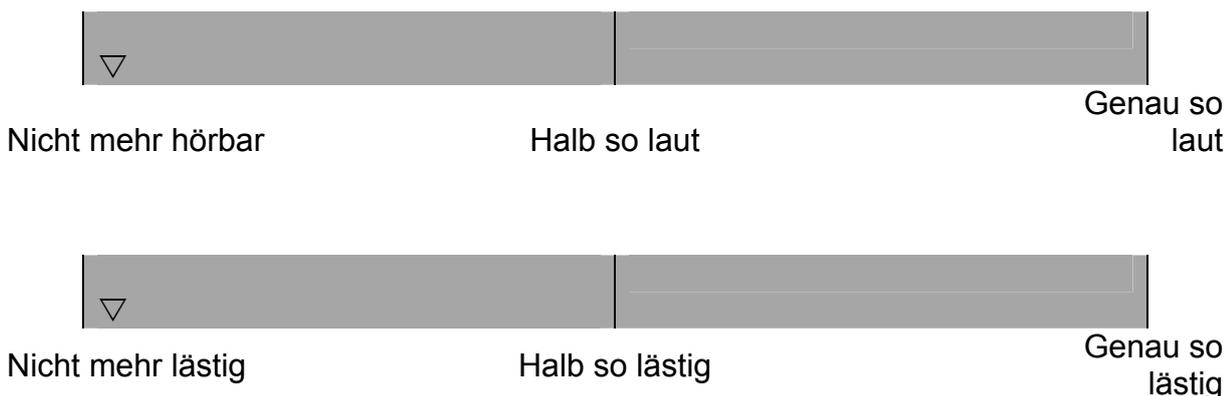
des  $L_{Aeq}$  die Lautheit  $N5$  als Prädiktor verwendet wird. An dieser Stelle muss betont werden, dass Energie-Summationsmodell und Dominanzmodell nicht uneingeschränkt vergleichbar sind. Das erste Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen einer physikalischen Größe ( $L_{Aeq}$ ) und dem Lästigkeitsurteil. Im Dominanzmodell werden hingegen zwei Lästigkeitsbeurteilungen miteinander korreliert. Die Anwendung des Dominanzmodells ist immer daran geknüpft, dass Lästigkeitsratings bzw. reliable Dosis-Wirkungskurven für die einzelnen Quellen bereits vorliegen. Das Energie-Summationsmodell ist nicht an solche Voraussetzungen geknüpft; hier kann direkt aus den gemessenen Pegeln oder der Lautheit in Sone auf die Lästigkeit geschlossen werden.

### 3.3 Untersuchung 3: Beurteilung von Lärmschutzmaßnahmen

In der dritten Untersuchung werden verschiedene Lärmquellen im Original sowie hinter verschiedenen Schallschutzvorrichtungen bezüglich ihrer Lautheit und Lästigkeit bewertet. Vom Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) wurden hierzu Auralisationen zur Verfügung gestellt, welche die Situation hinter Schallschutzfenstern der Klassen II bis V und hinter Lärmschutzwänden mit zwei, drei und fünf Metern Höhe simulieren. Die eingesetzten Beurteilungsmethoden, das Fraktionierungsverfahren und das Kategorienunterteilungsverfahren werden im Folgenden beschrieben:

#### *Beurteilung nach dem Fraktionierungsverfahren*

Mit Hilfe des Fraktionierungsverfahrens werden die ungedämmten Lärmquellen aus den Originalaufnahmen mit ihren gedämmten bzw. auralisierten Varianten verglichen. Mit diesem Verfahren soll die Frage beantwortet werden, um welches Verhältnis die empfundene Lautheit und Lästigkeit des Lärms durch den Schallschutz gemindert wird. Als Standardreiz dient in diesem Fall der Originallärm, als Vergleichsreize dessen gedämmte Versionen. Die Angaben des Beurteilers erfolgen auf einer Lautheitsskala, welche von „nicht mehr hörbar“ bis „genauso laut“ sowie einer Lästigkeitsskala, welche von „nicht mehr lästig“ bis zu „genauso lästig“ reicht (siehe Abbildung 4). Auf einem Computermonitor kann ein Regler per Maus zu dem gewünschten Skalenwert gezogen werden: Wird z. B. der Regler genau in der Mitte der Lautheitsskala platziert, bedeutet dies, dass der Lärm hinter dem Schallschutz halb so laut wie der Originallärm empfunden wird.



**Abbildung 4:** Beurteilungsskalen für das Fraktionierungsverfahren. ▽ stellt den Regler dar, welcher zur gewünschten Position auf der Skala gezogen werden kann.

#### *Beurteilung nach dem Kategorienunterteilungsverfahren*

Im KU-Verfahren werden absolute Urteile bezüglich der Lautheit und Lästigkeit des ungedämmten und gedämmten Lärms erhoben. Benötigt wird hierzu eine Skala mit hoher Spannweite, da sich die zu beurteilenden Stimuli in ihrem Pegel teilweise sehr stark unterscheiden. So reduziert ein Schallschutzfenster der Klasse V den Pegel um etwa 47 dB(A). Neben einer hohen Spannweite sollte die Skala eine hohe Auflösung besitzen, um auch Unterschiede zwischen den einzelnen Auralisationen abbilden zu können, welche sich oftmals nur sehr geringfügig in ihrem Pegel unterscheiden. Beide Anforderungen erfüllt die Kategorienunterteilungsskala (KU-Skala) nach Heller (1985). Bezüglich der Lautheit kann die KU-Skala in ihrer ursprünglichen Form verwendet werden. Für die Lästigkeit soll ebenfalls eine KU-Skala konstruiert werden. Dazu werden zunächst einmal verbale Kategorien benötigt, welche auf einem Lästigkeitskontinuum möglichst gleichabständig sein sollten. Hierfür bieten sich die Kategorien der von der IC BEN (International Commission on the Biological Effects of Noise) als Standard vorgeschlagenen Skala für Lästigkeit an (Fields, de Jong, Gjestland, Flindell, Job & Kurra et al., 2001). Es gibt auf dieser Skala fünf Abstufungen hinsichtlich der Frage, wie belästigt sich jemand von einem bestimmten Lärm fühlt. Die Abstufungen für den deutschen Sprachgebrauch sind: „äußerst“, „stark“, „mittelmäßig“, „etwas“ und „überhaupt nicht“. Die Gleichabständigkeit dieser Kategorien wurde bei der Entwicklung der IC BEN-Skala auch empirisch geprüft (Fields et al., 2001). Wie bei der klassischen KU-Skala für die Lautheit werden diese verbalen Kategorien nun jeweils mit zehn Unterabstufungen versehen. Die Kategorie „überhaupt nicht“ wird als Nullpunkt der Skala verwendet. Zusätzlich wird auch eine Höchstkategorie („mehr als äußerst“) eingerichtet, für welche beliebig hohe Zahlenwerte verwendet werden können. In Abbildung 5 sind die beiden KU- Skalen für Lautheit und Lästigkeit zu sehen.

### *Experimentelle Fragestellungen und Hypothesen*

Die Fragestellungen von Untersuchung 3 lassen sich in drei Bereiche untergliedern. Der erste Bereich geht der Frage nach, ob sich signifikante Unterschiede in den Urteilen zwischen verschiedenen Schallschutzmaßnahmen zeigen. Der zweite Bereich umfasst psychophysische Fragestellungen, also den Zusammenhang zwischen physikalischen Schallparametern und den Schallbewertungen. Der dritte Bereich behandelt personenbezogene Einflussfaktoren auf die Schallbewertung. Für den ersten Bereich soll mittels Varianzanalyse untersucht werden, welchen Einfluss die verschiedenen Schallschutzmaßnahmen auf die subjektive Beurteilung ausüben. Sowohl beim Fraktionierungs- als auch beim Kategorienunterteilungsverfahren werden signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Schallschutzklassen bzw. Lärmschutzwandhöhen erwartet: Je höher die Schallschutzklasse und je höher die Lärmschutzwand ist, desto niedriger sollten die Lautheits- und Lästigkeitsurteile sein. Es interessiert hierbei das Ausmaß der Empfindungsänderung: Von einer Schallschutzklasse zur nächsthöheren bestehen ca. 4 dB(A) Unterschied, von einer Lärmschutzwandhöhe zur nächsthöheren bestehen ca. 3 dB(A) Unterschied. Die Frage ist, wie sich diese Pegelunterschiede in den subjektiven Urteilen widerspiegeln. Die varianzanalytischen Ergebnisse für Fraktionierungs- und Kategorienunterteilungsverfahren können anschließend miteinander verglichen werden. Die jeweiligen Effektstärken geben darüber Aufschluss, ob Unterschiede in der Bewertung verschiedener Lärmschutzmaßnahmen bei einem Verfahren wesentlich deutlicher hervortreten als beim anderen Verfahren. Für den zweiten Bereich, welcher die psychophysischen Fragestellungen beleuchtet, ist zunächst die Art des Zusammenhangs zwischen Schallpegel bzw. Lautheit in Sone und den Lautheits- und Lästigkeitsurteilen von Interesse. Bei der Kategorienskalisierung wird entsprechend dem Weber-Fechnerschen Gesetz ein linearer Zusammenhang zwischen Urteil und Pegel erwartet. Beim Fraktionierungsverfahren hingegen sollten die beurteilten Verhältnisse zwischen ungedämmten und gedämmten Lärm den Verhältnissen der Sone-Lautheiten entsprechen. Weist z. B. der ungedämmte Lärm einen  $N5$ -Wert von 16 sone und der gedämmte Lärm  $N5 = 4$  sone auf, so sollte der gedämmte Lärm nur ein Viertel bzw. 25 Prozent so laut wie der ungedämmte Lärm empfunden werden.

	...
	53
schmerzhaft	52
	51
<hr/>	
	50
	49
	48
	47
	46
sehr laut	45
	44
	43
	42
	41
<hr/>	
	40
	39
	38
	37
	36
laut	35
	34
	33
	32
	31
<hr/>	
	30
	29
	28
	27
	26
mittel	25
	24
	23
	22
	21
<hr/>	
	20
	19
	18
	17
	16
leise	15
	14
	13
	12
	11
<hr/>	
	10
	9
	8
	7
	6
sehr leise	5
	4
	3
	2
	1
<hr/>	
nichts gehört	0

	...
	43
mehr als äußerst	42
	41
<hr/>	
	40
	39
	38
	37
	36
äußerst	35
	34
	33
	32
	31
<hr/>	
	30
	29
	28
	27
	26
stark	25
	24
	23
	22
	21
<hr/>	
	20
	19
	18
	17
	16
mittelmäßig	15
	14
	13
	12
	11
<hr/>	
	10
	9
	8
	7
	6
etwas	5
	4
	3
	2
	1
<hr/>	
überhaupt nicht	0

**Abbildung 5:** Kategorienunterteilungsskalen für die Lautheit (links, nach Heller, 1985) und die Lästigkeit (rechts).

Das Urteil im Fraktionierungsverfahren bezieht sich also nicht darauf, um wie viel sich die Lautheit reduziert (im Beispiel um 75 Prozent), sondern auf die verbleibende Lautheit (im Beispiel 25 Prozent). Aus diesem Grund wird hierfür der Ausdruck *empfundene Restlautheit* verwendet. Formell lässt sich die erwartete Beziehung zwischen empfundener Restlautheit und dem Verhältnis der Sone-Lautheiten ( $N5$ ) so beschreiben:

$$\text{empfundene Restlautheit (\%)} = \frac{N5(\text{gedämmter Schall})}{N5(\text{ungedämmter Schall})} \times 100$$

Aus den  $N5$ -Lautheiten der gedämmten und ungedämmten Schalle lässt sich also direkt ein Wert berechnen, welcher exakt der empfundenen Restlautheit entsprechen soll. Der rechte Teil der Gleichung wird im Folgenden als „vorhergesagte Restlautheit“ bezeichnet. Trägt man in einem Punktdiagramm vorhergesagte und tatsächlich empfundene Restlautheit gegeneinander ab, sollten die Datenpunkte auf der Winkelhalbierenden zu liegen kommen. Vorhergesagte und tatsächliche Restlautheit werden anschließend mittels Regressionsanalyse in Beziehung gesetzt zur Pegeldifferenz zwischen ungedämmten und gedämmten Lärm. Dadurch kann ermittelt werden, welches Lautheitsverhältnis einer bestimmten Pegeldifferenz entspricht. Analog soll auch die Beziehung zwischen empfundener Restlästigkeit und vorhergesagter Restlautheit betrachtet werden. Natürlich macht das Sone-Modell bezüglich der Lästigkeit keine Vorhersagen, dennoch kann man aufgrund der oben berichteten hohen Korrelation zwischen Schallpegel und Lästigkeit fragen, ob gleichen Lautheitsverhältnissen auch gleiche Lästigkeitsverhältnisse entsprechen.

Der dritte Bereich der Fragestellungen befasst sich mit dem Zusammenhang von personenbezogenen Variablen mit der Lärmbewertung. Erwartet werden positive Korrelationen zwischen der Lärmempfindlichkeit und den Lästigkeitsbewertungen. Alters- und Geschlechtseffekte sollten entsprechend der oben zitierten Literatur nicht auftreten.

### 3.3.1 Methode

#### **Teilnehmer**

Es nahmen insgesamt 60 Personen an der Untersuchung teil. Beiden Skalierungsverfahren wurden jeweils 30 Versuchspersonen zugeordnet. Die Zuordnung war randomisiert. Eine ausgewogene Stichprobe, in der auch Teilnehmer höheren Alters (ab 40 Jahre) repräsentiert sind, wurde angestrebt. Personen ab 35 Jahren wurden auch außerhalb der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt mittels Plakaten und Handzetteln sowie über Bekanntmachungen in der Lokalpresse zur Teilnahme aufgerufen. Die Teilnehmer wurden einem audiometrischen Screening im Frequenzbereich von 125 Hz bis 8 kHz unterzogen. Falls bei einer Frequenz die Hörschwelle mehr als 25 dB über der Schwelle Normalhörender lag, wurde die Person von der Untersuchung ausgeschlossen. Eine Ausnahme wurde bei Teilnehmern ab 60 Jahren gemacht, da sie dieses Kriterium meist nicht erfüllten. Um dennoch ältere Probanden mit in die Stichprobe aufnehmen zu können, wurde bei Personen ab 60 Jahren das Kriterium auf 35 dB über der Normalhörschwelle festgelegt. Insgesamt mussten 5 Personen aufgrund ihrer audiometrischen Ergebnisse von der Untersuchung ausgeschlossen werden. Schlussendlich nahmen beim Fraktionierungsverfahren 18 Frauen und 12 Männer im Alter zwischen 19 und 68 Jahren ( $Md = 28$ ) teil. Beim KU-Verfahren nahmen 17 Frauen und 13 Männer im Alter von 20 bis 72 Jahren ( $Md = 31$ ) teil. Bei jedem Teilnehmer wurde die individuelle Lärmempfindlichkeit mithilfe des *Noise Sensitivity Questionnaire* (NoiSeQ) von Schütte, Marks, Wenning & Griefahn (2007) erhoben. Auch die subjektiv eingeschätzte Lärmbelastung am Wohnort der jeweiligen Person wurde erfragt. Die Teilnahme wurde mit 8 €/h vergütet. Personen, die nicht der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt angehörten und eigens anreisen mussten, bekamen für ihre Teilnahme an dem Experiment, welches etwa 1,5 Stunden dauerte, pauschal 20 €.

### **Stimuli**

Es waren neun einzelne Lärmquellen und 15 kombinierte (aus den neun Einzelquellen zusammengesetzte) Lärmquellen zu beurteilen. Als Einzelquellen dienten wiederum die Aufnahmen aus Untersuchung 1 mit zwei Ausnahmen: Die Lärmquelle *U-Bahn* kam nicht mehr zum Einsatz, da sie in den vorangegangenen Untersuchungen kaum anders bewertet wurde als die Lärmquelle *Regionalbahn*. Die Aufnahme *Fußball* wurde ersetzt: Statt eines Trainings war nun ein Ausschnitt aus einem regulären Saisonspiel mit etwa 150 Zuschauern zu hören<sup>1</sup>. Auralisiert wurde die Hörsituation hinter Schallschutzfenstern der Klassen II bis V und hinter Lärmschutzwänden mit zwei, drei und fünf Metern Höhe. Die Positionen von Lärmquelle und Hörer, welche den Auralisationen der Lärmschutzwände zugrunde lagen, waren wie folgt: Die Quelle befand sich 1 m vor der Lärmschutzwand und 0,5 m über dem Boden. Die Position der Ohren des Hörers war 3 m hinter der Lärmschutzwand und 1,5 m über dem Boden. Bei den Auralisationen der Schallschutzfenster wurde angenommen, dass an der Außenfassade der Pegel des Originallärms herrscht und sich der Hörer in einem Raum mit diffusem Schallfeld befindet mit gleichem Schalldruck im gesamten Raum. Mit den Projektpartnern vom IBP wurde erörtert, ob Lärmschutzwände für das jeweilige Lärmszenario in der Realität zum Einsatz kommen. Wo dies nicht der Fall ist (z. B. bei Fluglärm), wurde auch die entsprechende Auralisation nicht durchgeführt. Schallschutzfenster wurden hingegen bei jeder Lärmart auralisiert. Somit waren 24 Lärmarten hinter Fenstern mit 4 verschiedenen Schallschutzklassen, also 96 Auralisationen von Schallschutzfenstern zu beurteilen. Zusätzlich wurden für sieben Lärmarten auch die Lärmschutzwände mit drei verschiedenen Höhen auralisiert, somit waren 21 Auralisationen von Lärmschutzwänden zu beurteilen. Die A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel ( $L_{Aeq}$ ) und die N5-Lautheiten der Originallärmarten sowie der zugehörigen Auralisationen sind jeweils in Anhang A3.2 und A3.3 aufgeführt.

### **Apparat**

Es wurden dieselben Geräte wie in Experiment 1 verwendet.

### **Ablauf**

Es erfolgte zunächst die audiometrische Untersuchung, die etwa 5 Minuten in Anspruch nahm. Danach wurde die Person per Zufallsauswahl einem der beiden Skalierungsverfahren zugeordnet. Das weitere Vorgehen ist getrennt nach dem jeweiligen Skalierungsverfahren beschrieben:

#### *Fraktionierungsverfahren:*

Der Proband wurde instruiert, dass er unterschiedliche Lärmszenen nacheinander in ungedämmter und gedämmter Version hört. Anschließend sollte er auf der Skala (vgl. Abb. 4) angeben, um wie viel leiser bzw. weniger lästig er den gedämmten Lärm im Vergleich zum ungedämmten empfindet, mit anderen Worten wie viel Prozent die empfundene Restlautheit bzw. Restlästigkeit beträgt (siehe Anhang A2.3). Die Reihenfolge der Vergleiche war folgende:

Eine Lärmart im Original wurde immer mit allen ihren zugehörigen (auralisierten) Dämmungen verglichen. Der Proband bekam keine Information darüber, welche Auralisation zu hören war, er wusste also z. B. nicht, ob er den Schall hinter einem Schallschutzfenster oder einer Lärmschutzwand hörte. Die Reihenfolge der Auralisationen war randomisiert. Erst wenn für eine bestimmte Lärmart alle zugehörigen Auralisationen gehört und bewertet waren, wurde zur nächsten Lärmart übergegangen. Der Proband bekam einen Hinweis, wenn die Lärmart wechselte. Die Reihenfolge der Lärmarten war ebenfalls randomisiert. Die Versuchsdauer betrug etwa 1,5 Stunden.

---

<sup>1</sup> Grund war die Kritik eines Projektgutachters, welcher das Training als zu leise und wenig repräsentativ für die Lärmbelastung an Sportstätten bezeichnete.

### *Skalierung nach dem Kategorienunterteilungsverfahren:*

Nach der Instruktion wurden dem Probanden zur Orientierung die Schalle mit dem höchsten und dem niedrigsten Pegel dargeboten (Reihenfolge war randomisiert). Diese beiden Lärmarten sollten als Übung mit den beiden KU-Skalen beurteilt werden. Danach wurden alle Auralisationen und Originalschalle dem Probanden in randomisierter Reihenfolge präsentiert. Die Versuchsdauer betrug etwa 1,5 Stunden.

### **3.3.2 Ergebnisse**

Die Auswertung umfasst im Wesentlichen drei Teilbereiche. Zunächst wird varianzanalytisch geprüft, ob sich die Beurteilungen in Abhängigkeit von Schallschutzklasse bzw. Lärmschutzwandhöhe signifikant unterscheiden. Für Schallschutzfenster und Lärmschutzwände werden jeweils separate Varianzanalysen durchgeführt. Die grafischen Darstellungen der entsprechenden Mittelwerte und Standardfehler aufgeschlüsselt nach den einzelnen Lärmarten nehmen sehr viel Platz ein und sind daher im Anhang A4 zu finden. Im zweiten Schritt soll regressionsanalytisch der Zusammenhang zwischen Bewertungen und Schallintensität untersucht werden. Im dritten Schritt wird der Zusammenhang zwischen den Urteilen und personellen Faktoren wie Alter und Lärmempfindlichkeit geprüft. Bei der Interpretation der verschiedenen Effektstärken und Zusammenhangsmaße wird auf das Schema von Cohen (1992; siehe auch: Bortz und Döring, 2006, S.606) zurückgegriffen: Für die Effektgröße  $\eta^2$  und den Determinationskoeffizienten  $r^2$  wird bei .01 von einem kleinen, bei .10 von einem mittleren und bei .25 von einem großen Effekt gesprochen. Für den Korrelationskoeffizienten  $r$  liegen die entsprechenden Werte bei .10, .30 und .50.

#### *Kategorienunterteilungsverfahren Varianzanalyse*

Die ungedämmten Schalle gehen nicht in die Varianzanalyse ein. Dass die empfundene Lautheit und Lästigkeit bei den wesentlich lautereren ungedämmten Schallen höher empfunden wird als bei den gedämmten Schallen, wäre ein trivialer Befund. Vorrangig interessiert an dieser Stelle, ob zwischen den einzelnen Schallschutzklassen und Lärmschutzwandhöhen signifikante Unterschiede bestehen.

Bezüglich der empfundenen *Lautheit* zeigt sich ein hochsignifikanter Effekt des Faktors *Schallschutzart*, sowohl bei den Schallschutzfenstern  $F(3, 87) = 209,20, p < 01, \eta^2 = .88$ , als auch bei den Lärmschutzwänden,  $F(2, 58) = 21,96, p < 01, \eta^2 = .43$ .

Auch bei der empfundenen *Lästigkeit* zeigt sich ein hochsignifikanter Effekt des Faktors *Schallschutzart*, sowohl bei den Schallschutzfenstern  $F(3, 87) = 130,06, p < 01, \eta^2 = .82$ , als auch bei den Lärmschutzwänden,  $F(2, 58) = 20,35, p < 01, \eta^2 = .41$ .

Die Differenzen in den mittleren Beurteilungen von einer Schallschutzklasse bzw. Wandhöhe zur nächsthöheren finden sich in Tabelle 8. Sämtliche Unterschiede sind signifikant. Um die Unterschiede zwischen nicht benachbarten Schallschutzklassen zu ermitteln, sind die in Tabelle 8 aufgeführten Werte zu addieren. So ist die z. B. Lautheit für Schallschutzklasse V knapp 9 (2,39 + 3,20 + 3,33) Skaleneinheiten geringer als für Schallschutzklasse II.

#### *Fraktionierungsverfahren Varianzanalyse*

Bei einer Versuchsperson konnten aufgrund technischer Probleme die meisten Daten nicht gespeichert werden. Sie wurde von der Varianzanalyse ausgeschlossen, somit verbleibt ein  $n$  von 29. Die Urteile im Fraktionierungsverfahren geben die im Vergleich zum ungedämmten Lärm verbliebene Lautheit und Lästigkeit an, und sollen im Folgenden als *Restlautheit* und *Restlästigkeit* bezeichnet werden.

Tabelle 8

*Unterschiede in der Bewertung zwischen benachbarten Schallschutzklassen und Lärmschutzwandhöhen (KU-Skala)*

Schallschutzklassen		Differenz in Skaleneinheiten			$t(29)$	$P^a$
		$M$	$SF$			
Lautheit						
II	III	2,39	0,23	10,39	< .01	
III	IV	3,20	0,29	11,03	< .01	
IV	V	3,33	0,29	11,48	< .01	
Wandhöhen						
2	3	1,59	0,54	2,94	.02	
3	5	1,93	0,45	4,29	< .01	
Lästigkeit						
Schallschutzklassen						
II	III	2,89	0,27	10,70	< .01	
III	IV	2,86	0,37	7,73	< .01	
IV	V	2,30	0,28	8,21	< .01	
Wandhöhen						
2	3	1,60	0,52	3,08	.01	
3	5	1,76	0,50	3,52	< .01	

*Bemerkung.* <sup>a</sup>Signifikanzniveau wurde nach Bonferroni korrigiert.

Bezüglich der *Restlautheit* ergibt sich ein hochsignifikanter Effekt des Faktors *Schallschutzart*, sowohl bei den Schallschutzfenstern  $F(3, 84) = 127,80$ ,  $p < 01$ ,  $\eta^2 = .82$ , als auch bei den Lärmschutzwänden,  $F(2, 56) = 45,70$ ,  $p < 01$ ,  $\eta^2 = .62$ .

