

## Reihe 12

Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

Nr. 796

Marius Höchstetter, M. Sc.,  
Sarching

## Entwicklung einer Methodik zur Bewertung singular impulshafter Fahrzeuggeräusche



# Entwicklung einer Methodik zur Bewertung singulär impulshafter Fahrzeuggeräusche

**Dissertation**  
zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur**  
**(Dr.-Ing.)**

von M.Sc. Marius Höchstetter  
geb. am 04.04.1987 in Wörth a. d. Donau  
genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Ulrich Gabbert (1. Gutachter)

Prof. Dr. rer. nat. Jesko L. Verhey (2. Gutachter)

Promotionskolloquium am 13.11.2015



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 12

Verkehrstechnik/  
Fahrzeugtechnik

Marius Höchstetter, M. Sc.,  
Sarching

Nr. 796

Entwicklung einer Methodik zur Bewertung  
singulär impulshafter  
Fahrzeuggeräusche

VDI verlag

Höchstetter, Marius

## **Entwicklung einer Methodik zur Bewertung singular impulshafter Fahrzeuggeräusche**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 796. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

172 Seiten, 102 Bilder, 12 Tabellen.

ISBN 978-3-18-3796-12-0, ISSN 0178-9449,

⌘ 62,00/VDI-Mitgliederpreis ⌘ 55,80.

**Für die Dokumentation:** Geräuschqualität – Psychoakustik – Wahrnehmungsraum – Dauer der Schärfe – Lautheit – Subjektives Qualitätsempfinden – Objektive Prognose – Impulshafte Geräusche – Modellierung – Fahrzeuggeräusche

Die vorliegende Arbeit thematisiert die Modellierung der kundenspezifischen Empfindungen und der kognitiven Erwartungen an die akustische Qualität von impulshaften Fahrzeuggeräuschen. Hierbei wird der mehrdimensionale Wahrnehmungsraum des Menschen analysiert, das subjektive Qualitätsempfinden bei verschiedenen Signaltypen anhand von Hörversuchen klassifiziert und mittels objektiver Parameter prognostiziert. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass eine lineare Kombination der psychoakustischen Perzentillautheit und der Dauer der Schärfe, die im Rahmen dieser Arbeit erstmals betrachtet wurde, eine geeignete Basis für die qualitative Bewertung von impulshaften Fahrzeuggeräuschen darstellt. Übergreifend wurde somit eine ganzheitliche Methodik für eine objektive Beschreibung und Prognose der Geräuschqualität von Fahrzeugen entwickelt.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9449

ISBN 978-3-18-379612-3

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Abteilung Absicherung Gesamtfahrzeug bei der BMW Group in München in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Numerische Mechanik der Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Ich möchte mich bei all denen bedanken, die mit ihrer Hilfe und Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Ulrich Gabbert für die großzügige Unterstützung und wissenschaftliche Betreuung der Arbeit bedanken. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Jesko L. Verhey danke ich herzlichst für die Übernahme des Koreferats und darüber hinaus für das Interesse an meiner Arbeit und die stetige Förderung. Von beiden konnte ich in zahlreichen persönlichen Gesprächen immer wieder wertvolle und hilfreiche Hinweise mitnehmen, die sich im Laufe der Arbeit als unersetzlich herausgestellt haben. Ohne diese fachlichen und motivierenden Diskussionen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Auch das angenehme Arbeitsklima und die sozialen Zusammenkünfte werden immer in guter Erinnerung bleiben.

Im Besonderen danke ich Herrn Jan-Michael Sautter und Herrn Maik Rolle für die Betreuung der Arbeit im Rahmen meiner Tätigkeit bei der BMW Group. Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Mentoren Herrn Dr.-Ing. Michael Brandstätter und Herrn Dr.-Ing. Arnulf B. Hemmrich für den wissenschaftlichen Austausch und die zielführende Kritik herzlichst bedanken. In zahllosen Gesprächen standen sie mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite. Durch ihr Interesse an meinem Thema und ihr hohes Engagement haben Sie das Zustandekommen und die Durchführung dieser Arbeit erst ermöglicht.

Mein Dank gilt auch Frau Regina Fellingner, Frau Melissa Schmaderer, Herrn Philipp Seifert sowie Frau Tamara Snare für die gute Zusammenarbeit im Rahmen ihrer wissenschaftlichen Tätigkeiten. Vor allem für die Unterstützung bei der Durchführung von Messreihen und Hörversuchen möchte ich mich bedanken. Ebenso bedanke ich mich bei den Teilnehmern der Hörversuche und Umfragen sowie bei allen meinen Kollegen für das angenehme und freundliche Arbeitsklima.

Abschließend danke ich meiner Familie. Motivation, Rückhalt und ein Zuhause sind grundlegende Voraussetzungen für eine erfolgreiche Arbeit. All das hat mir meine Familie stets geboten. Dafür ein ganz herzliches Dankeschön.