Auch bei der *Restlästigkeit* zeigt sich ein hochsignifikanter Effekt des Faktors *Schallschutzart*, sowohl bei den Schallschutzfenstern  $F(3, 84) = 98,52$ ,  $p < 01$ ,  $\eta^2 = .78$ , als auch bei den Lärmschutzwänden,  $F(2, 56) = 44,43$ ,  $p < 01$ ,  $\eta^2 = .61$ .

Die Differenzen in den mittleren Beurteilungen im Fraktionierungsverfahren zwischen aufeinanderfolgenden Schallschutzklassen bzw. Wandhöhen und die Signifikanzprüfungen dieser Unterschiede finden sich in Tabelle 9. Sämtliche Unterschiede sind hochsignifikant. Wiederum kann durch Addieren der Werte die Differenz zwischen beliebigen Schallschutzklassen ermittelt werden. So ist z. B. die Restlautheit für Schallschutzklasse IV um 10,5 (5,01 + 5,49) Prozentpunkte niedriger als für Schallschutzklasse II.

#### *Regressionen KU-Skala*

Die Zusammenhänge zwischen Schallintensität und den Urteilen werden im Folgenden durch Punktdiagramme veranschaulicht. Die Datenpunkte unterscheiden sich in Farbe und Form, um auch die verschiedenen Lärmarten grafisch unterscheidbar zu machen. Abbildung 6 zeigt das Punktdiagramm für die mittleren Lautheitsurteile auf der KU-Skala in Abhängigkeit vom Pegel ( $L_{Aeq}$ ).

Tabelle 9

*Unterschiede in der Bewertung zwischen benachbarten Schallschutzklassen und Lärmschutzwandhöhen (Fraktionierung)*

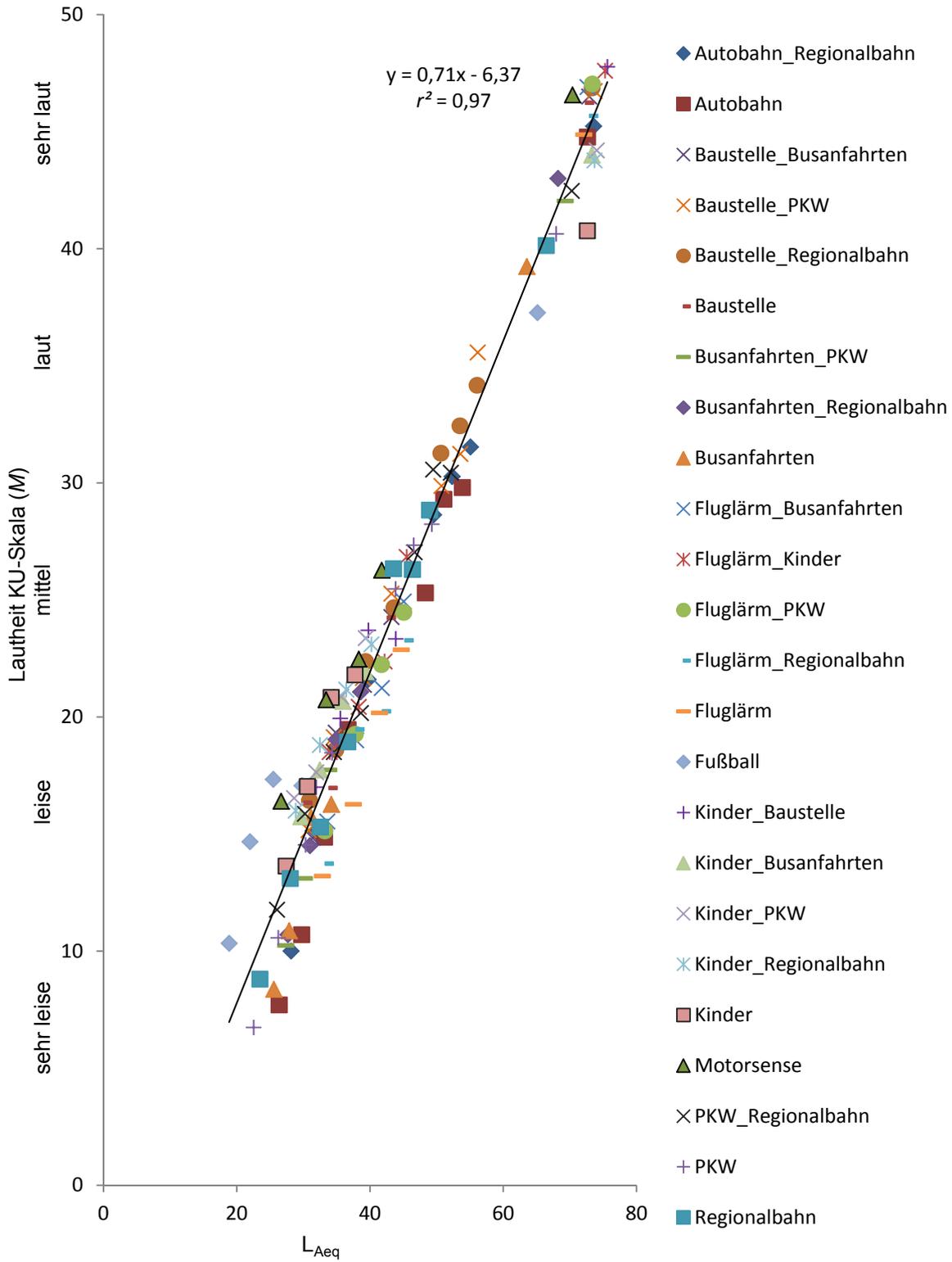
Schallschutzklassen		Differenz im Urteil		t(28)	P <sup>a</sup>
		M	SF		
(prozentuale) Restlautheit					
II	III	5,01	0,52	9,63	< .01
III	IV	5,49	0,54	10,17	< .01
IV	V	5,02	0,48	10,46	< .01
Wandhöhen					
2	3	3,93	0,80	4,91	< .01
3	5	4,63	0,72	6,43	< .01
(prozentuale) Restlästigkeit					
Schallschutzklassen					
II	III	6,67	0,78	8,55	< .01
III	IV	5,79	0,69	8,39	< .01
IV	V	6,46	0,85	7,60	< .01
Wandhöhen					
2	3	3,90	0,89	4,38	< .01
3	5	5,32	0,88	6,05	< .01

*Bemerkung.* <sup>a</sup>Signifikanzniveau wurde nach Bonferroni korrigiert.

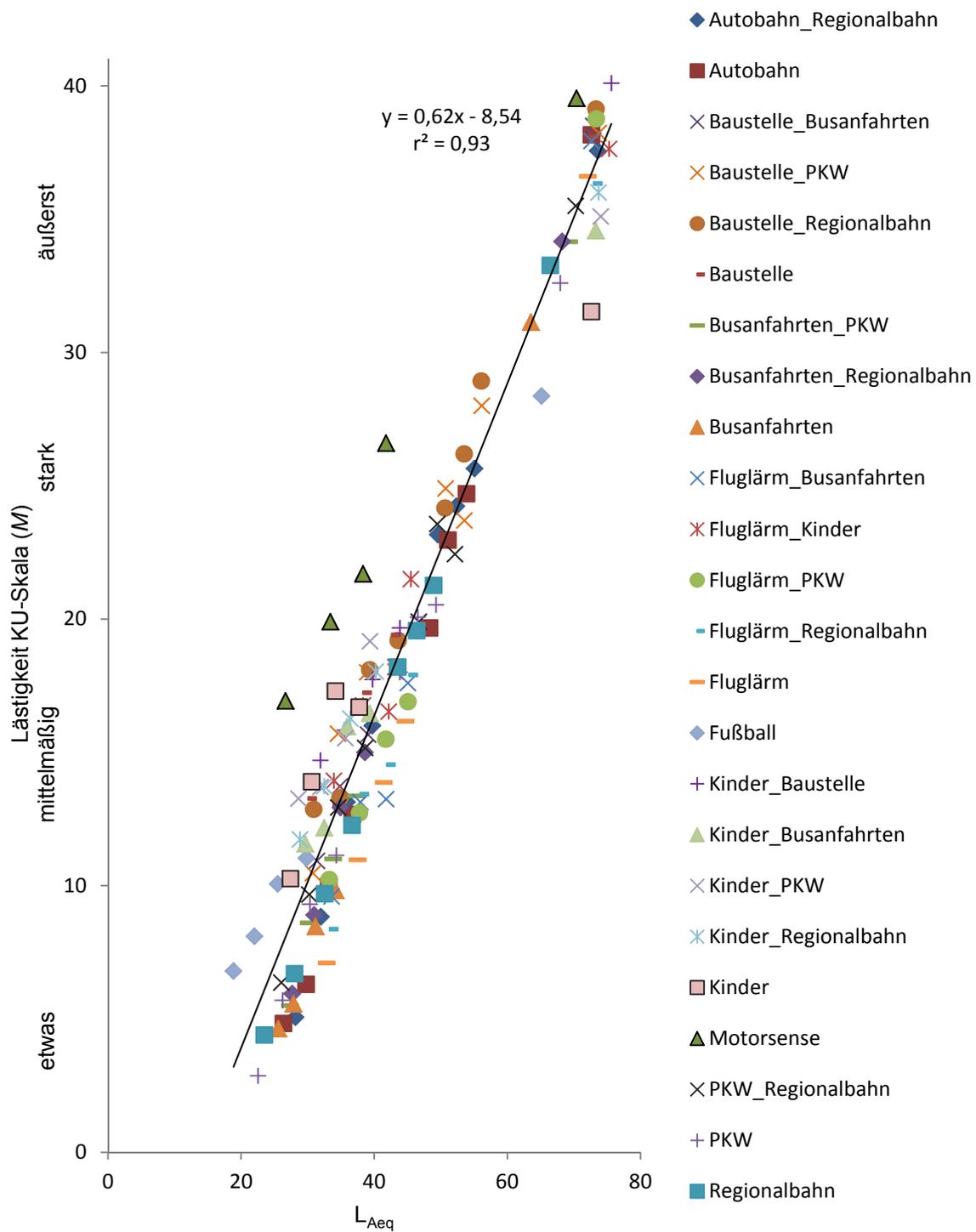
Insgesamt werden durch den  $L_{Aeq}$  97 Prozent der Varianz in den mittleren Lautheitsurteilen aufgeklärt. Werden statt der gemittelten Lautheitsurteile die Einzelurteile der Teilnehmer als Kriterium verwendet, reduziert sich die erklärte Varianz auf  $r^2 = .68$ . Die Standardabweichungen der Urteile betragen zwischen 4,49 und 10,52 Skaleneinheiten ( $Md = 6,89$  Skaleneinheiten). Wie man der Regressionsgleichung in Abbildung 6 entnehmen kann, geht eine Erhöhung des Pegels um 1 dB(A) mit einer Erhöhung des Lautheitsurteils auf der KU-Skala um 0,71 Skaleneinheiten einher. Für den Übergang von einer verbalen Kategorie zur nächsten (10 Skaleneinheiten) ist eine Pegeldifferenz von 14, dB(A) anzusetzen.

Abbildung 7 zeigt das Punktdiagramm für die mittleren Lästigkeitsurteile auf der KU-Skala in Abhängigkeit vom Pegel ( $L_{Aeq}$ ).

Durch den Pegel ( $L_{Aeq}$ ) werden 93 Prozent der Varianz in den mittleren Lästigkeitsurteilen aufgeklärt. Werden statt der gemittelten Lästigkeitsurteile die Einzelurteile der Teilnehmer als Kriterium verwendet, reduziert sich die erklärte Varianz auf 56 Prozent. Die Standardabweichungen der Urteile betragen zwischen 2,58 und 13,64 Skaleneinheiten ( $Md = 7,66$  Skaleneinheiten). Eine Erhöhung des Pegels um 1 dB(A) geht im Mittel mit einer Erhöhung des Lästigkeitsurteils um 0,62 Skaleneinheiten einher. Für den Übergang von einer verbalen Kategorie zur nächsten (10 Skaleneinheiten) ist eine Pegeldifferenz von 16 dB(A) anzusetzen.



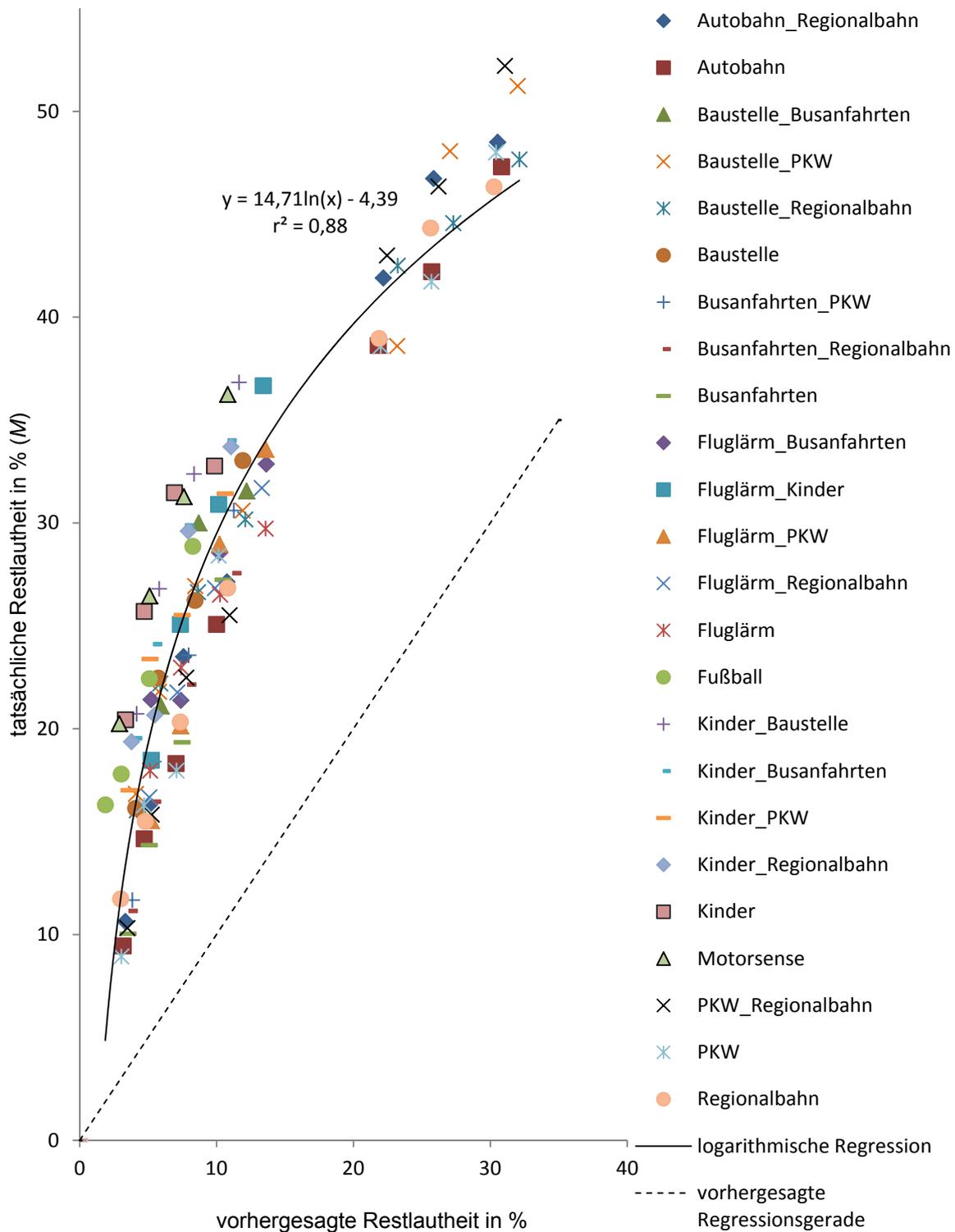
**Abbildung 6:** Mittlere Lautheitsurteile auf der KU-Skala (gedämmte und ungedämmte Schalle) in Abhängigkeit von Pegel ( $L_{Aeq}$ ) und Lärmart mit linearer Regressionsgerade.



**Abbildung 7:** Mittlere Lästigkeitsurteile auf der KU-Skala in Abhängigkeit von Pegel und Lärmart mit linearer Regressionsgerade.

## Regressionen Fraktionierung

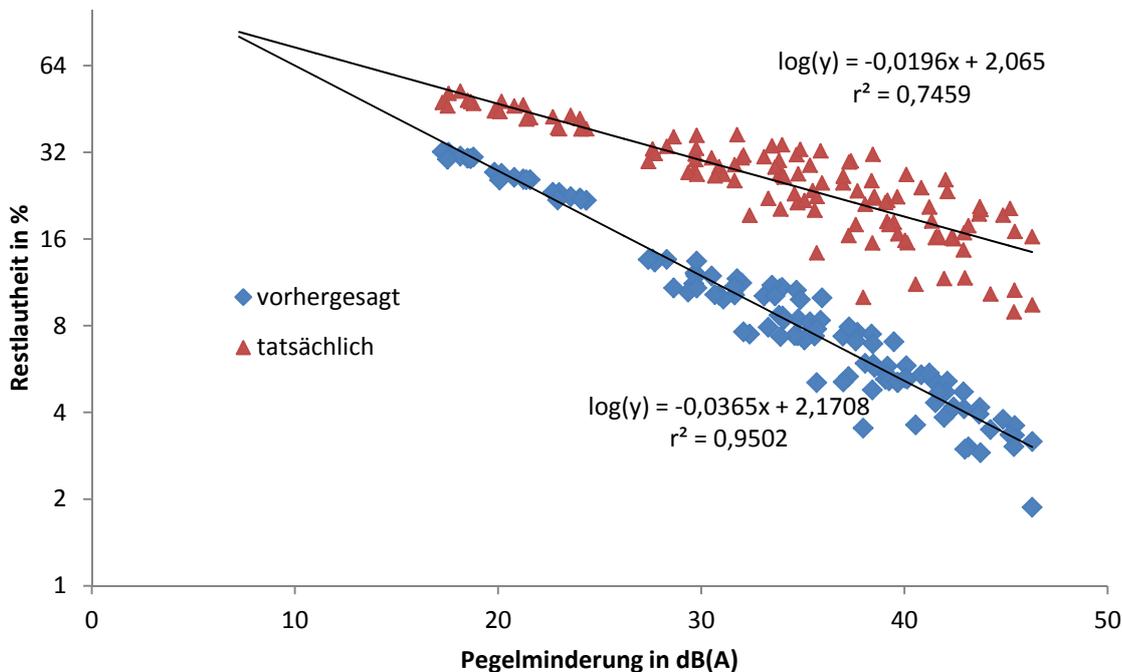
Abbildung 8 zeigt das Punktdiagramm für die mittleren Restlautheitsurteile im Fraktionierungsverfahren in Abhängigkeit von der vorhergesagten Restlautheit.



**Abbildung 8:** Mittlere Restlautheitsurteile in Abhängigkeit von vorhergesagter Restlautheit und Lärmart mit logarithmischer Regressionskurve.

Aus Abbildung 8 wird deutlich, dass die vorhergesagte die tatsächliche Restlautheit durchgehend unterschätzt: Die Datenpunkte liegen sämtlich oberhalb der vorhergesagten Regressionsgerade.

Die Abweichung der empirischen Werte von den vorhergesagten nimmt von etwa 10 Prozent auf 20 Prozent entlang der Abszisse zu. Der Verlauf der Datenpunkte kann gut durch eine logarithmische Regressionskurve beschrieben werden. Zur Beantwortung der Frage, bei welcher Pegelminderung eine Halbierung der Lautheit stattfindet, ist zunächst die Pegeldifferenz zwischen ungedämmten und gedämmten Lärm ( $\delta L$ ) auf die Restlautheit zu beziehen. Abbildung 9 zeigt die entsprechende Regressionsfunktion sowohl für die vorhergesagte als auch für die tatsächliche Restlautheit.



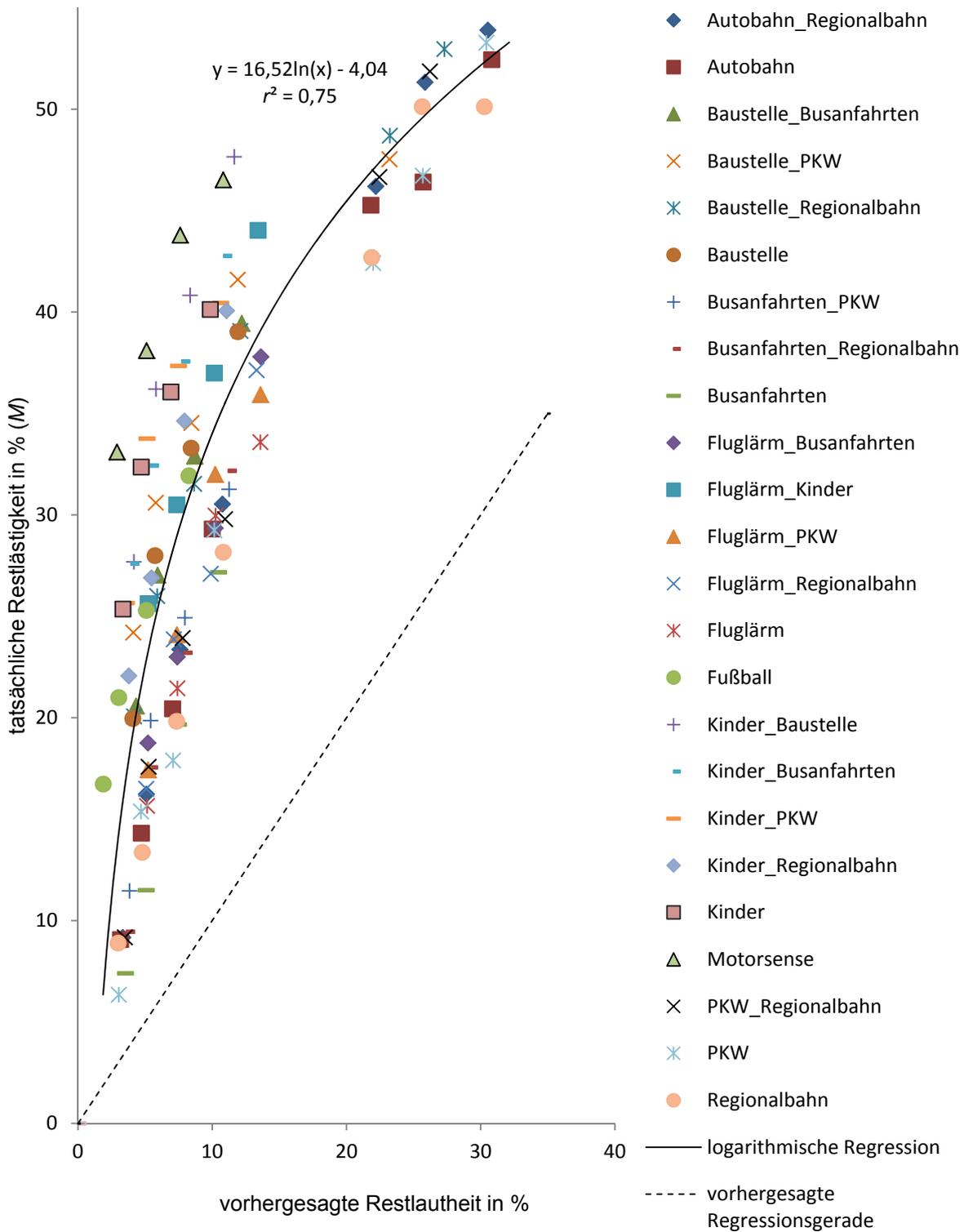
**Abbildung 9:** Restlautheit der auralisierten Schalle in Abhängigkeit von der Pegeldifferenz zwischen ungedämmten und gedämmten Schall.

Entsprechend der Regressionsgleichung in Abbildung 9 beträgt die Pegeldifferenz, welche einer vorhergesagten Restlautheit von 50 Prozent entspricht, rund 13 dB(A). Bei der tatsächlichen Restlautheit ergibt sich diesbezüglich ein Wert von rund 19 dB(A). Auch das Sone-Modell prognostiziert demnach für eine Halbierung der Lautheit eine höhere Pegeldifferenz als 10 dB, welche aber die empirisch ermittelte Pegeldifferenz immer noch unterschätzt. Es ist an dieser Stelle zu betonen, dass die hier angegebenen Pegeldifferenzen aus der Anpassung eines Regressionsmodells an die empirisch gewonnenen Daten aus den hier vorliegenden Stimuli resultieren. Sie beanspruchen keine Allgemeingültigkeit und sollen auch nicht die 10-dB-Regel durch eine andere ersetzen. Zur Überprüfung der 10-dB-Regel müsste eine repräsentative Schallauswahl getroffen werden, die den gesamten Pegelbereich gleichmäßig abdeckt.

Abbildung 10 zeigt das Punktdiagramm für die mittleren Restlärmsurteile im Fraktionierungsverfahren in Abhängigkeit von der vorhergesagten Restlautheit. Die vorhergesagte Restlautheit unterschätzt auch die tatsächliche Restlärmsurteile durchgehend: Die Datenpunkte liegen wiederum sämtlich oberhalb der vorhergesagten Regressionsgerade. Wie bei der Restlautheit verläuft die Abweichung nicht konstant. Die Abweichung nimmt von etwa 5 auf etwa 20 Prozent entlang der Abszisse zu. Wiederum kann eine logarithmische Regressionskurve den Verlauf der Datenpunkte gut beschreiben. Um zu ermitteln, bei welcher Pegeldifferenz eine Halbierung der Lärmsurteile erfolgt, wurde analog zur Restlautheit (siehe Abbildung 9) die Regression von der Pegeldifferenz ( $\delta L$ ) auf die Restlärmsurteile berechnet. Die entsprechende Gleichung lautet:

$$\log(\text{Restlärmsurteil in Prozent}) = (-0,02) \cdot \delta L + 2,13$$

Die Höhe des Zusammenhangs beträgt  $r^2 = .54$ . Somit ist für eine Restlärigkeit von 50 Prozent eine Pegelminderung von 22 dB(A) erforderlich.



**Abbildung 10:** Mittlere Restlärigkeitssurteile in Abhängigkeit von vorhergesagter Restlautheit und Lärmart mit logarithmischer Regressionskurve.

Abbildung 10 zeigt weiterhin, dass bestimmte Lärmarten systematisch von der Regressionskurve abweichen. So liegen die vier Datenpunkte für den Motorsenselärm deutlich über der Regressionskurve. Dieser Lärm wird in seiner Restlöstigkeit also deutlich höher eingestuft als andere Lärmarten mit derselben vorhergesagten Restlautheit. Das gleiche trifft auch für Lärmkombinationen zu, welche Kinderlärm enthalten und auch für den Kinderlärm selbst. Die Datenpunkte für den Schienenlärm (Regionalbahn) und PKW weichen hingegen deutlich nach unten von der Regressionsgeraden ab. Hier ist also das Urteil zur Restlöstigkeit niedriger als bei anderen Lärmarten mit gleicher vorhergesagter Restlautheit. Aufgrund dieser Beobachtungen wurde geprüft, inwieweit die Lärmarten zusätzliche Varianz in den Urteilen zur Restlöstigkeit aufklären. Die Lärmarten wurden hierfür in Form von effektcodierten Variablen zusätzlich zur vorhergesagten Restlautheit in das Regressionsmodell mit aufgenommen (zur methodischen Vorgehensweise bei der Effektcodierung siehe z. B. Bortz, 2005; Cohen, Cohen, West & Aiken, 2002). Dadurch erhöhte sich der Anteil der erklärten Varianz in den Urteilen von 75 auf 96 Prozent. Die Lärmarten, welche stark vom Durchschnitt der übrigen Lärmarten abweichen, zeichnen sich durch eine hohe Partialkorrelation mit dem Kriterium aus (siehe auch hierzu wiederum Cohen et al., 2002). Tabelle 10 listet die Lärmarten auf, welche positive und negative Partialkorrelationen ( $r_{part.}$ ) von .50 und mehr mit der Restlöstigkeit aufweisen. Die Festlegung auf .50 geschieht, da ab diesem Wert von einem großen Effekt gesprochen wird (siehe Bortz & Döring, 2006; Cohen, 1992).

Tabelle 10

Partialkorrelationen ( $r_{part}$ ) der Lärmarten mit der mittleren Restlöstigkeit. Aufgeführt werden nur Lärmarten mit Werten  $> .50$  oder  $< -.50$ .

Lärmart	$r$	Lärmart	$r$
Partialkorrelation $> .50$		Partialkorrelation $< -.50$	
Motorsense	.81	Busanfahrten	-.65
Kinder_Baustelle	.67	PKW	-.59
Kinder	.63	Regionalbahn	-.59
Kinder_PKW	.60	Autobahn	-.54
Kinder_Busanfahrten	.59	Fluglärm	-.53

Eine hohe positive Partialkorrelation bei einer Lärmart zeigt an, dass das Löstigkeitsurteil bei dieser im Vergleich zu den übrigen Lärmarten höher lag. Bei einer negativen Partialkorrelation liegt das Urteil niedriger als bei den übrigen Lärmarten. Was in Abbildung 10 durch die Abweichung bestimmter Lärmarten von der Regressionskurve veranschaulicht wurde, ist somit in Tabelle 10 durch die Höhe der entsprechenden Partialkorrelationen auch in Zahlen hinterlegt.

#### *Alter, Lärmempfindlichkeit, Geschlecht*

Die Korrelationen der mittleren Lautheits- und Löstigkeitsurteile der einzelnen Personen mit deren Alter und Lärmempfindlichkeit (ermittelt durch den NoiSeQ-Fragebogen) sowie die Prüfung auf Geschlechterunterschiede gibt Tabelle 11 wieder:

Aus Tabelle 11 ist ersichtlich, dass die Zusammenhänge zwischen Urteilen und Alter in ihrer Höhe nur mittel bis gering und bis auf die Lautheitsurteile bei der KU-Skala negativ ausfallen. Nur in Bezug auf die KU-Lautheit vergeben ältere Menschen demnach höhere Urteile als jüngere Menschen. In Bezug auf die Löstigkeitsratings und auf die Restlautheit ist es tendenziell umgekehrt. Die Korrelationen zwischen Urteil und Lärmempfindlichkeit bei der Fraktionierung fallen zwar positiv aus, sind in ihrer Ausprägung aber ebenso mittel bis schwach. Deutliche positive Korrelationen zeigen sich hingegen zwischen Urteil und Lärmempfindlichkeit bei den KU-Skalierungen. Es wurde auch geprüft ob sich Geschlechtereffekte bei der Beurteilung zeigten. Die

mittleren Urteile für beide Verfahren wurden hierzu mittels t-Test auf Unterschiede zwischen den Geschlechtern geprüft. Die entsprechenden t-Werte sind jedoch sämtlich nicht signifikant.

Tabelle 11

*Korrelationen der mittleren Lautheits- und Lästigkeitsurteile der einzelnen Personen mit deren Alter und Lärmempfindlichkeit. Geschlechterunterschiede wurden mittels t-Test geprüft, die Prüfwerte und Wahrscheinlichkeiten finden sich in den beiden rechten Spalten.*

Verfahren	Dimension	Korrelation (r) mit:		Geschlechterunterschied	
		Alter	Lärmempfindlichkeit	t(28)	p
Fraktionierung	Lautheit	-.19	.24	0,48	.73
	Lästigkeit	-.30	.15	0,69	.49
KU-Skala	Lautheit	.20	.54	0,68	.45
	Lästigkeit	-.05	.42	0,29	.80

### 3.3.3 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass beide angewandten Verfahren sehr gut zwischen den verschiedenen Lärmschutzmaßnahmen differenzieren konnten. Die Effektstärken der entsprechenden Varianzanalysen lagen bei den Schallschutzfenstern um  $\eta^2 = .80$  und bei den Lärmschutzwänden um  $\eta^2 = .50$ . Grundsätzlich könnte man hier einwenden, dass eine Schallschutzmaßnahme ja den Pegel reduziert und es somit ein trivialer Befund ist, dass sich dadurch auch die empfundene Lautheit und Lästigkeit verringert. Zwischen den einzelnen Schallschutzmaßnahmen betragen die Pegeldifferenzen jedoch nur 4 dB(A), zwischen den Wandhöhen 3 dB(A). Die beurteilten Schalle bestanden in unterschiedlichen Lärmarten und variierten zudem im Pegel. Dennoch zeigte sich auch von einer Schallschutzklasse zur nächsthöheren bzw. von einer Wandhöhe zur nächsthöheren durchgehend ein signifikanter Unterschied im mittleren Urteil (siehe Tabelle 8 und 9).

Bezüglich der Art des Zusammenhangs zwischen dem Pegel des Lärms ( $L_{Aeq}$ ) und der empfundenen Lautheit bzw. Lästigkeit wurde bei der KU-Skalierung eine lineare Funktion erwartet. Dies traf sowohl für die Lautheits- als auch für die Lästigkeitsurteile zu. Die Varianzaufklärung des entsprechenden Regressionsmodells war für die Lautheit mit 97 Prozent fast perfekt. Für die Lästigkeit war die Varianzaufklärung mit 93 Prozent erwartungsgemäß geringer. Wenn man die interindividuelle Varianz der Urteile berücksichtigte, lag die Varianzaufklärung sowohl bei der Lautheit als auch bei der Lästigkeit noch bei über 50 Prozent. Somit lässt sich sehr gut ableiten, welche Pegelminderung für ein niedrigeres Kategorienurteil (z. B. von „leise“ zu „sehr leise“ oder von „mittelmäßig lästig“ zu „etwas lästig“) nötig ist: Bei der Lautheit sind dies etwa 14 dB(A) und bei der Lästigkeit etwa 16 dB(A). Bedenkt man, dass zwischen einzelnen Schallschutzklassen nur 4 dB(A) Unterschied im Dämmwert bestehen, folgt, dass erst eine Verbesserung von mehr als drei Schallschutzklassen (z. B. von II auf V) eine Veränderung um eine Kategorie des verbalen Kategorienurteils bewirkt. Natürlich ist zu beachten, dass diese Berechnungen auf Mittelwerten über verschiedene Lärmarten hinweg beruhen. Für einen genaueren Einblick wie es sich bei den einzelnen Lärmarten verhält, sei auf die entsprechenden Grafiken in Anhang 4.2 bis 4.5 verwiesen.

Beim Fraktionierungsverfahren sollte das Verhältnis der Lautheiten in Sone zwischen gedämmten- und Originallärm dem Urteil zur Restlautheit und Restlästigkeit entsprechen. Die vorhergesagte Restlautheit unterschätzte jedoch die empirisch ermittelte Restlautheit bzw. Restlästigkeit durchgehend. Die Pegelminderung für eine Halbierung der Lautheit lag bei 19 dB(A), für eine Halbierung der Lästigkeit bei 22 dB(A). Der Wert für die Lautheit ist also fast doppelt so hoch als es die 10-dB-Regel prognostiziert aber auch wesentlich höher als die Befunde von Namba und

Kuwano (1991) ergaben (14 dB bei einem Exponenten von .21). Eventuell hat hier aber auch die Verteilung der Stimulusintensitäten eine Rolle gespielt: Die vorhergesagte Restlautheit lag bei sämtlichen Auralisationen bei weniger als 35 Prozent. Gemäß der Range-Hypothese nach Parducci (1965, 1995) tendieren die Beurteiler dazu, die gesamte Bandbreite einer Beurteilungsskala zu nutzen und nicht nur die untersten 35 Prozent, wie es im konkreten Fall das Sone-Modell prognostizierte. Bei einer ausgewogeneren Verteilung der Stimuli mit vorhergesagten Restlautheiten von null bis 100 Prozent sollte daher die Unterschätzung der empirischen Restlautheit geringer ausfallen. Dementsprechend sollte sich auch die Pegeldifferenz für eine Halbierung der Lautheit reduzieren.

Bei den Urteilen zur Restlästigkeit im Fraktionierungsverfahren wurde die Lärmart als gewichtiger Einflussfaktor identifiziert. Einen „Malus“ erhielten hier (siehe Tabelle 10) der Lärm der Motorsense und der Kinderlärm, welcher sowohl in seiner singulären Form als auch im Zusammenwirken mit anderen Lärmarten hohe Urteile bezüglich seiner Restlästigkeit bekam.

Bezüglich des Einflusses personenbezogener Variablen auf die Lärmbewertung kann als wichtiges Ergebnis festgehalten werden: Die individuelle Lärmempfindlichkeit korreliert deutlich mit dem Lautheits- und Lästigkeitsurteil auf der KU-Skala, was im Einklang steht mit den bekannten Untersuchungsergebnissen zum Thema (Miedema & Vos, 1999; Schütte, Marks, Wenning & Griefahn, 2007; Van Kamp et al., 2004). Dass sich nur geringe Zusammenhänge der Lärmempfindlichkeit mit dem Urteil im Fraktionierungsverfahren zeigten, ist darauf zurückzuführen, dass hier das Urteil immer am Originallärm relativiert war.

### **3.4 Untersuchung 4: Sprachverständlichkeit unter Lärm**

In der Untersuchung wird Sprache zusammen mit dem auralisierten Lärm aus Untersuchung 3 dargeboten. Es wird geprüft, ob die gehörten Worte von den Teilnehmern richtig wiedergegeben werden können und es wird nach deren Höranstrengung gefragt. Kann die Verbesserung des Lärmschutzes (z. B. durch eine höhere Schallschutzklasse) auch eine spürbare Reduktion der Höranstrengung und der Wiedergabefehler bewirken? Diese Frage kann varianzanalytisch in der gleichen Weise betrachtet werden wie in der Untersuchung zur Bewertung von Lärmschutz (Untersuchung 3). Fokussiert wird auf die empfundene Höranstrengung und erst in zweiter Linie auf die Reproduktionsfehler. Die Resultate von Sust et al. (2009) und auch von Schepker et al. (2012) zeigen deutlich, dass in Testsituationen, in welchen die gehörten Sätze fehlerfrei wiedergegeben werden konnten, die Höranstrengung dennoch stark zwischen verschiedenen Signal-Rausch-Abständen differenzierte. Es interessiert, wie gut die empfundene Höranstrengung aus dem Signal-Rauschabstand bzw. aus dem AI und dem SIL vorhergesagt werden kann. Eine weitere Fragestellung ist die Abhängigkeit der empfundenen Höranstrengung von der Lärmempfindlichkeit. Der Fragebogen zur Lärmempfindlichkeit (Noise Sensitivity Questionnaire, NoiSeQ) von Schütte et al. (2007) beinhaltet hierzu die Subskala *Kommunikation*, welche mit den Urteilen zur Höranstrengung korreliert werden kann.

#### **3.4.1 Methode**

##### ***Versuchsteilnehmer***

30 Personen (16 Männer, 14 Frauen) nahmen an der Untersuchung teil. Das Alter der Teilnehmer lag zwischen 18 und 36 Jahren ( $Md = 22$ ). Die Teilnehmer wurden einem audiometrischen Screening im Frequenzbereich von 125 Hz bis 8 kHz unterzogen. Falls bei einer Frequenz die Hörschwelle mehr als 20 dB über der Schwelle Normalhörender lag, wurde die Person von der Untersuchung ausgeschlossen. Die Lärmempfindlichkeit der Teilnehmer wurde anhand der Subskala *Kommunikation* des NoiSeQ (Schütte, Marks, Wenning, & Griefahn, 2007) erhoben. Die Teilnahme wurde mit 8 €/h entlohnt.

### **Stimuli**

Die Lärmschalle sind identisch mit den auralisierten Schallen aus der Untersuchung zur Wirksamkeit von Lärmschutzmaßnahmen (Untersuchung 3). Die ungedämmten Schalle wurden aufgrund ihres im Vergleich zu den auralisierten Schallen wesentlich höheren Pegels nicht verwendet. Die Sprachschalle bestanden aus den Sätzen des HSM-Satztests (Hochmair-Desoyer, 1997). Insgesamt enthält der HSM-Test 600 deutsche Sätze, welche alle von derselben männlichen Person gesprochen werden. Die Sätze bestehen jeweils aus drei bis acht Wörtern.

Jeder auralisierte Lärm-Schall (insgesamt 117) wurde zusammen mit einem per Zufall ausgewähltem Satz aus dem HSM-Satztest dargeboten. Die Zufallsauswahl der Sätze erfolgte im Experiment nach dem Prinzip „Ziehen ohne Zurücklegen“. Ein Teilnehmer bekam also niemals den gleichen Satz wiederholt dargeboten. An welcher Stelle des 30-sekündigen Lärmausschnittes der im Schnitt nur etwa zwei Sekunden dauernde Satz eingespielt wurde, definierte die Versuchsteuerung per Zufall direkt vor der Darbietung des jeweiligen Lärmschalls. Der Pegel ( $L_{Aeq}$ ) der Sprachschalle betrug 33 dB, wenn diese mit Auralisationen von Schallschutzfenstern dargeboten wurden und 43 dB, wenn diese mit Auralisationen von Lärmschutzwänden dargeboten wurden. Die Festlegung der Sprachschall-Pegel erfolgte anhand von Voruntersuchungen: In diesen wurde der Signal-Geräuschabstand so eingestellt, dass die durchschnittliche Fehlerrate (Anzahl der falsch oder nicht verstandenen Wörter geteilt durch Gesamtzahl der dargebotenen Wörter) zwischen 2 und 5 Prozent lag. Der Signal-Geräusch-Abstand (SNR) ist in dieser Untersuchung definiert durch die Subtraktion des mittleren Lärmpegels vom mittleren Sprachpegel (beide Pegel in  $L_{Aeq}$ ).

### **Apparatus**

Es wurden die gleichen Geräte wie in Experiment 1 verwendet.

### **Ablauf**

Der Versuchsleiter las dem Probanden die Instruktion vor Beginn der eigentlichen Aufgabe vor (siehe Anhang A1.5). Es folgten zwei Übungstrials, in denen die Versuchsperson orientiert wurde. Dazu wurden die Sprache-Lärm-Kombinationen mit dem geringsten und dem höchsten SNR dargeboten. Anschließend erfolgte die Präsentation der 117 auralisierten Lärm-Schalle in randomisierter Reihenfolge. Wie bereits erwähnt, war die Position im Lärm an der der Sprachschall eingespielt wurde variabel. Es wurde auch nicht der gesamte 30-sekündige Lärm-Schall dargeboten, sondern nur der Ausschnitt, in welchem die Sprache zu hören war zusammen mit einer Vor- und Nachlaufzeit von jeweils zwei Sekunden. Nach der Darbietung sollte der Teilnehmer den gehörten Satz mündlich wiedergeben und einschätzen, wie stark er sich anstrengen musste, um den Satz zu verstehen. Hierzu stand eine Ratingskala zur Verfügung, welche von 1 = „überhaupt nicht anstrengend“ bis 9 = „äußerst stark anstrengend“ reichte. Neben diesen Ratings wurde vom Versuchsleiter auch die Fehlerrate dokumentiert. Als ein Fehler wurde gewertet, wenn ein Wort im Satz nicht richtig wiedergegeben wurde. Wenn lediglich die Position des Wortes im Satz vertauscht war, das Wort selbst jedoch richtig war, zählte dies nicht als Fehler. Zur Ermittlung der Fehlerrate wurde die Zahl der Fehler durch die Zahl der Wörter im Satz dividiert. Am Ende des Experiments war der Fragebogen zur Lärmempfindlichkeit auszufüllen. Der Versuch dauerte insgesamt etwa 60 Minuten.

## **3.4.2 Ergebnisse**

### *Varianzanalysen*

Varianzanalytisch wird der Einfluss des Faktors Schallschutzmaßnahme (vier Schallschutzklassen bzw. drei Lärmschutzwandhöhen) auf Höranstrengung und Reproduktionsfehler untersucht. Für die Lärmschutzwände und Schallschutzfenster wird jeweils eine eigene Varianzanalyse durchgeführt. Der Grund liegt darin, dass nicht bei jeder Lärmart eine Lärmschutzwand auralisiert

wurde und auch der Pegel der Sprache bei den Lärmschutzwänden höher lag als bei den Schallschutzfenstern. Im Anschluss an die Varianzanalysen werden Einzelvergleiche zwischen den verschiedenen Schallschutzklassen und Lärmschutzwandhöhen durchgeführt. Das Signifikanzniveau für die Einzelvergleiche wird stets nach Bonferroni korrigiert.

### *Höranstrengung*

Bezüglich der Höranstrengung in Abhängigkeit von Schallschutzklasse sind die Ergebnisse wie folgt: Der Faktor Schallschutzart ist hochsignifikant,  $F(3, 87) = 253,66$ ,  $p < 01$ ,  $\eta^2 = .89$ . Paarweise Einzelvergleiche der Schallschutzklassen zeigen durchgehend hochsignifikante Unterschiede zwischen allen Schallschutzklassen. In Abbildung 11 sind die entsprechenden Mittelwerte der Urteile dargestellt.

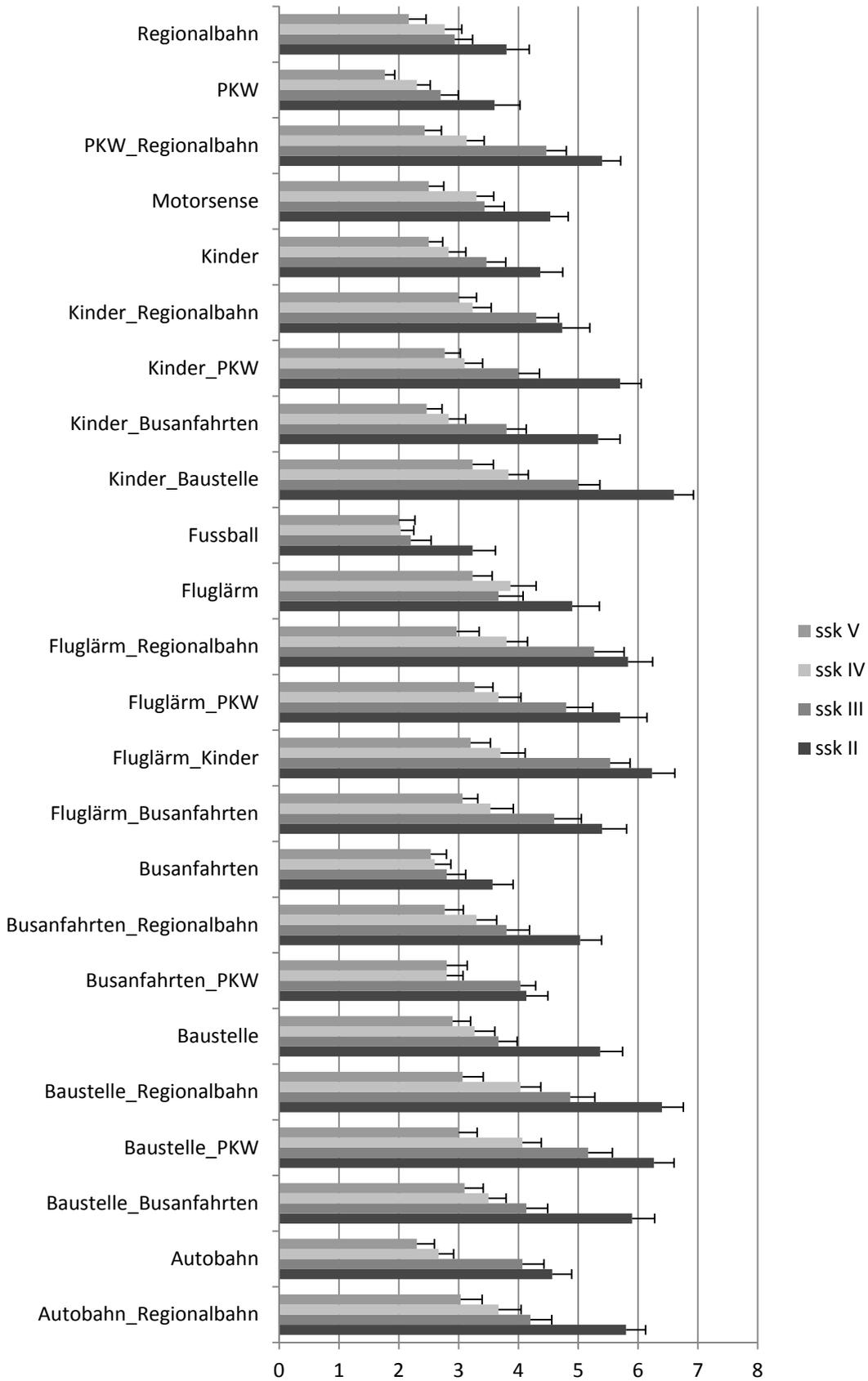
In Abbildung 11 ist gut erkennbar, dass die Höranstrengung steigt, je niedriger die Schallschutzklasse ist. Tendenziell sind die Differenzen zwischen der mittleren Höranstrengung bei niedrigeren Schallschutzklassen stärker ausgeprägt. So beträgt die Differenz zwischen Schallschutzklasse II und III im Mittel 1,06 Skalenpunkte, zwischen Schallschutzklasse III und IV 0,79 Skalenpunkte und zwischen Schallschutzklasse IV und V nur noch 0,49 Skalenpunkte.

Für die Lärmschutzwände zeigt sich folgendes Bild: Der Faktor Schallschutzart bzw. Lärmschutzwandhöhe ist hochsignifikant,  $F(2, 58) = 30,02$ ,  $p < 01$ ,  $\eta^2 = .51$ . Paarweise Einzelvergleiche zeigen hochsignifikante Unterschiede zwischen allen Wandhöhen. Abbildung 12 zeigt für die Lärmschutzwände die mittlere Fehlerrate in Abhängigkeit von Lärmart und Lärmschutzwandhöhe.