Ich widme diese Arbeit meinem verstorbenen Patenonkel Albert † *März 2013*



# Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VII
Kurzfassung	XI
<b>1 Einführende Bemerkungen</b>	<b>1</b>
1.1 Aufgabenstellung und Motivation	1
1.2 Stand der Forschung	3
1.3 Vorgehensweise und Methodik	15
<b>2 Grundlagen</b>	<b>17</b>
2.1 Eigenschaften des Gehörsinns	17
2.2 Klassifizierung der Geräuschqualität	20
2.2.1 Menschliche Sensorik und Verarbeitung	21
2.2.2 Methodik der Hörversuche	22
2.3 Akustische und hörakustische Kennwerte	25
2.3.1 Physikalische Parameter	25
2.3.2 Hörakustische Betrachtungen	28
2.4 Handhabung empirischer Daten	33
2.4.1 Statistische Verfahren	33
2.4.2 Multivariate Analysemethoden	36
<b>3 Objektivierung singular impulshafter Geräusche</b>	<b>40</b>
3.1 Generelle Herangehensweise	41
3.2 Ableitung relevanter Modellparameter	47
3.2.1 Semantischer Wahrnehmungsraum	47
3.2.2 Exemplarische Parameter	51
3.3 Korrelation signifikanter Modellparameter	52
3.3.1 Verriegelungsgeräusche von Serienfahrzeugen	53
3.3.2 Technische Variation	56
3.3.3 Synthetische Variation	59
3.4 Übertragbarkeit der Modellparameter	65
3.4.1 Türzuschlaggeräusche von Serienfahrzeugen	66
3.4.2 Evaluierung des Parameters $T_S$	72
<b>4 Übertragbarkeit der Methodik</b>	<b>77</b>
4.1 Ganzheitliche Anwendung der Methodik	77
4.1.1 Dimensionsreduktion	77

---

4.1.2	Modellentwicklung . . . . .	80
4.1.3	Mehrfach impulshafte Geräusche . . . . .	84
4.2	Interkulturelle Übertragbarkeit der Modelle . . . . .	88
<b>5</b>	<b>Diskussion und Bewertung der Ergebnisse</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>107</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	107
6.2	Ausblick . . . . .	108
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>110</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>145</b>

# Nomenklatur

## Lateinische Symbole

---

$C$	Konstante für die Lautheit (Moore und Glasberg)
$E$	Erregung
$E_0$	Erregung, die der Bezugsschallintensität $I_0$ entspricht
$E_{HS}$	Erregung an der Ruhehörschwelle
$E_{SI}$	Energie impulshafter Schalle [ $kg \cdot \frac{m^2}{s^2}$ ]
$E_{SIG}$	Erregung durch den Stimulus
$E_{TH RQ}$	Erregung an der Ruhehörschwelle der charakteristischen Frequenzen
$F$	Schwankungsstärke [vacil]
$F_{emp}$	Empirisch ermittelter F-Wert im F-Test
$F_{tab}$	Tabellarischer F-Wert im F-Test
$H$	Allgemeine Dichtefunktion zur Ermittlung der Verteilungsfunktion
$I$	Schallintensität [ $\frac{W}{m^2}$ ]
$I_N$	Impulshaftigkeit nach DIN EN ISO 7779 [46]
$J$	Anzahl der Regressoren
$K$	Stichprobenumfang
$Kor(X, Y)$	Korrelationskoeffizient
$L$	Schalldruck [Pa]
$L(A)$	A-bewerteter Schalldruckpegel [ $dB_{SPL A}$ ]
$L_{dB SPL}$	Schalldruckpegel [ $dB_{SPL}$ ]
$L_E$	Schallenergiegedichtepegel [ $dB_{SPL}$ ]
$L_{eq}$	Energieäquivalenter Dauerschallpegel [ $dB_{SPL}$ ]
$L_{ETHRQ}(f)$	Anregungspegel an absoluter Hörgrenze
$L_{hf T}$	Mittelwert der Lautstärkepegel der Terzbereiche 25-27 [ $dB_{SPL}$ ]
$L_m$	Mittlere Steigung relativ zum Maximum des Schalldruckpegels
$L_m^*$	Maximale Steigung relativ zum Maximum des Schalldruckpegels
$L_p$	Schalldruckpegel [ $dB_{SPL}$ ]
$L_S$	Lautstärkepegel [phon]
$L_T$	Schalldruckpegel [ $dB_{SPL}$ ]
$L_{tf T}$	Mittelwert der Lautstärkepegel der Terzbereiche 11-14 [ $dB_{SPL}$ ]
$N$	Lautheit [sone]
$N'$	Spezifische Lautheit [ $\frac{sone}{bark}$ ]
$N_{ESI}$	Lautheit impulshafter Schalle nach Boulet [sone]
$N_{hf T}$	Mittelwert der Lautheit von Bark 2-4 [sone]
$N_j, N_k$	Kumulierte Häufigkeit

---

$N_m$	Mittlere Steigung relativ zum Maximum der Lautheit
$N_m^*$	Maximale Steigung relativ zum Maximum der Lautheit
$N_{tft}$	Mittelwert der Lautheit von Bark 18-21 [sone]
$N_{TVL}$	Lautheit nach Moore und Glasberg (time-varying loudness) [sone]
$N_5$	95-% Perzentil der Lautheit [sone]
$R$	Rauigkeit [asper]
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$R_{adj}^2$	Korrigiertes Bestimmtheitsmaß
$R_0$	Absolutschwelle des physikalischen Reizes
$R_5$	95-% Perzentil der Rauigkeit [asper]
$R_p$	Physikalische Reizstärke
$S$	Schärfe [acum]
$S_{max}$	Maximum der Schärfe [acum]
$S_{50}$	50-% Perzentillautheit [sone]
$T$	Zeit [s]
$T_d$	Abfallzeit [s]
$T_S$	Dauer des Schärfe des Signals [s]
$U_i$	Berechneter U-Wert
$U_{krit}$	Kritischer U-Wert als statistische Referenz im U-Test
$Z$	Schallkennimpedanz [ $N \frac{s}{m^3}$ ]
${}_nC_3$	Maximale Anzahl zirkulärer Triaden
${}_xR_i^n$	Transformationsobjekt der BTL-Skala
$b_0$	Abszissenwert nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate
$b_1$	Regressionskoeffizient bei einer unabhängigen Variable
$b_j$	Regressionskoeffizient bei mehreren unabhängigen Variablen
$c$	Konstante (Schärfe nach Zwicker)
$d$	Anzahl zirkulärer Triaden
$dE$	Differentielle Änderung der Empfindungsstärke
$dF$	Anzahl der Freiheitsgrade
$dR_x/R_x$	Relative Änderung der Reizstärke
$df$	Änderung der Frequenz
$e_k$	Residuum nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate
$f$	Frequenz [Hz]
$f_m$	Bandmittelfrequenz [Hz]
$f_{Sp}$	Frequenzabhängiger Schwerpunkt des Signals [Hz]
$f_{Sp}^{(A)}$	Frequenzabhängiger Schwerpunkt des Signals, A-bewertet [Hz]
$g_A(z)$	Gewichtungsfunktion der Schärfe nach Aures
$g_Z(z)$	Gewichtungsfunktion der Schärfe nach Zwicker
$g_{1,2}$	Empirisch ermittelte Konstanten bei der Berechnung der <i>psychoacoustic annoyance</i> nach Zwicker
$i$	Laufvariable
$k$	Konstante
$m$	Anzahl an Objekten / Stimuli
$n$	Rezeptorspezifischer Exponent

---

$n_M$	Ausprägung eines Merkmals
$n_{1,2}$	Anzahl der Werte einer Stichprobe
$p$	Schalldruck [Pa]
$\tilde{p}_{eff}$	Effektiver Wechselschalldruck [Pa]
$p_s$	Signifikanz
$p_0$	Bezugsschalldruck [Pa]
$q$	Empirisch ermittelter Faktor
$r$	Rangkorrelationskoeffizient
$r_k$	Rang subjektiver Empfindung
$r_{krit}$	Kritischer Wert bei der Korrelationsanalyse nach Pearson
$s_d$	Standardfehler
$t_c$	Kritischer t-Wert nach der Student-Verteilung
$t_{emp}$	Empirisch ermittelter t-Wert im Zweistichproben-t-Test
$t_{min}$	Dauer des Signals oberhalb eines Grenzwertes [s]
$t_{sp}$	Zeitlicher Schwerpunkt des Signals [s]
$t_{tab}$	Tabellarischer t-Wert im Zweistichproben-t-Test
$w_{jk}$	Distanz zweier Objekte $j$ und $k$
$\bar{x}$	Arithmetischer Mittelwert
$x_i$	Laufvariable für Messwerte
$\hat{y}$	Regressand einer multivariaten Analyse
$\bar{y}$	Arithmetischer Mittelwert
$z$	Frequenzgruppe [bark]
$\Delta i$	Abschwächfaktor der Terzpegel

## Griechische Symbole

---

$\alpha$	Irrtumswahrscheinlichkeit
$\beta$	Empirisch ermittelter Exponent der Geräuschenergie (Lautheit Boulet)
$\beta_i$	Regressionskoeffizient
$\gamma$	Exponent (Lautheit Moore und Glasberg)
$\delta$	Empirisch ermittelter Exponent der Abfallzeit (Lautheit Boulet)
$\lambda$	Eigenwert
$\mu$	Erwartungswert der allgemeinen Dichtefunktion
$\sigma$	Standardabweichung
$\sigma^2$	Varianz
$\chi^2$	Symbol für statistischen Test auf konsistentes Antworten

---

# Abkürzungen

---

ADSR	Attack, Decay, Sustain, Release- Hüllkurvenmodell
AFNOR	