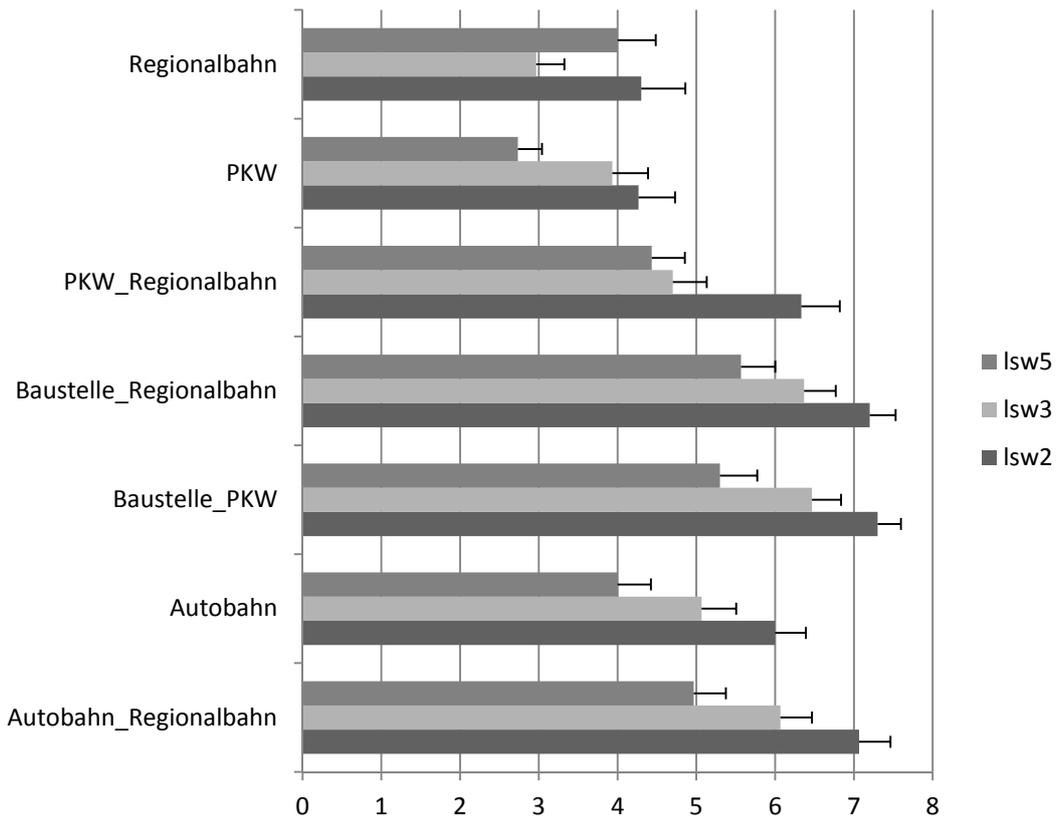
### *Fehlerraten*

Bezüglich der Fehlerraten zeigt sich ein hochsignifikanter Effekt des Faktors Schallschutzklasse,  $F(3, 87) = 25,89$ ,  $p < 01$ ,  $\eta^2 = .47$ . Paarweise Einzelvergleiche zeigen hochsignifikante Unterschiede zwischen Schallschutzklasse II und III,  $t(29) = 4,17$ ,  $p < .01$ , sowie zwischen Schallschutzklasse III und IV,  $t(29) = 3,75$ ,  $p < .01$ . Zwischen Schallschutzklasse IV und V finden sich keine signifikanten Differenzen.

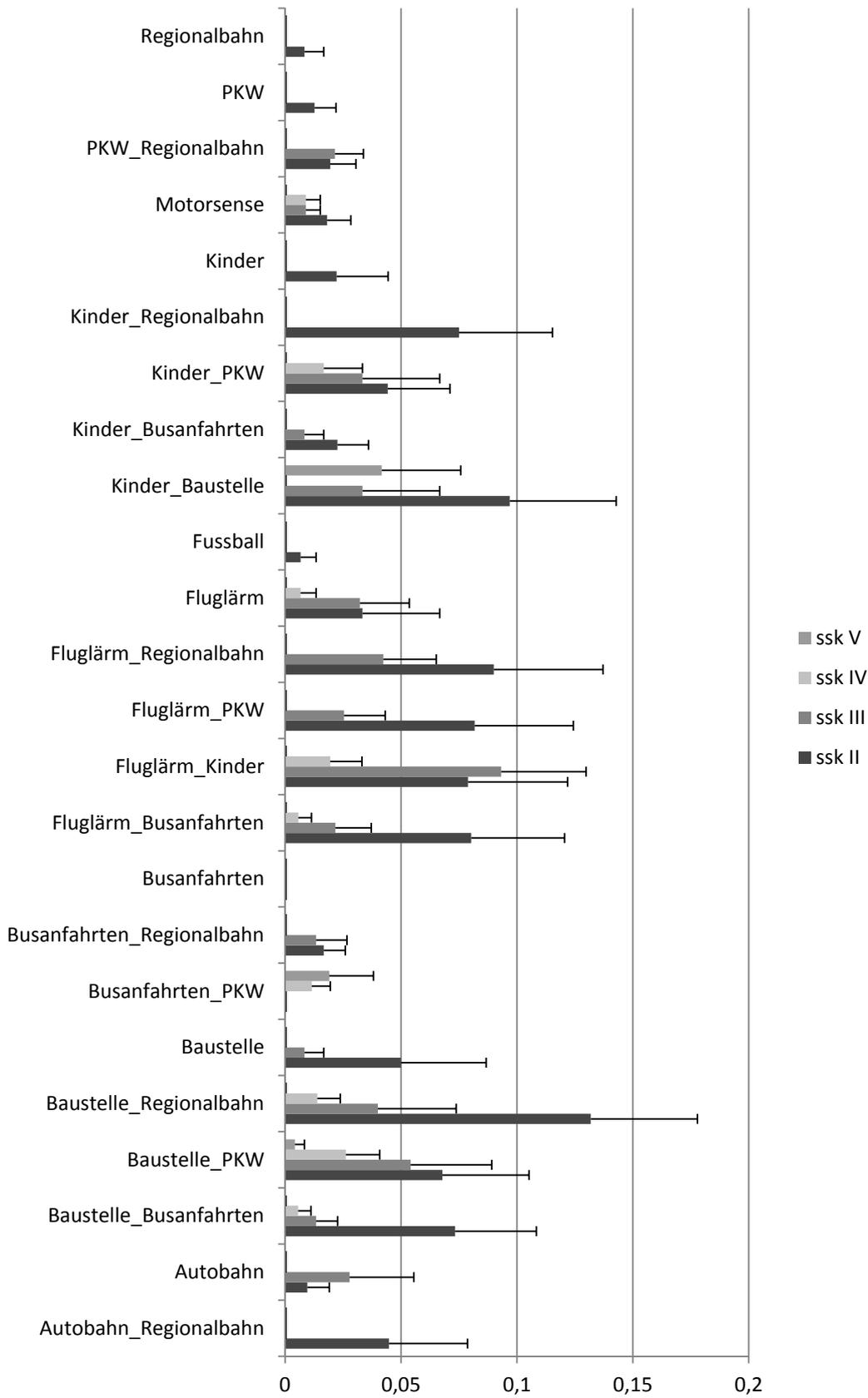
Für die Lärmschutzwände zeigt sich folgendes Bild: Wiederum ist der Faktor Schallschutzart bzw. Lärmschutzwandhöhe hochsignifikant,  $F(2, 58) = 16,17$ ,  $p < 01$ ,  $\eta^2 = .36$ . Paarweise Einzelvergleiche der Wandhöhen zeigen hochsignifikante Unterschiede zwischen zwei und drei Metern,  $t(29) = 3,71$ ,  $p < .01$  aber nicht zwischen drei und fünf Metern. Abbildung 13 zeigt für die Schallschutzfenster die mittlere Fehlerrate in Abhängigkeit von Lärmart und Schallschutzklasse. Abbildung 14 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für die Lärmschutzwände. In beiden Abbildungen ist gut erkennbar, dass die Fehlerrate steigt, je niedriger die Schallschutzklasse bzw. die Lärmschutzwandhöhe ist. Bei den Schallschutzklassen IV und V liegen die Fehlerraten bei den meisten Lärmarten bereits bei null Prozent.



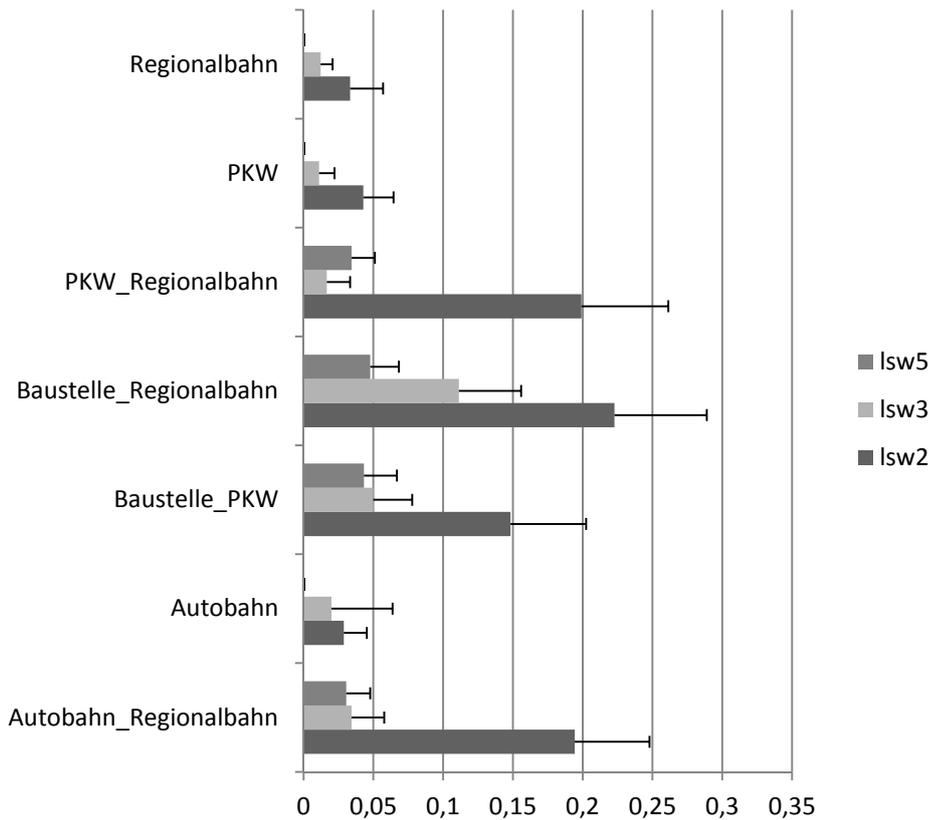
**Abbildung 11:** Mittlere Höranstrengung in Abhängigkeit von Schallschutzklasse und Lärmart mit Standardfehlern.



**Abbildung 12:** Mittlere Höranstrengung in Abhängigkeit von Lärmart und Lärmschutzwandhöhe (lsw<sub>x</sub> = Lärmschutzwand mit x-Metern Höhe) mit Standardfehlern.



**Abbildung 13:** Mittlere Fehlerrate in Abhängigkeit von Lärmart und Schallschutzklassen (ssk = Schallschutzklasse)



**Abbildung 14:** Mittlere Fehlerrate in Abhängigkeit von Lärmart und Lärmschutzwandhöhe (lsw = Lärmschutzwand mit 2/3/5-m- Höhe)

*Psychoakustische Prädiktoren für Höranstrengung und Fehlerraten im Sprachverständlichkeitstest*

Die experimentell ermittelten Werte für die Höranstrengung und die Fehlerraten im Sprachverständlichkeitstest wurden in Beziehung gesetzt zu den psychoakustischen Prädiktoren. Für alle Sprache-Lärm Kombinationen wurde der Signal-Geräuschabstand berechnet. Hierzu wurde der  $L_{Aeq}$  des Lärms vom  $L_{Aeq}$  der Sprache subtrahiert. Weiterhin wurde der Artikulationsindex(AI) und der Sprach-Störpegel (Speech Interference Level; SIL) für alle Lärm-Schalle berechnet. Die Korrelationen zwischen den psychoakustischen Größen und experimentell ermittelten Ergebnissen sind in Tabelle 12 dargestellt. Es wird deutlich, dass der Signal-Geräuschabstand die besten Vorhersagen für die empfundene *Höranstrengung* aber auch für die Fehlerraten liefert.

Tabelle 12

*Korrelationen der Mittelwerte für Höranstrengung und Fehlerraten mit Parametern der Sprachverständlichkeit*

Parameter der Sprachverständlichkeit	Höranstrengung	Fehlerrate
Artikulationsindex (AI) <sup>a</sup>	-.57	-.70
Sprach-Störpegel (SIL) <sup>a</sup>	.85	.57
Signal-Geräuschabstand (SNR)	-.91	.80

<sup>a</sup>Der Pegel des Sprachsignals unterschied sich, je nachdem ob die Auralisation einer Lärmschutzwand oder eines Schallschutzfensters präsentiert wurde. Der Einfluss dieses Unterschiedes wurde aus den Korrelationen des AI und SIL herauspartialisiert.

Im Anschluss wurde eine Regression vom SNR auf die mittlere Höranstrengung gerechnet. Die Regressionsgleichung lautet:

$$\text{Höranstrengung} = 3,53 - 0,20 \cdot \text{SNR}$$

Der Determinationskoeffizient beträgt  $r^2 = .82$ . Bei einem SNR von 0 liegt die Höranstrengung somit bereits im mittleren Bereich der Skala von eins bis neun. Für ein müheloses Verstehen (Höranstrengung = 1) ist ein SNR von mehr als +12,65 nötig, der Pegel der Sprache sollte also runde 13 dB(A) höher sein als der Pegel des Lärms.

#### *Einflüsse der Lärmempfindlichkeit*

Bezüglich der Lärmempfindlichkeit sind die Korrelationen zwischen Höranstrengung und Lärmempfindlichkeit gering. Die mittlere Höranstrengung der einzelnen Personen gemittelt über alle Schalle korreliert sogar negativ mit der Lärmempfindlichkeit auf der Subskala Kommunikation des NoiSeQ ( $r = -.22$ ). Die allgemeine Lärmempfindlichkeit, welche mit der Zustimmung zur Aussage: „Im allgemeinen bin ich eher lärmempfindlich“ erhoben wurde, korreliert in der erwarteten Richtung mit der Höranstrengung, jedoch in einem sehr niedrigem Ausmaß ( $r = .03$ ).

### **3.4.3 Diskussion**

Die empfundene Höranstrengung unter Hintergrundlärm differenzierte in der Untersuchung sehr gut zwischen den verschiedenen Schallschutzmaßnahmen. Die entsprechenden Effektstärken lagen bei .50 und darüber. Eine Verminderung des Hintergrundlärms durch eine höhere Schallschutzklasse oder eine höhere Lärmschutzwand reduzierte die Höranstrengung signifikant. Bei den Fehlerraten waren die entsprechenden Effekte erwartungsgemäß geringer, da die Signal-Geräuschabstände so gewählt wurden, dass die Fehlerrate generell sehr niedrig (um 5 Prozent) lag. Ab einer bestimmten Effizienz des Schallschutzes (Schallschutzfenster ab Klasse IV und Lärmschutzwände ab 3 Meter Höhe) tendierte die Fehlerrate daher gegen null und somit zeigten sich hier keine Effekte mehr. Zur Vorhersage der Höranstrengung erwies sich der Signal-Rausch-Abstand (SNR) den anderen Sprachverständlichkeitsindizes (AI und SIL) als überlegen.

## **4 Zusammenfassung und Fazit**

Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen hier gegliedert nach drei Fragekomplexen (siehe auch Abschnitt: Empirische Fragestellungen) zusammengefasst werden. Der erste Fragenkomplex thematisierte Einflussfaktoren der Belästigung und Gesamtlärm, der zweite Komplex die Veränderung der Lärmbewertung infolge von Schallschutzmaßnahmen und der dritte Komplex Kommunikationsbeeinträchtigungen als eine gravierende Lärmwirkung.

#### *Fragenkomplex 1: Einflussfaktoren von Lästigkeit und Gesamtlärm*

Untersuchung 1 und 2 behandelten diese Thematik. Untersuchung 1 sollte zunächst Beschreibungsattribute von Umweltlärm eruieren. Hierzu wurden Paarvergleiche zwischen verschiedenen Lärmarten bzgl. ihrer Lästigkeit durchgeführt. Die Versuchsteilnehmer wurden gefragt, warum ihnen eine Lärmart lästiger erschien als eine andere. Aus den ermittelten Attributen wurden gemäß der Anzahl ihrer Nennungen und der semantischen Ähnlichkeit der Begriffe folgende acht repräsentative Attribute destilliert: ungleichmäßig, vielfältig, unvorhersehbar, penetrant, hoch, schrill, ablenkend und laut. In der zweiten Untersuchung wurden aus diesen Attributen Gegensatzpaare hergestellt (z. B. unvorhersehbar – vorhersehbar) und so semantische

Differenziale aufgespannt. Zehn unterschiedliche Lärmquellen wurden sowohl in singulärer als auch in zusammengesetzter Form (insgesamt 26 Lärmkombinationen) auf diesen semantischen Differenzialen skaliert. Mittels Faktorenanalyse konnten drei unabhängige Beschreibungsdimensionen des Umweltlärms gefunden werden, welche mit „Glattheit“, „Aufdringlichkeit“ und „Schärfe“ benannt wurden. Die Lästigkeit des Lärms konnte jedoch fast vollständig aus dem Faktor Aufdringlichkeit, welcher die Attribute laut, penetrant und ablenkend subsummiert, abgeleitet werden. Dies macht deutlich, dass bestimmte, vom Pegel unabhängige Eigenschaften des Lärms, wie seine Unregelmäßigkeit oder ein ausgeprägter Anteil an hohen Frequenzen, durchaus ausschlaggebend für eine höhere Lästigkeit sein können. Dies wird vor allem dann deutlich, wenn zwei verschiedene Lärmarten mit ähnlichem Pegel direkt miteinander verglichen werden. In der untersuchten Auswahl an Lärmszenarien, welche eine relativ hohe Bandbreite an unterschiedlichen Pegeln, kamen diese Merkmale jedoch kaum mehr zur Geltung. Hier war letztlich die Lautstärke des Lärms der dominante Faktor. Ausnahmen bildeten der Lärm der Motorsense und in geringerem Ausmaß auch der Kinderlärm. Diese Lärmarten werden vorrangig als schrill und hoch empfunden und sie weisen auch die im Stimulus-Set höchsten Ausprägungen des psychoakustischen Parameters Schärfe auf, der Kinderlärm mit 2,57 acum, die Motorsense mit 3,40 acum (siehe Anhang A2.1). Eine stärkere Einbeziehung von Lärmarten mit ausgeprägten hohen Frequenzanteilen, z. B. Kreissägen, Bandschleifer etc., würde dem Faktor „Schärfe“ vermutlich ein stärkeres Gewicht geben.

Ein zentrales Thema der zweiten Untersuchung war die Gesamtlärmproblematik. Zwei in der Literatur diskutierte Modelle wurden bezüglich ihrer Vorhersagekraft für die Lästigkeit von kombinierten Lärm verglichen: Das Energie-Summations-Modell schlägt diesbezüglich als Prädiktor den Summenpegel der einzelnen Lärmbestandteile vor, das Dominanzmodell hingegen die Lästigkeit der dominanten Quelle. Das Dominanzmodell erwies sich in seiner Vorhersagekraft als deutlich überlegen, wenn über alle Personen gemittelte Lästigkeitsurteile als Kriterium dienen. Bei der Betrachtung der individuellen Zusammenhänge fiel diese Überlegenheit weit geringer aus. Zudem zeigte sich, dass das Lästigkeitsurteil für den kombinierten Lärm konstant höher war, als das Urteil für die dominante Quelle. Für den Gesamtlärmeindruck ist somit zwar die dominante Lärmquelle der wichtigste Faktor. Weitere (nicht-dominante) Lärmquellen tragen aber ebenfalls zum Gesamtlärmeindruck bei. Der Gesamtlärm hinterlässt also immer einen stärkeren Eindruck als die einzelnen Lärmquellen.

### *Fragenkomplex 2: Veränderung der Lärmbeurteilung durch Lärmschutzmaßnahmen*

Diesen Fragenkomplex behandelte Untersuchung 3. Es wurden einzelne und kombinierte Lärmquellen sowohl in ihrer Originalversion als auch gedämmt durch Schallschutzfenster und Lärmschutzwände beurteilt. Auralisiert wurden Lärmschutzwände mit zwei, drei und fünf Metern Höhe sowie Schallschutzfenster der Klassen II bis V. Die Beurteilungsdimensionen waren Lästigkeit und Lautheit des Lärms. Es wurde ein zweiteiliger Untersuchungsansatz gewählt: Zum einen sollten anhand von Kategorienunterteilungsskalen (KU-Skalierung) absolute Urteile über die Lästigkeit und Lautheit der verschiedenen gedämmten und ungedämmten Lärmarten abgegeben werden. Zum anderen wurde im Fraktionierungsverfahren die relative Änderung von Lästigkeit und Lautheit durch den Lärmschutz bewertet im Sinne von: Um wie viel leiser/weniger lästig ist der gedämmte Lärm im Vergleich zum ungedämmten Lärm? Insgesamt 60 Personen im Alter von 19 – 72 Jahren nahmen an Untersuchung 3 teil. In diesem Experiment wurde auch der Einfluss des Alters untersucht. In beiden Skalierungsverfahren differenzierten die Urteile sehr gut zwischen den einzelnen Schallschutzklassen und Lärmschutzwandhöhen. Die Effektstärken der jeweiligen Varianzanalysen waren sehr hoch und lagen in etwa bei  $\eta^2 = .80$ . Im Anschluss an die Varianzanalysen wurden bei beiden Verfahren die psychophysischen Funktionen untersucht. Die Urteile auf den KU-Skalen standen in sehr engem linearen Zusammenhang zum Pegel ( $L_{Aeq}$ ) des Lärms (Lautheit:  $r^2 = .97$ ; Lästigkeit:  $r^2 = .93$ ). Entsprechend dem Regressionsmodell entspräche Lärm mit einem  $L_{eq}$  um ca. 30 dB(A) der Kategorie „leise“, ein  $L_{eq}$  um ca. 45 dB(A) der Kategorie „mittellaut“, ein  $L_{eq}$  um ca. 60 dB(A) der Kategorie „laut“ und ein  $L_{eq}$  um ca. 75 dB(A) der Kategorie „sehr laut“. Für die Praxis der Lärminderung bedeutet dies, dass eine Schallpegelabsenkung von

rund 15 dB(A) notwendig ist, um die empfundene Lautstärke des Geräuschs um eine Lautstärkenkategorie zu reduzieren. In Bezug auf die Frage: „Wie belästigt fühlen Sie sich durch diesen Lärm?“ entsprächen Geräusche um ca. 22 dB(A) dem Urteil „etwas lästig“, Geräusche um ca. 38 dB(A) dem Urteil „mittelmäßig lästig“, Geräusche um ca. 54 dB(A) dem Urteil „stark lästig“ und Geräusche ab ca. 70 dB(A) dem Urteil „äußerst lästig“. Für eine Reduktion des Lästigkeitsurteils um eine Kategorie ist somit eine Dämmung um ca. 16 dB(A) erforderlich.

Im Fraktionierungsverfahren wurde geprüft, ob das Verhältnis der Sone-Werte zwischen gedämmten und ungedämmten Lärm den tatsächlichen Verhältnisurteilen entsprach. Im Ergebnis unterschätzte die anhand der Sone-Werte prognostizierte Restlautheit die tatsächliche, empirische Restlautheit und -lästigkeit deutlich um etwa 10 bis 20 Prozent. Folglich erwies sich eine Pegelminderung um 10 Dezibel als nicht ausreichend, um eine Halbierung der Lautheit oder auch der Lästigkeit hervorzurufen. Für die Lautheitshalbierung ergaben sich im Experiment 19 dB(A), für die Lästigkeitshalbierung 22 dB(A). Diskutiert wurde, ob diese sehr große Abweichung von der 10-dB-Regel teilweise auch durch die Verteilung der Stimuli bedingt war: Da alle Stimuli eine vorhergesagte Restlautheit von weniger als einem Drittel des Originallärms aufwiesen, die Beurteiler jedoch laut dem Range-Effekt dazu neigen, den gesamten verfügbaren Skalenbereich zu nutzen, könnten die Urteile tendenziell in den oberen freien Skalenbereich (von 33 – 100 Prozent Restlautheit) verschoben worden sein. Es ist daher zu vermuten, dass bei einer repräsentativeren Auswahl der Reize und einer besseren Passung von Reizmenge und Urteilsmenge die Abweichung von der 10-dB-Regel geringer ausfällt.

Es zeigten sich nur geringe Zusammenhänge (Korrelationskoeffizienten bis .30) zwischen dem Alter der Probanden und der Höhe der Urteile. Bis auf die Kategoriallautheit waren die Zusammenhänge sogar negativ, ein höheres Alter ging also tendenziell mit niedrigeren Urteilen einher. Verallgemeinerbare Aussagen über Alterseffekte bei der Lärmbeurteilung können aus den durchgeführten Untersuchungen ohnehin nicht abgeleitet werden. Dazu waren die Stichproben zu klein (Jeweils 30 Probanden bei den beiden Skalierungsmethoden). Für die KU-Skalierung ergab sich ein deutlicher Einfluss der Lärmempfindlichkeit auf die Urteile ( $r = .54$  bei der Lautheit;  $r = .42$  bei der Lästigkeit). Geschlechtereffekte konnten nicht festgestellt werden.

### *Fragenkomplex 3: Sprachverständlichkeit unter Lärm*

Die letzte Untersuchung beschäftigte sich schließlich mit der Sprachverständlichkeit unter Lärm. Die auralisierten gedämmten Schalle wurden zusammen mit gesprochenen Sätzen aus einem Sprachverständlichkeitstest präsentiert. Zwischen den einzelnen Schallschutzklassen und Lärmschutzwandhöhen ergaben sich durchgehend signifikante Unterschiede in der empfundenen Höranstrengung. Bei den Schallschutzfenstern zeigte sich, dass bei den höchsten Schallschutzklassen nur noch leichte Verbesserungen bei der Höranstrengung erzielt werden können. Der Signal-Rausch-Abstand (SNR) erwies sich als sehr guter Prädiktor für die Höranstrengung ( $r = .91$ ). Für ein müheloses Verstehen (Höranstrengungsurteil: „überhaupt nicht anstrengend“) zeigte sich, dass die Schalldämmmaßnahme den Lärmpegel mindestens so weit senken sollte, dass der Sprachpegel um 13 dB(A) über dem Lärmpegel liegt.

### *Fazit*

Insgesamt sprechen die Ergebnisse für ein eher „konservatives“ Vorgehen bei der Lärmbewertung. Geht es um die Lästigkeit, ist die Lautheit des Lärms mit Abstand der wichtigste Prädiktor. Bei der Motorsense und dem Kinderlärm spielt der ausgeprägte Anteil an hohen Frequenzen (Schärfe) eine zusätzliche Rolle. Bezüglich der Beurteilung des Gesamtlärms zeigte sich, dass einer dominanten Lärmquelle nicht bedenkenlos eine weniger lästige weitere Lärmquelle hinzugefügt werden kann. Der Gesamtlärm hinterlässt immer einen stärkeren Eindruck als die einzelnen Lärmquellen für sich. Daraus lässt sich folgern, dass auch die Elimination oder Abschwächung jeder einzelnen Lärmquelle die Gesamtlärmsituation verbessert. Die Elimination oder Abschwächung der dominanten Lärmquelle würde jedoch die Gesamtlärmsituation am meisten verbessern.

Hinsichtlich des empfundenen Ausmaßes von Lärminderung, zeigten alle eingesetzten Verfahren signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Schallschutzarten; sowohl das Fraktionierungsverfahren ebenso wie die KU-Skala und die Skala zur Beurteilung der Höranstrengung. Das Mittel der Wahl zur Beurteilung von Lärminderung ist dennoch die KU-Skala: Die Urteile haben einen engen, linearen Bezug zum Lärmpegel ( $L_{Aeq}$ ) und weisen eine weit geringere interindividuelle Varianz auf als die Urteile im Fraktionierungsverfahren. Urteilsänderungen durch Lärmschutz sind gut aus der Höhe der entsprechenden Pegelminderung prognostizierbar. Aufgrund der verbalen Kategorienbezeichnungen der KU-Skalen sind die subjektiven Urteile auch dem Laien gut kommunizierbar.

Die Ergebnisse des Fraktionierungsverfahrens zeigen, dass das Sone-Modell die verbleibende Lautheit und Lästigkeit hinter der jeweiligen Lärmschutzmaßnahme unterschätzt. Auch wenn man berücksichtigt, dass die Größenschätzungen generell eine sehr hohe interindividuelle Varianz aufwiesen, war die Abweichung von der durch das Sone-Modell vorhergesagten Restlautheit systematisch: Die tatsächliche Restlautheit und Restlästigkeit lag signifikant höher als die vorhergesagten Werte. Somit ist die häufig zitierte Daumenregel, nach der eine Reduktion von 10 Dezibel eine Halbierung der Lautheit bewirkt, nicht auf Lärmschutz anwendbar. Die entsprechende Pegelminderung muss höher angesetzt werden, wobei der hier ermittelte Wert von 19 Dezibel auch die Ergebnisse von Kuwano und Namba (1991) für Umweltlärm und Fastl und Zwicker (2007) für Breitbandrauschen (jeweils etwa 13 - 14 dB Minderung für eine Lautheitshalbierung) noch deutlich übertrifft. Dies könnte aber auch versuchstechnisch (mit-)bedingt sein. Es ist daher zu prüfen, ob eine repräsentativere und gleichmäßigere Verteilung der Stimuli auf der Fraktionierungsskala (Einbeziehen von weniger stark gedämmten Schallen) zu einer größeren Übereinstimmung mit den zitierten Befunden führt. Generell sollte die ökologische Validität der Befunde untersucht werden. Dies könnte im Feld durch Befragungen vor und nach der Installation von (realem) Lärmschutz geschehen. Damit könnte geprüft werden, ob auch hier mittels der KU-Skala robuste Dosis-Wirkungsbeziehungen erstellt werden können und ob auch hier mehr als 10 dB Reduktion für eine Halbierung der empfundenen Lautheit und Lästigkeit anzusetzen sind.

## 5 Literaturverzeichnis

- Aures, W. (1984). *Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale. Ein Beitrag zur gehörbezogenen Schallanalyse* (Dissertation). Technische Universität München, München.
- Bayazit, N. T., San, B., Kose, S., Bicer, S., Buyukgoz, A. & Celik, B. D., et al. (2009). Assessment of noise Annoyance in schools due to aircraft noise. In Institute of Noise Control Engineering of the USA (Ed.). *Proceedings of inter-noise 2009* (p. 112)
- Beranek, L. L. (1947). The Design of Speech Communication Systems. In *Proceedings of the Institution of Radio and Electrical Engineers* (pp. 880–890).
- Blauert, J. (1997). Sound-quality evaluation - a multi-layered problem. *Acta Acustica united with Acustica*, 83, 747–753.
- Bortz, J. (2005). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Heidelberg: Springer.
- Bortz, J., & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. Heidelberg: Springer.
- Botteldooren, D., Dekoninck, L., Greve, B. de, Coensel, B. de, & Lercher, P. (2007). Annoyance by combined exposure to noise from road traffic and rail traffic discussed in the framework of the noticing model. In Sociedad Española de Acústica (Ed.). *Proceedings of the International Congress of Acoustics*.
- Cik, M. (2009). Traffic noise annoyance on road and rail (TNAR) in an experimental laboratory setup. In NAG/DAGA (Ed.). *International Conference on Acoustics, Rotterdam*. NAG: Rotterdam.
- Cohen, J. (1992). A Power Primer. *Psychological Bulletin*, 112, 155-159.
- Cohen, J., Cohen, P., West, S. G., & Aiken, L. S. (2002). *Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates Inc.
- Diehl, J. M., & Staufenbiel, T. (2002). *Statistik mit SPSS Version 10 + 11*. Eschborn: Klotz.
- Fastl, H. (1976). Masking patterns of subcritical vs. critical band maskers at 8.5 kHz. *Acustica*, 34, 167–171.
- Fastl, H. (1992). Subjective and physical evaluation of noise immissions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 91, 2357.
- Fastl, H. (1999). Psychoacoustic evaluation of noise emissions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105, 1082.
- Fastl, H., Filippou, T., Schmid, W., Kuwano, S., & Namba, S. (1998). Psychoakustische Beurteilung von Geräuschimmissionen verschiedener Verkehrsträger: Psychoacoustic evaluation of noise immission from rail-noise, road-noise, and aircraft-noise. *Fortschritte der Akustik - DAGA '98*, 70–71.
- Fastl, H., & Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics*: Berlin: Springer.
- Felscher-Suhr, U., & Höger, R. (2002). Wird die Wirksamkeit von Schallschutzmaßnahmen durch nicht-akustische Faktoren beeinflusst? In U. Jekosch (Ed.), *Fortschritte der Akustik, DAGA 2002. Plenarvorträge und Fachbeiträge der 28. Deutschen Jahrestagung für Akustik DAGA '02, Bochum* (pp. 78–79). Oldenburg: Deutsche Gesellschaft für Akustik.
- Felscher-Suhr, U., & Schreckenberger, D. (2000). Beeinflussung der Wirksamkeit von Schallschutzmaßnahmen durch visuelle und psychologische Faktoren. In DEGA e.V. (Ed.), *Fortschritte der Akustik - DAGA 2000* (pp. 530–531). Oldenburg: Dt. Ges. für Akustik.
- Fidell, S., Barber, D. S., & Schulz, T. (1991). Updating a dosage-effect relationship for the prevalence of annoyance due to general transportation noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 89, 221–233.
- Fields, J. (1993). Effect of personal and situational variables on noise annoyance in residential areas. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93, 2753–2763.
- Fletcher, H., & Munson, W. A. (1933). Loudness, its definition, measurement and calculation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 5, 82–108.

- Genuit, K. (Ed.). (2010). *Sound-Engineering im Automobilbereich: Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen*. Heidelberg: Springer.
- Gescheider, G. A. (1997). *Psychophysics: The fundamentals*. Mahwah: Erlbaum.
- Griefahn, B. (2002). Sleep disturbances related to environmental noise. *Noise & Health, 14*(4), 57–60.
- Griffiths, I. D., & Raw, G. J. (1987). Community and Individual Response to Changes in Traffic Noise Exposure. In H. S. Koelega (Ed.). *Environmental Annoyance. Characterization, Measurement, and Control* (pp. 333–343). Amsterdam: Elsevier.
- Guski, R. (1991). Lärmwirkungen aus ökologischer Perspektive. In Deutsche Physikalische Gesellschaft (Ed.), *Fortschritte der Akustik - DAGA '91* (pp. 53–74). Bad Honnef: DPG.
- Guski, R. (1999). Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise & Health, 1*(3), 45–56.
- Guski, R. (2002). Status, Tendenzen und Desiderate der Lärmwirkungsforschung zu Beginn des 21. Jahrhunderts. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 49*(6), 219–232.
- Guski, R., & Bosshardt, H. G. (1992). Gibt es eine "unbeeinflusste" Lästigkeit. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 39*(3), 67–74.
- Guski, R., Felscher-Suhr, U., & Schuemer, R. (1999). The concept of noise annoyance: How international experts see it. *Journal of Sound and Vibration, 223*(4), 513–527.
- Hair, J. F., Black, B., & Babin, B. (2006). *Multivariate data analysis*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Hellbrück, J. (1987). On the loudness of non-steady state sounds measured with magnitude estimation and category scaling: A comparison between Japanese and German results. In *3rd Meeting of the International Society of Psychophysics*. Durham, NH.
- Hellbrück, J. (1991). Loudness scaling: Ratio scales, rating scales, intersubject variability, and some other problems. In *Contributions to Psychological Acoustics V. Results of the Fifth Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics* (pp. 119–133). Oldenburg: BIS.
- Hellbrück, J. (1996). Category-subdivision scaling - a powerful tool in audiometry and noise assessment. In H. Fastl, S. Kuwano, & A. Schick (Eds.), *Recent trends in hearing research. Festschrift für Seiichiro Namba*. Oldenburg: BIS.
- Hellbrück, J., Guski, R., & Schick, A. (2009). Schall und Lärm. In V. Linneweber, E. Lantermann, & E. Kals (Eds.), *Enzyklopädie der Psychologie: Vol. 2. Umweltpsychologie*. Göttingen: Hogrefe.
- Hellbrück, J., & Heller, O. (1981). Wie zuverlässig und valide ist die Lautheit? In A. Schick (Ed.), *Akustik zwischen Physik und Physiologie* (pp. 141–148). Stuttgart: Klett-Kotta.
- Hellbrück, J., Zeitler, A. & Gold, M. (1996). Direct loudness scaling of traffic noise in natural settings. *Proceedings of Inter-Noise '96*, Liverpool, U.K.
- Hochmair-Desoyer, I. J., Schulz E., Moser L. M., & Schmidt M. (1997). The HSM sentence test as a tool for evaluating the speech understanding in noise of cochlear implant users. *American Journal of Otology, 18*(6 suppl), 83.
- Hofstätter, P. R. (1977). *Persönlichkeitsforschung*. Stuttgart: Kröner.
- Job, R. F. S. (1988). Community response to noise: A review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction. *Journal of the Acoustical Society of America, 83*(3), 991–1001.
- Job, R. F. S. (1999). Noise sensitivity as a factor influencing human reaction to noise. *Noise & Health, 1*(3), 57–68.
- Johnson, C. E. (2000). Children's phoneme identification in reverberation and noise. *Journal of Speech, Language and Hearing Research, 43*, 144–157.
- Joynt, J. L. R., & Kang, J. (2010). The influence of preconceptions on perceived sound reduction by environmental noise barriers. *Science of the Total Environment, 408*(20), 4368–4375.
- Kastka, J. (1981). Untersuchungen zur subjektiven Wirksamkeit von Maßnahmen gegen Verkehrslärm und deren Moderation durch nicht-akustische Faktoren. In H. Haase, & W. Mohlt

- (Eds.), *Vol. 3. Handbuch der angewandten Psychologie* (pp. 468–485). Landsberg: Verlag Moderne Industrie.
- Kastka, J., Buchta, E., Ritterstaedt, U., Paulsen, R., & Mau, U. (1995). The Long Term Effect of Noise Protection Barriers on the Annoyance Response of Residents. *Journal of Sound and Vibration*, 184(5), 823–852.
- Kendall, M., & Gibbons, J. D. (1990). *Rank correlation methods*. New York: Oxford Univ. Press.
- Klatte, M., Hellbrück, J., Seidel, J., & Leistner, P. (2010). Effects of Classroom Acoustics on Performance and Well-Being in Elementary School Children: A Field Study. *Environment and Behavior*, 42(5), 659–692.
- Kloepfer, M. et al. (2006). *Leben mit Lärm?: Risikobeurteilung und Regulation des Umgebungslärms im Verkehrsbereich. Wissenschaftsethik und Technikfolgenbeurteilung: Vol. 28*. Berlin: Springer.
- Ko, J. H., Chang, S. I., & Kim, K. M. (2009). Study on the Quantitative Assessment Model in the Area Exposed by the Combined Noise due to Road Traffic and Railway. In Institute of Noise Control Engineering of the USA (Ed.). *Proceedings of inter-noise 2009* (p. 112).
- Kryter, K. (1985). *The effects of noise on man*. Orlando: Academic Press.
- Kuhnt, S., Schürmann, C., Schütte, M., Wenning, E., Griefhahn, B., & Vormann, M., et al. (2008). Modelling Annoyance from Combined Traffic Noises: An Experimental Study. *Acta Acustica united with Acustica*, 94, 393–400.
- Kuwano, S. (2007a). Psychological Evaluation of Environmental Noise from the Viewpoint of Temporal Aspects. In S. Kuwano (Ed.). *Recent Topics in Environmental Psychoacoustics* (pp. 33–62). Osaka: Osaka University Press.
- Kuwano, S. (2007b). Psychological Evaluation of Sound Environment along Temporal Stream. In Sociedad Española de Acústica (Ed.). *Proceedings of the International Congress of Acoustics*
- Kuwano, S., & Namba, S. (1985). Continuous judgement of level-fluctuating sounds and the relationship between overall loudness and instantaneous loudness. *Psychological Research*, 47, 27–37.
- Kuwano, S., & Namba, S. (2010). Loudness of Non-Steady-State Sounds. In M. Florentine, A. N. Popper, & R. R. Fay (Eds.), *Loudness* (pp. 145–168). New York: Springer.
- Kuwano, S., Namba, S., Florentine, M., Da Rui, Z., Fastl, H., & Schick, A. (1999). A cross-cultural study of the factors of sound quality of environmental noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105, 1081.
- Kuwano, S. & Namba S. & Miura H. (1989). Advantages and disadvantages of A-weighted sound pressure level in relation to subjective impression of environmental noises. *Noise Control Engineering Journal*, 33, 107–115.
- Lazarus, H. (2007). *Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation*. Berlin: Springer.
- Martín, M. A., Tarrero, A., González, J., & Machimbarrena, M. (2006). Exposure-effect relationships between road traffic noise annoyance and noise cost valuations in Valladolid, Spain. *Applied Acoustics*, 67(10), 945–958.
- Maue, J. H. (2009). *0 Dezibel + 0 Dezibel = 3 Dezibel: Einführung in die Grundbegriffe und die quantitative Erfassung des Lärms*. Berlin: Schmidt.
- McGuire, S., & Davies, P. (2009). A Semantic Differential Study on the Response to Transportation Noise. In Institute of Noise Control Engineering of the USA (Ed.). *Proceedings of inter-noise 2009*.
- Miedema, H. M. (1987). Annoyance from combined noise sources. In H. S. Koelega (Ed.). *Environmental Annoyance. Characterization, Measurement, and Control* (pp. 313–320). Amsterdam: Elsevier.
- Miedema, H. M. (2007). Adverse Effects of Traffic Noise. In T. Garling & L. Steg (Eds.), *Threats from Car Traffic to the Quality of Urban Life: Problems, Causes, Solutions*. Emerald Group Publishing Limited.

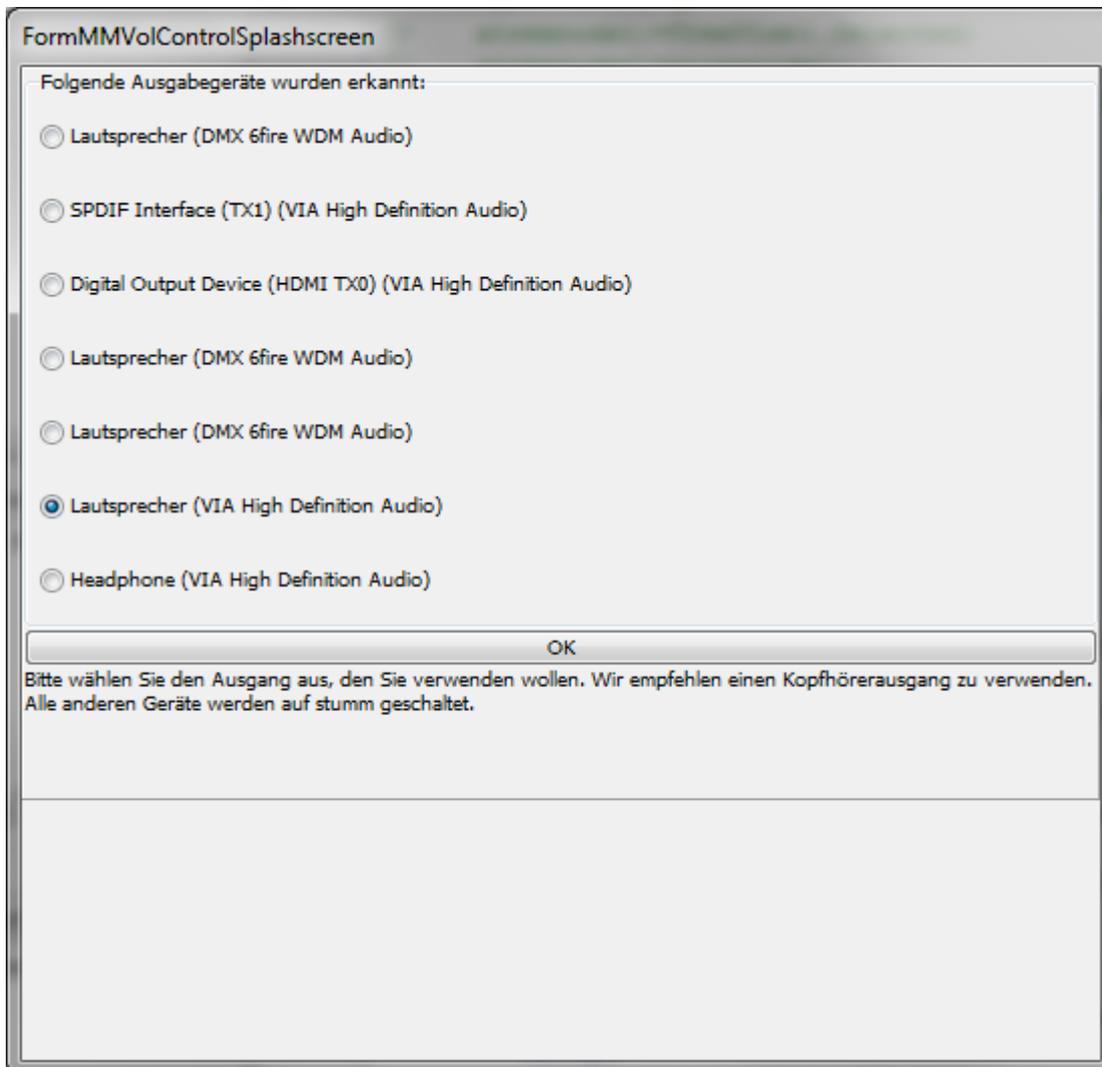
- Miedema, H. M. (2004). Relationship between exposure to multiple noise sources and noise annoyance. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116(2), 949–957.
- Miedema, H. M., & Oudshoorn, C. G. M. (2001). Annoyance from Transportation Noise: Relationships with Exposure Metrics DNL and DENL and their Confidence Intervals. *Environmental Health Perspectives*, 109(4), 409–416.
- Miedema, H. M., & Vos, H. (1998). Exposure-response relationships for transportation noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 104, 3432–3445.
- Miedema, H. M. E., & Vos, H. (1999). Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transportation noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105(6), 3336–3344.
- Miedema, H. M., & Vos, H. (2004). Noise Annoyance from stationary sources: Relationships with exposure metric day-evening-night level (DENL) and their confidence intervals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116(1), 334–343.
- Möhler, U., Liepert, M., Schuemer, R., Schuemer-Kohrs, A., Schreckenber, D., & Mehnert P., et al. (2000). Vergleichende Untersuchung über die Lärmwirkung bei Straßen- und Schienenverkehr. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 47(4), 144–151.
- Namba, S. (1996). Noise Quality. In H. Fastl, S. Kuwano, & A. Schick (Eds.), *Recent trends in hearing research. Festschrift für Seiichiro Namba* (pp. 1–27). Oldenburg: BIS.
- Namba, S., & Kuwano, S. (1984). Psychological study on Leq as a measure of loudness of various kinds of noises. *Journal of the Acoustical Society of Japan*, 5(3), 135–148.
- Namba, S., & Kuwano, S. (1991). The Loudness of Non-steady State Sounds: Is a Ratio Scale Applicable. In S. J. Bolanowski (Ed.), *Ratio scaling of psychological magnitude. In honor of the memory of S. S. Stevens* (p. 229245). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Assoc.
- Namba, S., & Kuwano, S. (2004). Environmental Acoustics: Psychological assessment of noise. In J. G. Neuhoff (Ed.), *Ecological Psychoacoustics* (pp. 175–190). London: Elsevier.
- Neuman, A. C., Wroblewski, M., Hajicek, J., & Rubinstein, A. (2010). Combined effects of noise and reverberation on speech recognition performance of normal-hearing children and adults. *Ear & Hearing*, 31(3), 336–344.
- Nilsson, M. E. (2007). A-weighted sound pressure level as an indicator of short-term loudness or annoyance of road-traffic sound. *Journal of Sound and Vibration*, 302, 197–207.
- Nilsson, M. E., Andéhn, M., & Lesna, P. (2008). Evaluating roadside noise barriers using an annoyance-reduction criterion. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124(6), 3561–3567.
- Noble, W. (2006). Bilateral hearing aids: a review of self-reports of benefit in comparison with unilateral fitting. *International Journal of Audiology*, 45(Suppl 1), 63–71.
- Oh, E., & Wightman, F. & L. R. (2001). Children's detection of pure-tone signals with random multitone maskers. *Journal of the Acoustical Society of America*, 109, 2888–2895.
- Osgood, C. E. (1952). The nature and measurement of meaning. *Psychological Bulletin*, 49(3), 197–237.
- Osgood, C. E., & Suci G. J. (1955). Factor analysis of meaning. *Journal of Experimental Psychology*, 50, 325–338.
- Parducci A. (1965). Category Judgement: A range-frequency model. *Psychological Review*, 72(6), 407–418.
- Parducci, A. (1995). *Happiness, pleasure, and judgment: The contextual theory and its applications*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Raw, G. J., & Griffiths, I. D. (1990). Subjective Response to Changes in Road Traffic Noise: A Model. *Journal of Sound and Vibration*, 141(1), 43–54.
- Rice, C., & Izumi, K. (1986). Factors affecting the annoyance of combinations of noise sources. In: *Proceedings of the Institute of Acoustics* (pp. 325–332).
- Robinson, D. W., & Dadson, R. S. (1956). A redetermination to the equal loudness relations for pure tones. *British Journal of Applied Physics*, 7, 166–181.

- Roßberg, D., & Guidati, S. (2008). Neue Methoden für die psychoakustische Bewertung von Verkehrsgeräuschen. *Lärmbekämpfung*, 3, 26–32.
- Sader, M. (1966). *Lautheit und Lärm*. Göttingen: Hogrefe.
- Scharf, B., & Houtsma, A. J. M. (1986). Audition II. Loudness, pitch, localization, aural distortion, pathology. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance*. New York: Wiley.
- Schepker, H., Rennies, J., Holube, I., & Kollmeier B. (2012). Zusammenhang von Höranstrengung, Sprachverständlichkeit und STI. In Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (Ed.), *Fortschritte der Akustik - DAGA 2012* (pp. 875–876). Berlin.
- Schick, A., Klatt, M., & Meis, M. (1999). Die Lärmbelastung von Lehrern und Schülern - ein Forschungszustandsbericht. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 46, 77–87.
- Schlittmeier, S. J., Hellbrück, J., Thaden, R. & Vorländer, M. (2008). The impact of background speech varying in intelligibility: Effects on cognitive performance and perceived disturbance. *Ergonomics*, 51(5), 719-736.
- Schuemer, R., & Möhler, U. (2003). Lästigkeitsvergleich zwischen Schienen- und Straßenverkehrslärm. In R. Schuemer, D. Schreckenberger, & U. Felscher-Suhr (Eds.). *Wirkungen von Schienen- und Straßenverkehrslärm* (pp. 73–102).
- Schuemer, R., & Schreckenberger, D. (2000). Änderung der Lärmbelastung bei Maßnahme bedingter, stufenweise veränderter Geräuschbelastung. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, 47(4), 134–143.
- Schütte, M., Marks, A., Wenning, E., & Griefhahn, B. (2007). The development of the noise sensitivity questionnaire. *Noise & Health*, 9, 15–24.
- Schultz, T. H. J. (1978). Synthesis of social surveys on noise annoyance. *Journal of the Acoustical Society of America*, 64, 377–405.
- Stevens, S. S. (1936). A scale for the measurement of a psychological magnitude: Loudness. *Psychological Review*, 43, 405–416.
- Stevens, S. S. (1955). The measurement of loudness. *Journal of the Acoustical Society of America*, 27, 816–829.
- Stevens, S. S. (1975). *Psychophysics: Introduction to its perceptual, neural, and social prospects*. New York: Wiley.
- Sust, C. A., Lazarus, H., Steckel, R., Kulka, M., & Kurtz, P. (2009). Assessing Speech Comprehension in Noise. *Acta Acustica united with Acustica*, 95, 86–96.
- Sust, C. A., Steckel, R., Kulka, M., Lazarus, H., & Kurtz, P. (2007). *Beurteilung der Sprachkommunikation bei Verkehrsgeräuschen: Gestaltungsgrundsätze*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Dortmund.
- Taylor, S. M. (1982). A comparison of models to predict annoyance reactions to noise from mixed sources. *Journal of Sound and Vibration*, 81, 123–138.
- Terhardt, E., & Stoll, G. S. M. (1982). Algorithms for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 71(3), 679–688.
- Thomas, J. R., & Jones, D. M. (1981). Noise annoyance and the uncomfortable loudness label: Some individual differences. In A. Schick (Ed.), *Akustik zwischen Physik und Physiologie*. Stuttgart: Klett-Kotta.
- Van Gerven, P. W. M., Vos, H., Van Boxtel, M. P. J., Janssen, S. A., & Miedema, H. M. (2009). Annoyance from environmental noise across the lifespan. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(1), 187–194.
- Van Kamp, I., Job, R. F. S., Hatfield, J., Haines, M., Stellato, S. A., & Stansfeld, S. A. (2004). The Role of Noise Sensitivity in the Noise-response Relation: A Comparison of three International Airport Studies. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116(6), 3471–3479.

- Wagener, K., Kühnel, V., & Kollmeier, B. (1999). Entwicklung und Evaluation eines Satztests in deutscher Sprache II: Optimierung des Oldenburger Satztests. *Zeitschrift für Audiologie/Audiological Acoustics*, 38(2), 44–56.
- Warren, R. M. (1973). Quantification of Loudness. *The American Journal of Psychology*, 86(4), 807–825.
- Warren, R. M. (2008). *Auditory perception: An analysis and synthesis*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Weinstein, N. D. (1980). Individual differences in critical tendencies and noise annoyance. *Journal of Sound and Vibration*, 68(241-248).
- Yano, T., Nguyen, T., Nishimura, T., & Sato, S. (2009). Social Survey on Community Response to Aircraft Noise in Ho Chi Minh City. In Institute of Noise Control Engineering of the USA (Ed.). *Proceedings of inter-noise 2009*.
- Zeitler, A. (2002). *Auditory pleasantness. Methodological considerations in the application of psychophysical scaling methods for sound quality evaluation* (Dissertation). Universität Eichstätt-Ingolstadt, Eichstätt.

## Anhang A1

### Bildschirmkopien vom Auralisationsbrowser (Version 1.0)



**Abbildung A1.1:** Splashscreen zur Auswahl des Ausgabegerätes

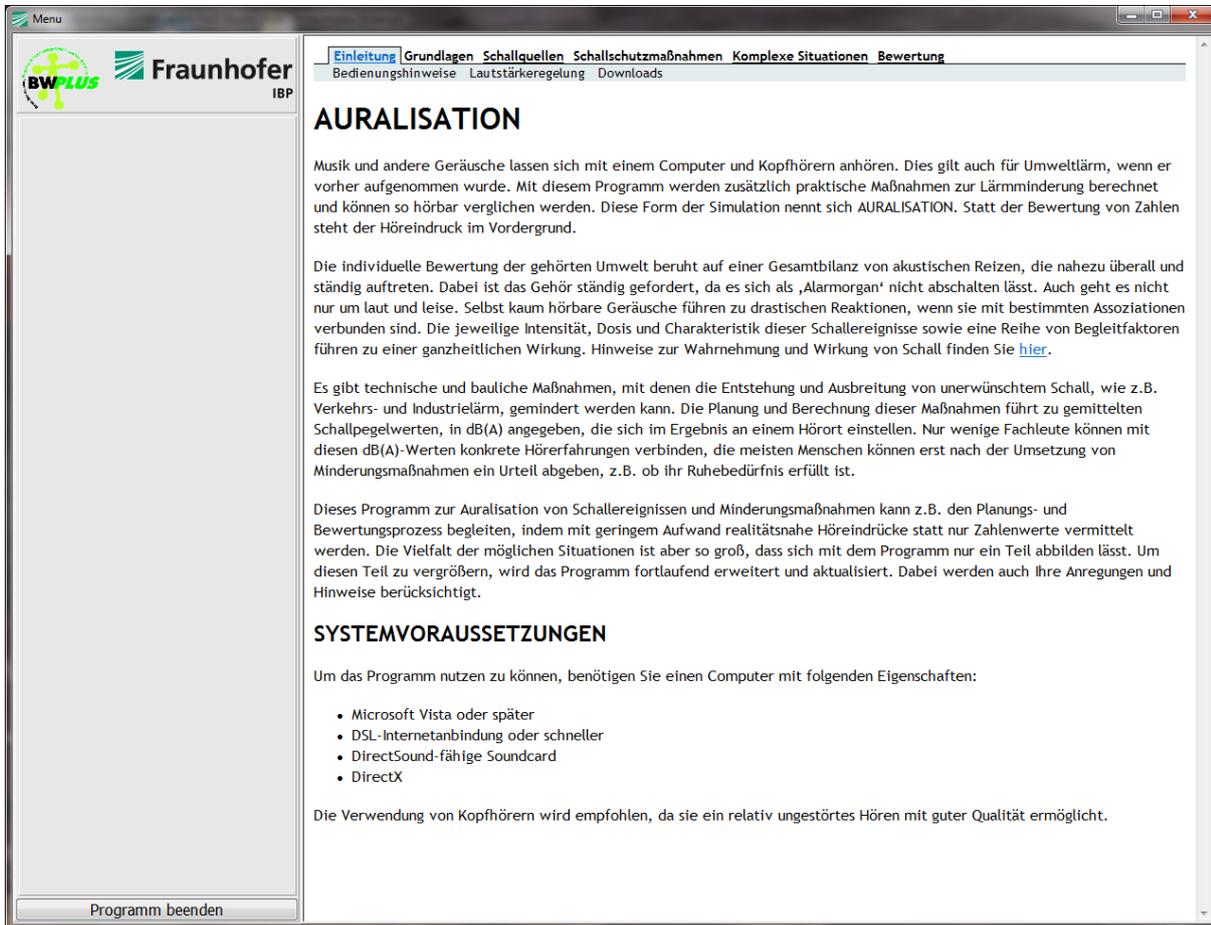
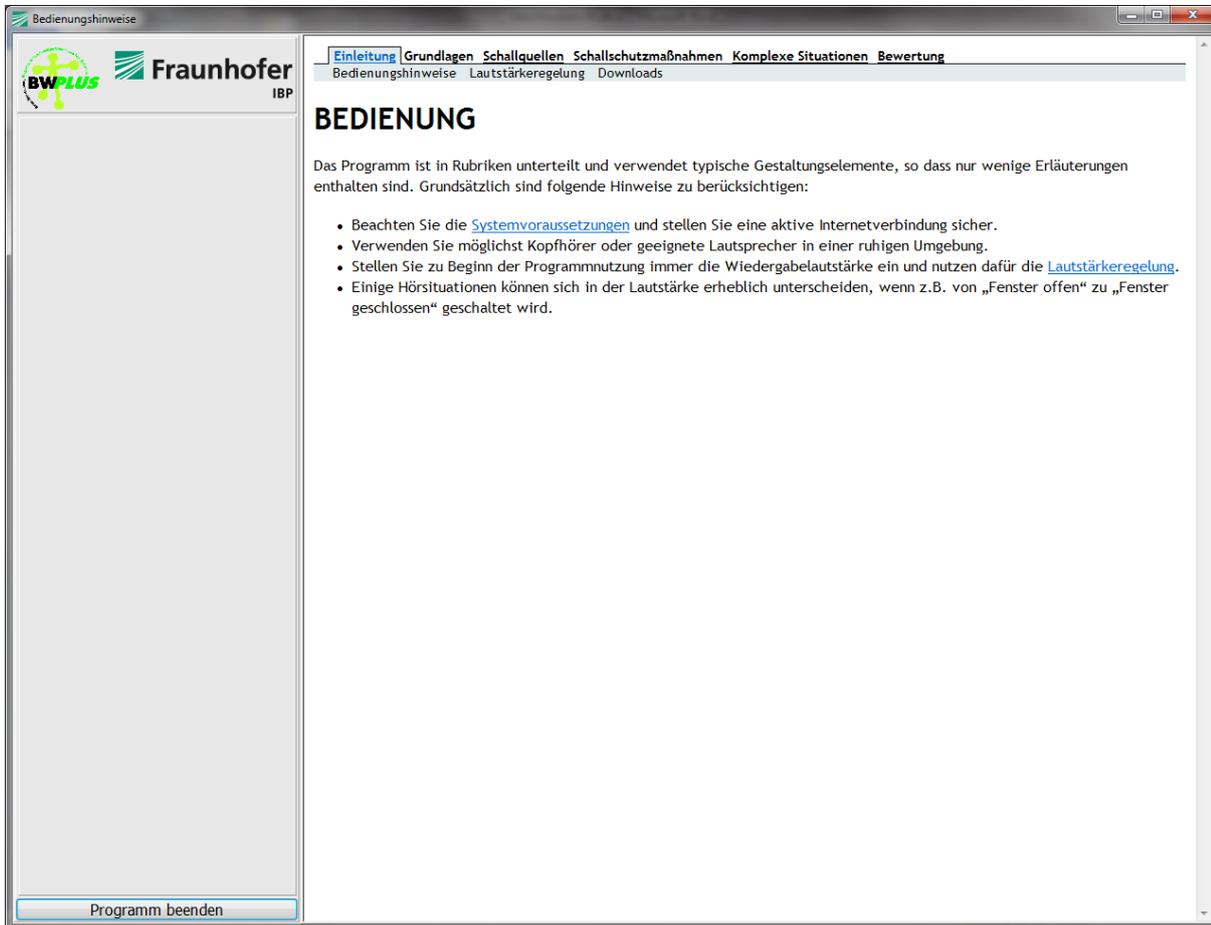


Abbildung A1.2: Startbildschirm des Auralisationsbrowsers (Einleitung)



**Abbildung A1.3:** Einleitung: Bedienungshinweise

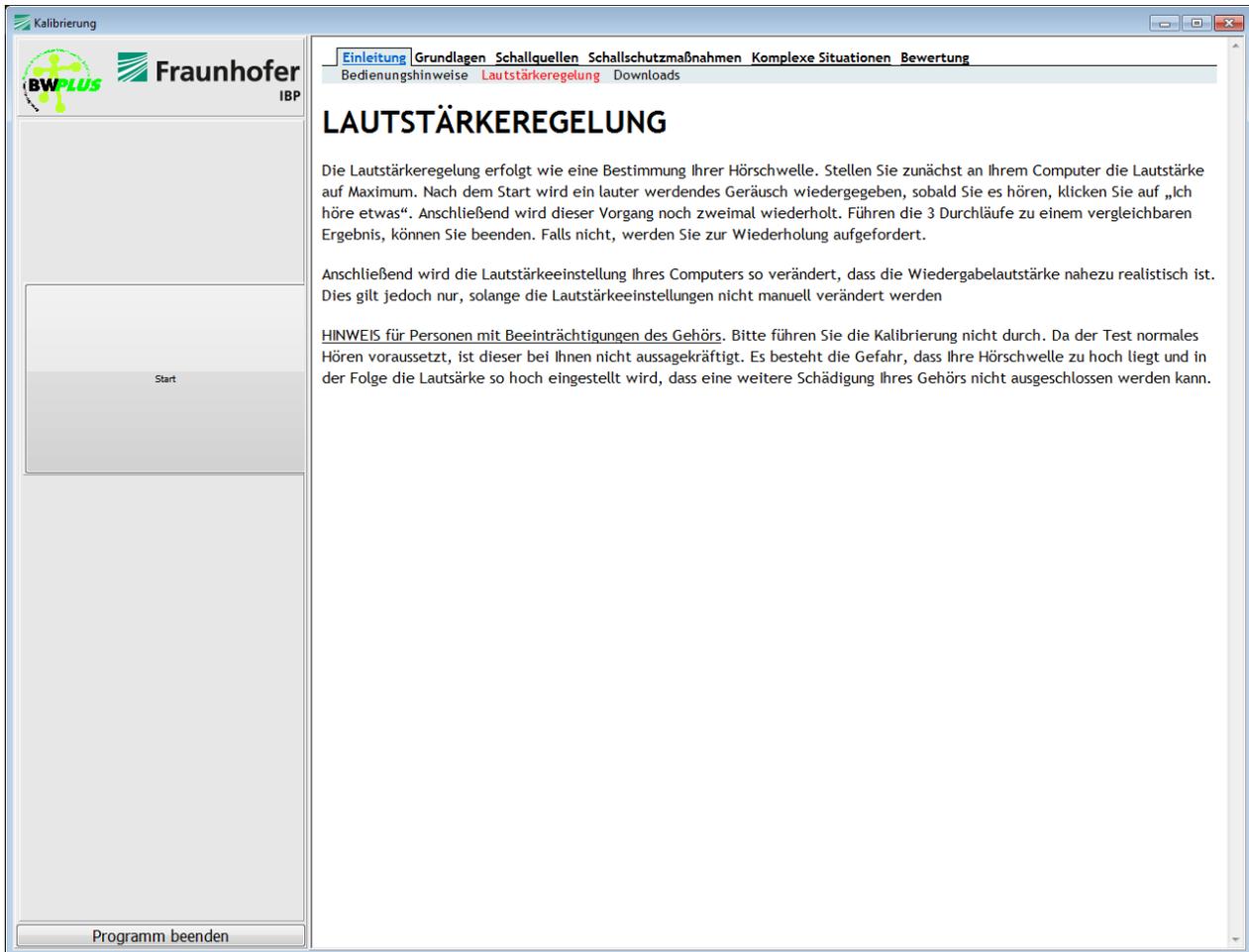
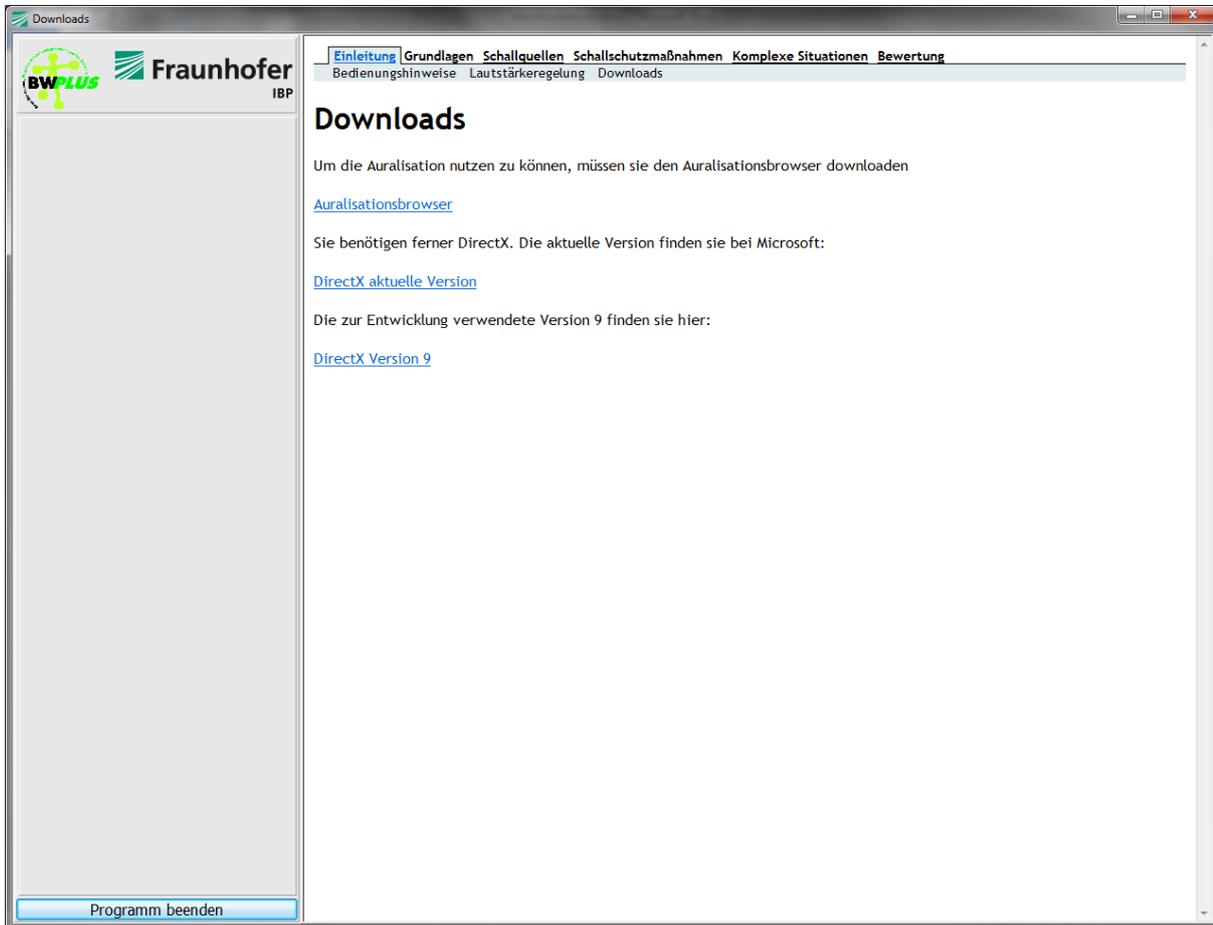


Abbildung A1.4: Einleitung: Lautstärkeregelung



**Abbildung A1.5:** Einleitung: Downloadseite



Einleitung | Grundlagen | Schallquellen | Schallschutzmaßnahmen | Komplexe Situationen | Bewertung

---

**Grundlagen**

**Schall**

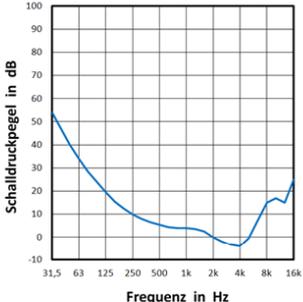
Schall steht für Schwingungen von Luftteilchen. Sie werden von einer Schallquelle, z.B. einer Lautsprechermembran, in Schwingungen versetzt, die sich als Wellen mit der Schallgeschwindigkeit ausbreiten. Je stärker die Schwingungen, desto lauter der Schall. Als Maß dafür werden Schallpegel in dB verwendet.

Die Luftteilchen können pro Sekunde weniger oder mehr Schallschwingungen ausführen. Als Maß für die Anzahl der Schwingungen wird die Frequenz in Hz verwendet. Wenige Schallschwingungen stehen für tiefe Frequenzen, viele Schwingungen für hohe Frequenzen. Um einen Eindruck zu gewinnen, können Sie (links) einzelne Töne mit unterschiedlichen Frequenzen aber gleichem Schallpegel einstellen und anhören.

Erreichen Schallwellen unser Gehör, erzeugen sie dort ebenfalls Schwingungen, die schließlich in Reize umgewandelt werden. Auch hier gilt, je stärker die Schwingungen, desto stärker die wahrgenommene Lautstärke.

Das Gehör ist in der Lage, einen großen Lautstärkebereich zu verarbeiten. Die untere Grenze ist die Ruheshwelle. Sehr laute Geräusche können das Gehör unmittelbar schädigen, aber auch schon weniger laute Geräusche können Schädigungen hervorrufen, wenn ihnen das Gehör über einen längeren Zeitraum ausgesetzt ist.

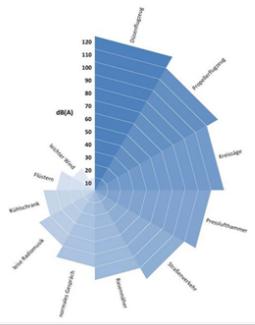
Die Lautstärkewahrnehmung des Gehörs ist auch abhängig von der Frequenz des Schalls innerhalb eines Bereiches von ca. 20 Hz bis ca. 20000 Hz (oder 20 kHz). Die Illustration zeigt die Frequenzabhängigkeit der Ruheshwelle. Diese Abhängigkeit wird auch bei der Bewertung von Geräuschen berücksichtigt und durch die Einheit dB(A) der Schallpegelangaben gekennzeichnet. Zum Vergleich zeigt die Illustration typische Schallpegel unterschiedlicher Geräusche.



Schalldruckpegel in dB

Frequenz in Hz

Illustration der Frequenzabhängigkeit der Ruheshwelle.



Anhören
Programm beenden

**Abbildung A1.6:** Grundlagen: Schall

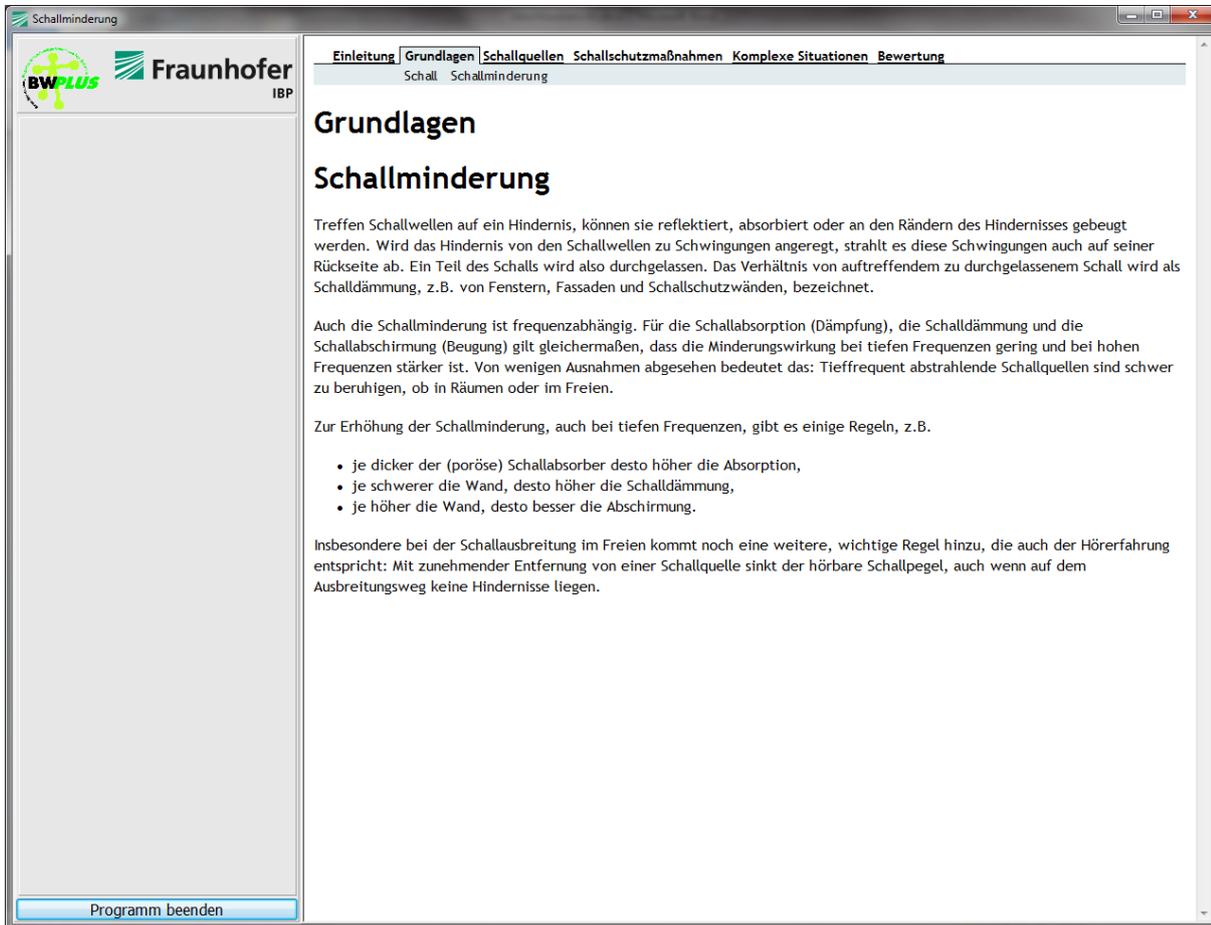
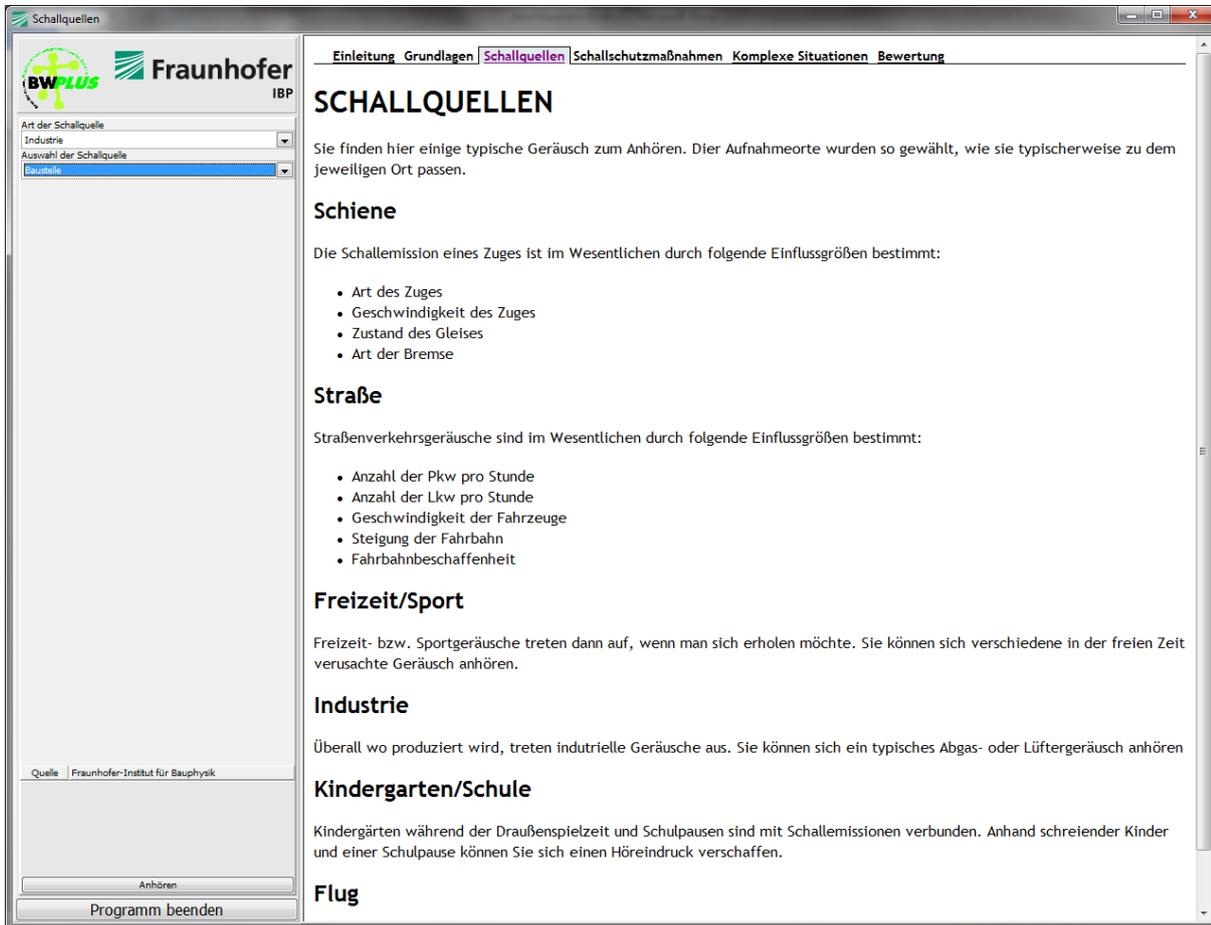


Abbildung A1.7: Grundlagen: Schallminderung



**Abbildung A1.8:** Schallquellen nach Auswahl einer Schallquelle



Einleitung Grundlagen Schallquellen **Schallschutzmaßnahmen** Komplexe Situationen Bewertung  
Lärmschutzwand Schallschutzfenster Schalldämpfer

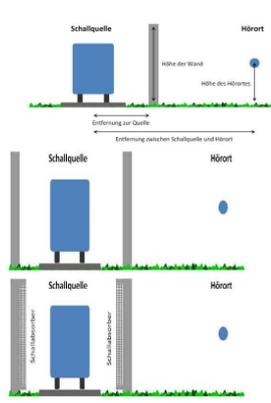
## SCHALLSCHUTZMAßNAHMEN

### LÄRMSCHUTZWAND

Steht eine Lärmschutzwand zwischen der Schallquelle und dem Hörort, hängt die Schallminderung bei ausreichender Schalldämmung der Wand im wesentlichen von folgenden Größen ab:

- Höhe der Positionen von Schallquelle und Hörer
- Höhe der Lärmschutzwand
- Entfernungen zwischen Schallquelle, Lärmschutzwand und Hörer

Eine Sondersituation ergibt sich, wenn auf beiden Seiten einer Schallquelle, z.B. einer befahrenen Straße, Lärmschutzwände stehen. Durch mehrfache Schallreflexion zwischen den Wänden und den Fahrzeugen kann sich der Schallpegel am Hörort erhöhen. Um dies zu vermeiden, werden die Seiten der Lärmschutzwände, die zur Schallquelle weisen, mit Schallabsorbern ausgestattet.



Hörer  
Höhe der Ohren über Grund [m]  
2

Schallquelle  
Schienenverkehr  
Art der Schallquelle  
Bahnhof, Halt eines Nahverkehrszugs  
Auswahl der Schallquelle

Entfernung zum Hörer [m]  
500

Lärmschutzwand  
Schallschutzmaßnahme  
Lärmschutzwand, beidseitig

Entfernung zur Fahrbahnmitte [m] Höhe [m]  
5 3

Anhören  
Hintergrundgeräusch einschalten  
Programm beenden

**Abbildung A1.9:** Schallschutzmaßnahmen: Lärmschutzwand



**Schallschutzfenster**

Einleitung Grundlagen Schallquellen **Schallschutzmaßnahmen** Komplexe Situationen Bewertung

Lärmschutzwand Schallschutzfenster Schalldämpfer

## SCHALLSCHUTZMAßNAHMEN

### SCHALLSCHUTZFENSTER

Die Außenhülle von Gebäuden, also Fassaden und Dach, schützt die Räume auch vor Schall von außen. Die Höhe dieser Schalldämmung hängt von Aufbau und Ausführung jedes einzelnen Details ab. Eine Schwachstelle reicht aus, um die Gesamtwirkung zu beeinträchtigen. Im Vergleich zu Mauerwerk oder anderen Fassadenbauweisen weisen Fenster meist eine geringere Schalldämmung auf, so dass deren Auswahl besonders zu beachten ist.

Es gibt daher Fenster verschiedener Schallschutzklassen, je höher die Klasse, desto höher die Schalldämmung. Ein gekipptes Fenster hat nur eine deutliche geringe Schalldämmung und beim offenen Fenster kommt der Schall ungehindert im Raum an.

**Schallquelle**

Art der Schallquelle  
Flugzeuge

Auswahl der Schallquelle  
Dusentflugzeug, startend

Entfernung zum Hörer [m]  
1000

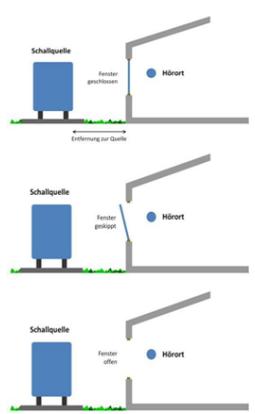
Raum  
Wohnzimmer

Fenster  
Schallschutzklasse 3

Anhören

Hintergrundgeräusch einschalten

Programm beenden



**Abbildung A1.10:** Schallschutzmaßnahmen: Schallschutzfenster

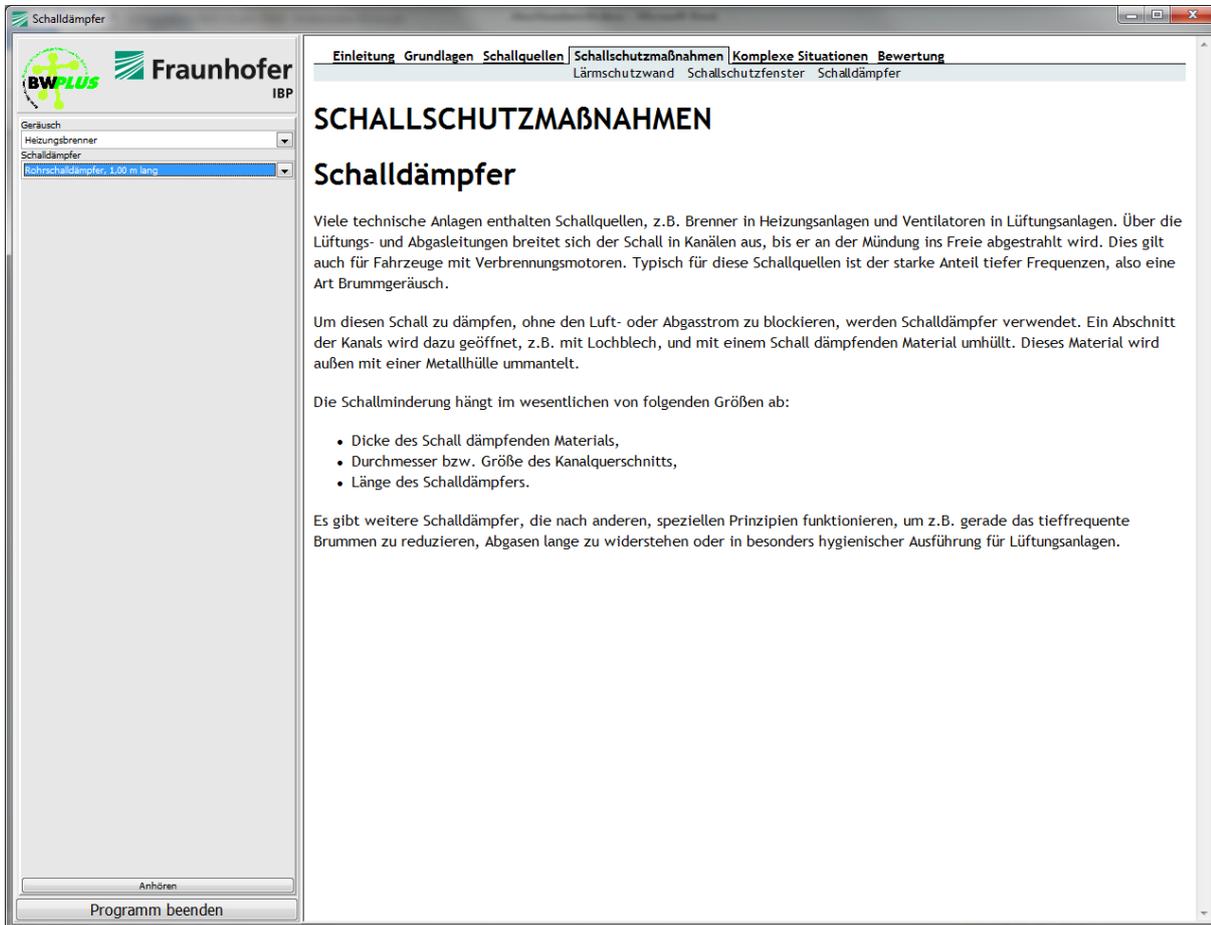


Abbildung A1.11: Schallschutzmaßnahmen: Schalldämpfer

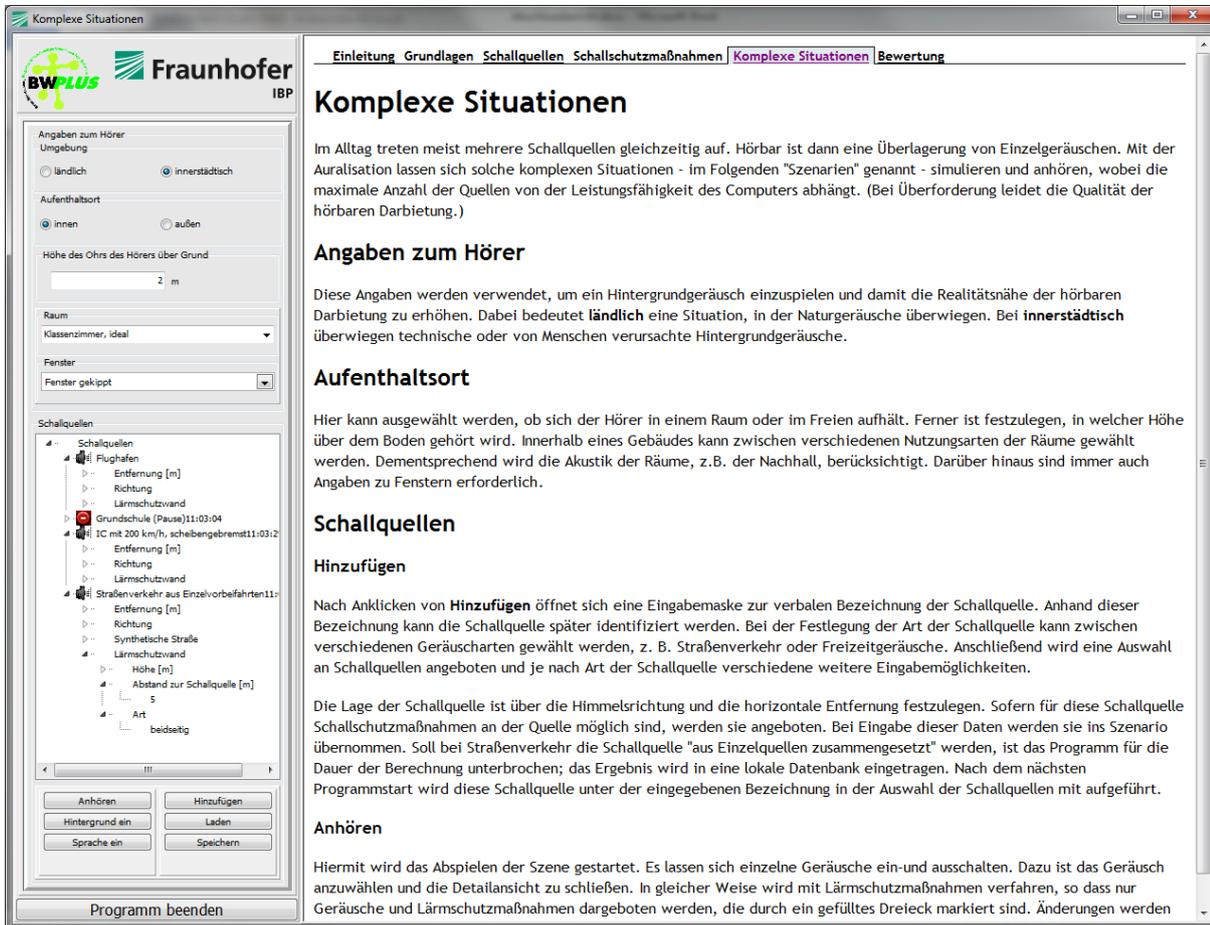


Abbildung A1.12: Komplexe Situationen

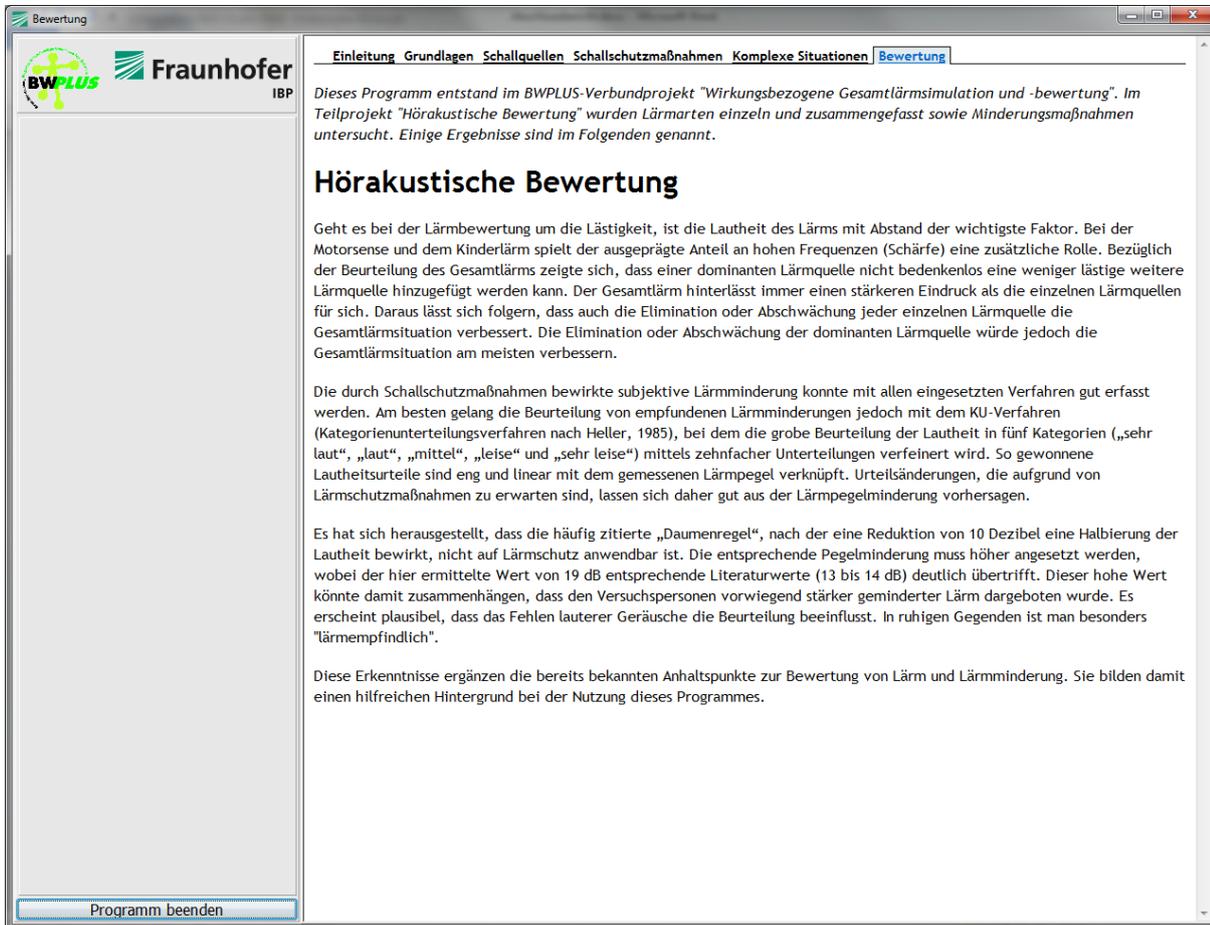


Abbildung A1.13: Bewertung - Verbindung zu Teilprojekt 2 "Hörakustische Bewertung"

## **Anhang A2**

### **Untersuchungsinstruktionen**

#### **A2.1**

##### **Instruktion: Lästigkeit verschiedener Lärmquellen im Paarvergleich (Untersuchung 1)**

Liebe Versuchsteilnehmerin, lieber Versuchsteilnehmer,

Vielen Dank für Ihre Teilnahme

In dieser Untersuchung werden Ihnen per Kopfhörer jeweils zwei verschiedenen Arten von Umgebungslärm dargeboten (z.B. Baustellenlärm und Autobahnlärm). Stellen Sie sich nun vor, Sie wären an Ihrem Wohnort tagsüber regelmäßig diesem Lärm ausgesetzt. In Anbetracht dieser Vorstellung sollen Sie angeben, welchen Lärm Sie als lästiger einstufen? Bitte urteilen Sie möglichst spontan, es gibt dabei keine richtigen oder falschen Antworten. Der Versuchsleiter wird Sie anschließend nach Gründen für Ihre Urteile fragen. Bitte antworten Sie auch hier ganz offen, es gibt keine besonders "schlau" oder "dumm" Begründungen.

Wenn es jetzt keine Fragen gibt, klicken Sie auf die OK-Taste.

##### **A2.2 Instruktion: Bewertung von einzelnen und zusammengesetzten Lärmquellen - Gesamtlärm (Untersuchung 2)**

Liebe Versuchsteilnehmerin, lieber Versuchsteilnehmer,

Vielen Dank für Ihre Teilnahme

In dieser Untersuchung werden Ihnen per Kopfhörer verschiedene Aufnahmen von Umgebungslärm dargeboten. (z.B. Baustellenlärm). Sie sollen nun diesen Lärm nach verschiedenen Kriterien, wie Lautheit, Lästigkeit usw. bewerten. Teilweise kommt der Lärm aus verschiedenen Quellen (z.B. Baustelle und Flughafen). In diesen Fällen sollen Sie angeben wie stark Sie die einzelnen Lärmanteile empfinden, also z.B. zu 30 Prozent Baustelle und 70 Prozent Flughafen, und welcher Lärmanteil am lästigsten ist. Bitte urteilen Sie möglichst spontan, es gibt dabei keine richtigen oder falschen Antworten.

Wenn es jetzt keine Fragen gibt, klicken Sie auf die Weiter-Taste.

##### **A2.3 Instruktion: Fraktionierungsverfahren (Untersuchung 3)**

Liebe Versuchsteilnehmerin, lieber Versuchsteilnehmer,

Vielen Dank für Ihre Teilnahme.

In dieser Untersuchung werden Ihnen per Kopfhörer verschiedene Aufnahmen von Umgebungslärm dargeboten (z.B. Baustellenlärm).

Es soll immer die Originalaufnahme des Lärms (kann links gestartet werden) mit einer auralisierten Version (kann rechts gestartet werden) verglichen werden. Auralisiert heißt hier, Sie hören den Lärm abgeschwächt durch ein Schallschutzfenster oder eine Lärmschutzwand. Nachdem Sie die beiden Aufnahmen angehört haben, sollen Sie jeweils angeben, um wie viel leiser/ weniger lästig sie den auralisierten (gedämmten) Lärm im Vergleich zum ungedämmten Lärm empfinden.

Bei der Beurteilung der Lästigkeit stellen Sie sich vor, Sie sitzen zuhause in Ihrem Wohnzimmer und wollen ein Buch lesen. Dabei sind Sie dem gehörten Lärm ausgesetzt.

Der Versuchsleiter wird am Anfang des Experiments bei Ihnen bleiben und evtl. Unklarheiten klären.

Wenn es jetzt keine Fragen gibt, klicken Sie auf die weiter-Taste.

#### **A2.4 Instruktion: Kategorienunterteilungsverfahren (Untersuchung 3)**

Liebe Versuchsteilnehmerin, lieber Versuchsteilnehmer,  
Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

In dieser Untersuchung werden Ihnen per Kopfhörer verschiedene Arten von Umgebungslärm dargeboten (z.B. Baustellenlärm).

Teilweise hören Sie diesen im Original, teilweise ist er abgeschwächt (auralisiert), z.B. durch ein Schallschutzfenster.

Nachdem Sie sich den Lärm angehört haben, sollen Sie auf zwei Skalen (siehe unten) angeben, wie laut und wie lästig Sie den Lärm empfinden. Es stehen Ihnen dabei verschiedene Kategorien zur Verfügung, für die Lautheit z.B. sehr leise, mittel usw. und für die Lästigkeit etwas, mittelmäßig, stark usw.

Wählen Sie zuerst eine Kategorie aus. Danach können Sie innerhalb dieser Kategorie nochmal feinjustieren. Der gewählte Skalenwert wird Ihnen in dem Kästchen oberhalb der Skala angezeigt.

Beispiel: Sie empfinden einen Lärm als etwas lästig, aber bereits an der Grenze zu mittelmäßig lästig. Also wählen Sie innerhalb der Kategorie "etwas" einen sehr hohen Skalenwert.

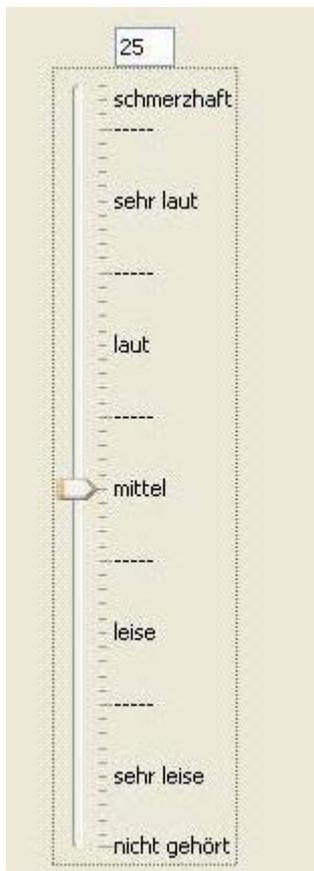
Wenn Ihnen die jeweilige Skala zur Bewertung nicht ausreicht, können Sie selber einen Wert in das Kästchen oberhalb dieser Skala eintragen.

Bei der Beurteilung der Lästigkeit stellen Sie sich vor, Sie sitzen zuhause in Ihrem Wohnzimmer und wollen ein Buch lesen. Dabei sind Sie dem gehörten Lärm ausgesetzt.

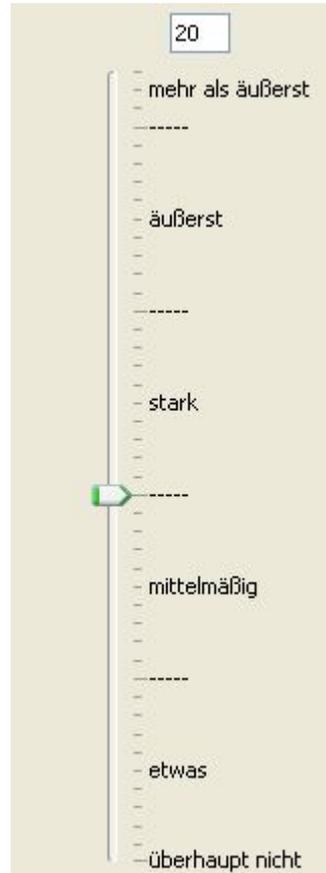
Sie hören zunächst einmal zur Orientierung einen sehr leisen Lärm und einen sehr lauten Lärm. Zur Übung bewerten Sie diese Lärmarten, der Versuchsleiter hilft bei Bedarf.

Wenn es jetzt keine Fragen gibt, klicken Sie auf die "weiter"-Taste.

## Lautheit



## Lästigkeit



### A2.5 Instruktion: Sprachverständlichkeit unter Lärm (Untersuchung 4)

Liebe Versuchsteilnehmerin, lieber Versuchsteilnehmer,

Vielen Dank für Ihre Teilnahme

In dieser Untersuchung werden Ihnen per Kopfhörer verschieden Aufnahmen von Umgebungslärm dargeboten. (z.B. Baustellenlärm). Gleichzeitig ist in dem Lärm Sprache zu hören, es wird ein deutscher Satz gesprochen. Ihre Aufgabe ist es, nachdem Sie die Aufnahme angehört haben, den deutschen Satz wiederzugeben, und anzugeben, wie sehr Sie sich anstrengen mussten, die Sprache zu verstehen. Es stehen Ihnen hierfür die Zahlen 1 bis 9 zur Verfügung, wobei 1 bedeutet, Sie mussten sich überhaupt nicht anstrengen und 9, Sie mussten sich äußerst stark anstrengen. Bitte urteilen Sie möglichst spontan, es gibt dabei keine richtigen oder falschen Antworten.

Wenn es jetzt keine Fragen gibt, klicken Sie auf die weiter-Taste.

## Anhang A3

### Schallanalysen

#### A3.1 Pegel und psychoakustische Parameter der in Untersuchung 2 verwendeten Schalle

Lärmbestandteile			<i>L<sub>Aeq</sub></i>	<i>N<sub>5</sub></i>	SS	Rauigkeit	Schärfe	Tonalität
			<i>dB</i>	<i>sone</i>	<i>vacil</i>	<i>asper</i>	<i>acum</i>	<i>Tu</i>
Autobahn			72,64	33,10	0,01	2,84	2,48	0,04
Autobahn	Baustelle		75,51	44,86	0,06	3,40	2,62	0,06
Autobahn	Fluglärm		75,39	45,36	0,01	3,10	2,41	0,05
Autobahn	Regionalbahn		73,57	35,76	0,01	3,01	2,63	0,04
Baustelle			72,38	42,77	0,13	3,10	2,40	0,09
Baustelle	Busanfahrten		72,91	44,05	0,10	3,16	2,48	0,06
Baustelle	PKW		73,72	46,09	0,09	3,20	2,52	0,07
Baustelle	Regionalbahn		73,32	44,83	0,08	3,13	2,56	0,07
Busanfahrten			63,54	26,14	0,01	2,09	2,12	0,06
Busanfahrten	Baustelle	Fluglärm	75,42	50,25	0,05	3,25	2,48	0,06
Busanfahrten	PKW		69,29	36,38	0,01	2,54	2,34	0,05
Busanfahrten	Regionalbahn		68,23	33,56	0,01	2,39	2,38	0,06
Fluglärm			72,08	43,14	0,01	2,21	1,54	0,07
Fluglärm	Baustelle		75,28	49,57	0,07	3,19	2,38	0,07
Fluglärm	Busanfahrten		72,65	43,74	0,01	2,56	2,14	0,06
Fluglärm	Fussball		71,93	43,21	0,02	2,24	1,61	0,07
Fluglärm	Kinder		75,28	45,84	0,04	3,84	2,47	0,08
Fluglärm	Motorsense		74,31	47,79	0,03	2,88	3,23	0,20
Fluglärm	PKW		73,36	45,11	0,01	2,74	2,15	0,06
Fluglärm	Regionalbahn		72,98	47,20	0,01	2,47	1,95	0,06
Fussball			50,96	9,30	0,03	0,69	1,34	0,05
Fussball	PKW		68,02	33,29	0,01	2,31	2,21	0,06
Fussball	Regionalbahn		66,58	31,15	0,02	2,03	2,09	0,07
Kinder			72,61	37,20	0,08	3,98	2,57	0,11
Kinder	Baustelle		75,63	47,40	0,09	3,92	2,69	0,09
Kinder	Busanfahrten		73,30	40,82	0,05	3,68	2,59	0,09
Kinder	Motorsense		74,79	44,14	0,05	3,37	3,46	0,26
Kinder	PKW		74,04	40,65	0,04	3,77	2,67	0,08
Kinder	Regionalbahn		73,70	41,50	0,05	3,80	2,71	0,08
Motorsense			70,40	35,25	0,06	2,06	3,40	0,42
Motorsense	Regionalbahn		71,87	37,62	0,04	2,59	3,41	0,26
PKW			67,94	33,27	0,01	2,29	2,20	0,06
PKW	Regionalbahn		70,27	36,57	0,01	2,60	2,42	0,04
PKW	Regionalbahn	Fluglärm	74,28	48,81	0,01	2,88	2,35	0,05
Regionalbahn			66,44	30,73	0,02	2,00	2,08	0,07
U-Bahn			63,35	28,85	0,02	1,72	2,11	0,09

Bemerkung: SS= Schwankungsstärke

### A3.2 Pegel ( $L_{Aeq}$ ) der in Untersuchung 3 verwendeten Schalle und Auralisationen

	Original	Schallschutzfensterklasse				Lärmschutzwandhöhe in Metern		
		II	III	IV	V	2	3	5
Autobahn	72,64	36,70	33,16	29,74	26,35	53,86	51,06	48,30
Autobahn_Regionalbahn	73,57	39,71	35,89	31,98	28,16	55,07	52,33	49,55
Baustelle	72,38	42,63	38,31	33,86	30,07			
Baustelle_Busanfahrten	72,91	43,21	39,08	34,85	31,39			
Baustelle_PKW	73,72	43,21	38,95	34,56	30,79	56,16	53,55	50,72
Baustelle_Regionalbahn	73,32	43,60	39,32	34,85	30,90	56,07	53,50	50,63
Busanfahrten	63,54	34,19	31,16	27,86	25,57			
Busanfahrten_PKW	69,29	37,30	33,81	30,15	27,34			
Busanfahrten_Regionalbahn	68,23	38,60	34,93	30,98	27,68			
Fluglärm	72,08	44,69	41,41	37,49	32,84			
Fluglärm_Busanfahrten	72,65	45,05	41,78	37,92	33,59			
Fluglärm_Kinder	75,28	45,51	42,19	38,31	33,94			
Fluglärm_PKW	73,36	45,06	41,72	37,78	33,22			
Fluglärm_Regionalbahn	72,98	45,27	41,89	37,9	33,30			
Fussball	65,14	29,80	25,49	21,99	18,86			
Kinder	72,61	37,74	34,17	30,59	27,41			
Kinder_Baustelle	75,63	43,87	39,76	35,54	31,92			
Kinder_Busanfahrten	73,30	39,32	35,93	32,47	29,63			
Kinder_PKW	74,04	39,36	35,66	31,93	28,61			
Kinder_Regionalbahn	73,70	40,22	36,43	32,48	28,85			
Motorsense	70,40	41,76	38,32	33,41	26,66			
PKW	67,94	34,31	30,34	26,24	22,55	49,29	46,55	43,86
PKW_Regionalbahn	70,27	38,64	34,59	30,24	26,04	52,13	49,48	46,70
Regionalbahn	66,44	36,66	32,54	28,02	23,47	48,93	46,37	43,51

### A3.3 Lautheit (N5) der in Untersuchung 3 verwendeten Schalle und Auralisationen

	Original	Schallschutzfensterklasse				Lärmschutzwandhöhe in Metern		
		II	III	IV	V	2	3	5
Autobahn	33,11	3,31	2,33	1,56	1,05	10,20	8,51	7,22
Autobahn_Regionalbahn	35,70	3,84	2,71	1,82	1,19	10,90	9,23	7,92
Baustelle	38,72	4,61	3,26	2,22	1,58			
Baustelle_Busanfahrten	40,38	4,88	3,48	2,37	1,73			
Baustelle_PKW	42,50	5,06	3,59	2,46	1,75	13,60	11,50	9,86
Baustelle_Regionalbahn	41,40	5,01	3,58	2,44	1,73	13,30	11,30	9,62
Busanfahrten	25,80	2,70	1,93	1,31	0,91			
Busanfahrten_PKW	36,40	4,10	2,90	1,97	1,40			
Busanfahrten_Regionalbahn	33,40	3,74	2,64	1,78	1,21			
Fluglärm	43,50	5,91	4,46	3,22	2,24			
Fluglärm_Busanfahrten	44,10	6,01	4,51	3,26	2,30			
Fluglärm_Kinder	45,40	6,09	4,61	3,34	2,37			
Fluglärm_PKW	44,80	6,09	4,58	3,30	2,34			
Fluglärm_Regionalbahn	47,24	6,28	4,67	3,37	2,40			
Fussball	22,60	1,85	1,14	0,68	0,42			
Kinder	34,40	3,39	2,38	1,62	1,15			
Kinder_Baustelle	44,41	5,17	3,71	2,58	1,85			
Kinder_Busanfahrten	38,50	4,18	2,98	2,08	1,52			
Kinder_PKW	39,70	4,22	2,97	2,04	1,43			
Kinder_Regionalbahn	39,68	4,38	3,14	2,17	1,50			
Motorsense	33,10	3,58	2,52	1,69	0,96			
PKW	33,20	3,37	2,35	1,56	1,01	10,10	8,53	7,30
PKW_Regionalbahn	36,72	4,02	2,86	1,93	1,28	11,40	9,62	8,24
Regionalbahn	30,50	3,30	2,24	1,46	0,91	9,23	7,82	6,67

## Anhang A4

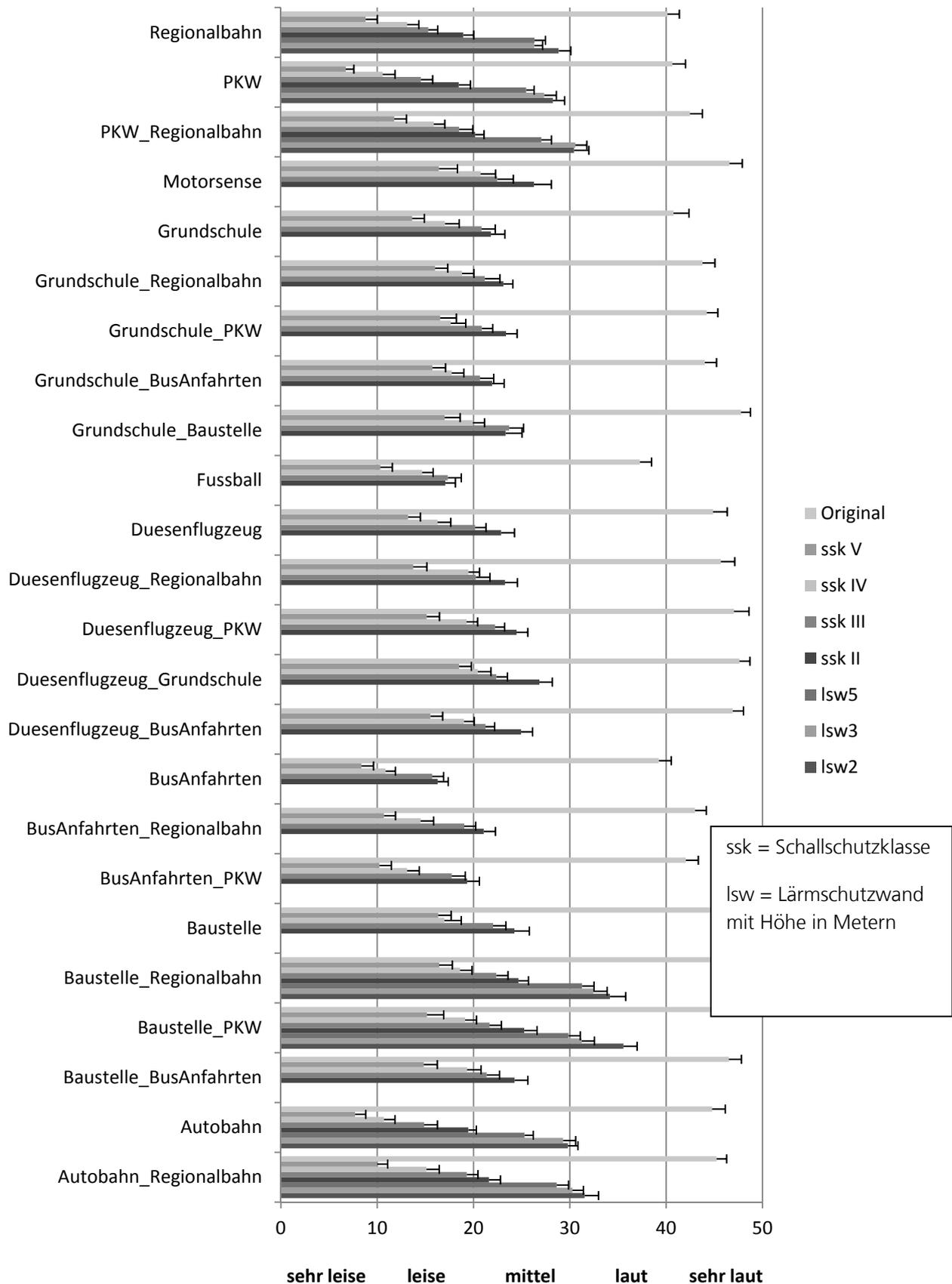
### Erweiterte Ergebnisdarstellungen

#### A4.1 Faktorenanalyse – Faktorwerte der Lärmarten (Untersuchung 2)

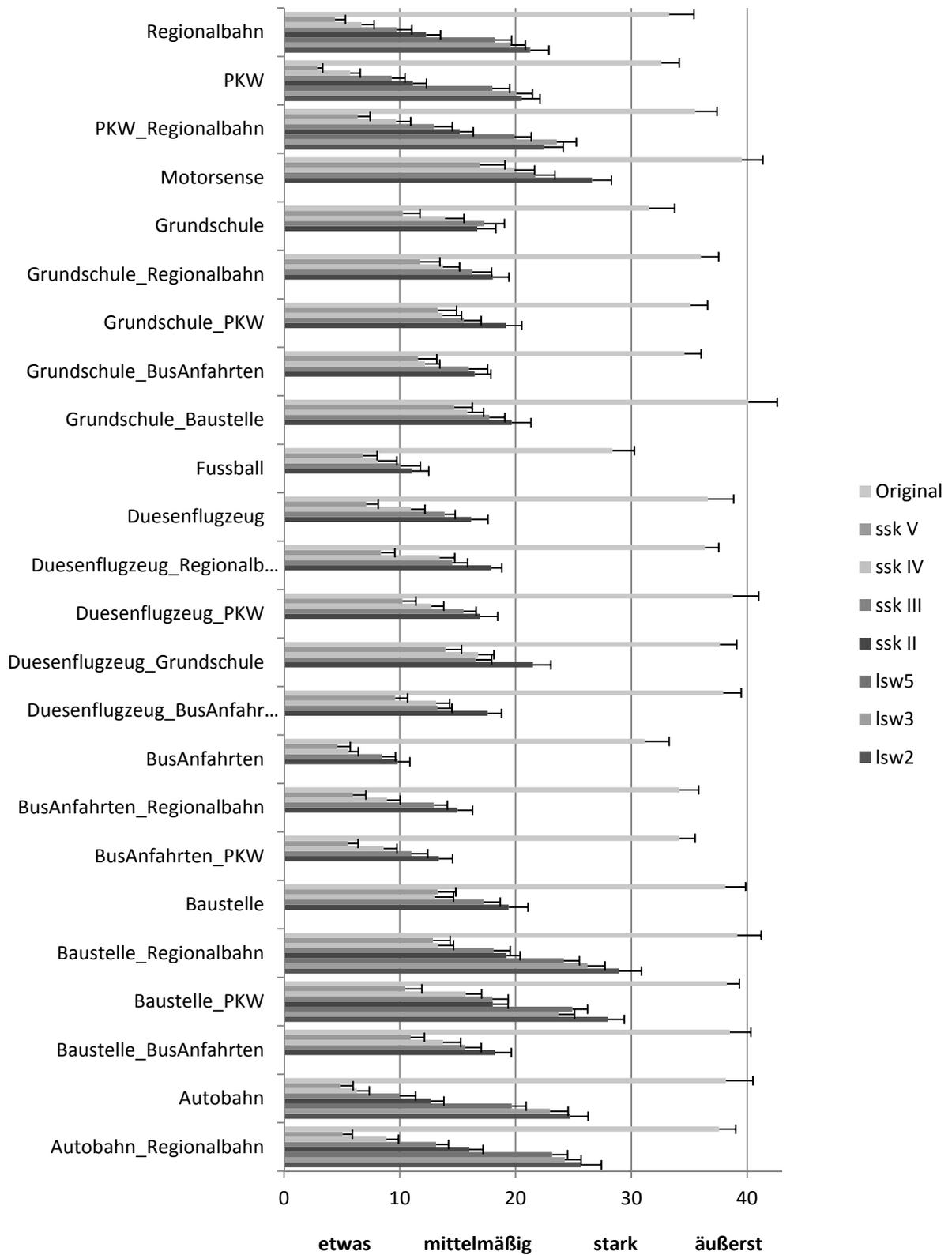
Lärmart	Glattheit	Aufdringlichkeit	hohe Frequenzen
Autobahn	0,85	-0,23	-0,76
Autobahn_Baustelle	-0,69	0,79	-1,09
Autobahn_Duesenflugzeug	0,36	0,56	-0,41
Autobahn_Regionalbahn	0,46	-0,21	-0,23
Baustelle	-0,68	0,59	-1,36
Baustelle_BusAnfahrten	-0,56	0,5	-0,88
Baustelle_PKW	-0,74	0,74	-0,7
Baustelle_Regionalbahn	-0,54	0,73	-0,61
BusAnfahrten	1,32	-1,51	-0,95
BusAnfahrten_PKW	0,45	-0,27	-0,94
BusAnfahrten_Regionalbahn	0,48	-1	-0,06
Duesenflugzeug	1,76	0,48	-0,39
Duesenflugzeug_Baustelle	-0,47	1,15	-0,84
Duesenflugzeug_Baustelle_BusAnfahrten	-1,52	1,18	-0,91
Duesenflugzeug_BusAnfahrten	0,17	-0,19	-0,63
Duesenflugzeug_Fussball	0,17	0,14	-0,49
Duesenflugzeug_Kinder	-1,5	-0,11	1,53
Duesenflugzeug_Motorsense	0,92	1,59	0,6
Duesenflugzeug_PKW	0,42	0,29	-0,58
Duesenflugzeug_PKW_Regionalbahn	-0,87	0,5	-0,94
Duesenflugzeug_Regionalbahn	0,59	0,25	-0,27
Fussball	-0,75	-3,03	-0,07
Fussball_PKW	-0,03	-0,92	-0,63
Fussball_Regionalbahn	0,04	-1,3	0,45
Kinder	-1,51	-0,73	1,79
Kinder_Baustelle	-1,26	0,61	0,47
Kinder_BusAnfahrten	-1,12	-0,57	1,31
Kinder_Motorsense	-0,46	1,12	2,32
Kinder_PKW	-0,98	-0,38	0,88
Kinder_Regionalbahn	-1,09	-0,61	1,45
Motorsense	2,58	1,73	1,89
Motorsense_Regionalbahn	1,08	1,23	1,63
PKW	0,79	-0,55	-0,79
PKW_Regionalbahn	0,26	-0,36	-0,1
Regionalbahn	1,39	-1,23	0,75
UBahn	1,32	-1,58	0,45

*Bemerkung.* Je höher der Faktorwert, desto höher ist die beschriebene Ausprägung der Eigenschaft. Ein hoher positiver Faktorwert bedeutet also, der Lärm wird als ausgeprägt glatt, aufdringlich oder hoch beschrieben.

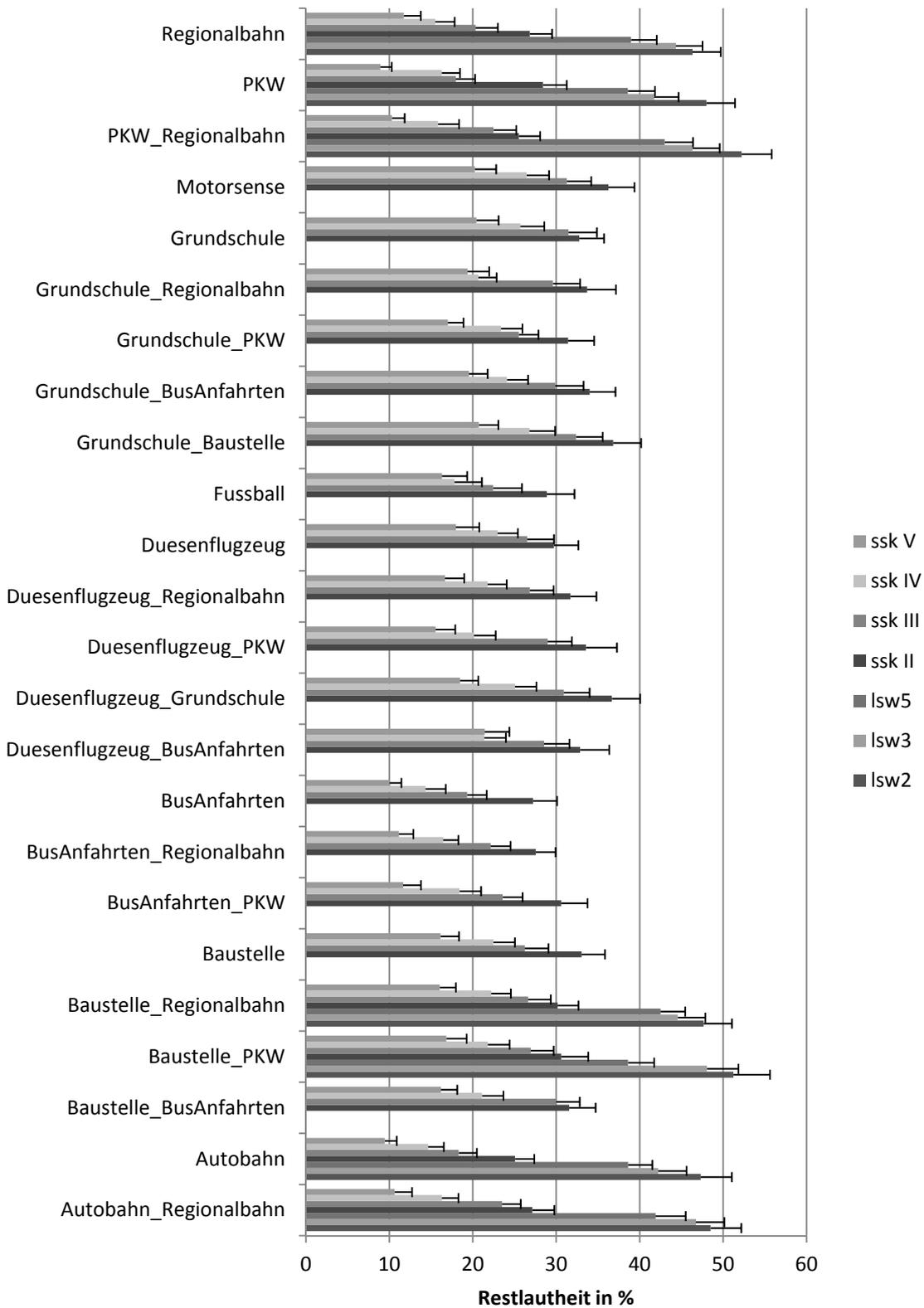
**A4.2 Abbildung der Mittelwerte und Standardfehler für die Beurteilung der Lautheit in Abhängigkeit von Lärmart und Schallschutz (Untersuchung 3: Kategorienunterteilungsskala)**



**A4.3 Abbildung der Mittelwerte und Standardfehler für die Beurteilung der Lästigkeit in Abhängigkeit von Lärmart und Schallschutz (Untersuchung 3: Kategorienunterteilungsskala)**



**A4.4 Abbildung der Mittelwerte und Standardfehler für die Beurteilung der Restlautheit in Abhängigkeit von Lärmart und Schallschutz (Untersuchung 3: Fraktionierungsverfahren)**



**A4.5 Abbildung der Mittelwerte und Standardfehler für die Beurteilung der Restlärstigkeit in Abhängigkeit von Lärmart und Schallschutz (Untersuchung 3: Fraktionierungsverfahren)**

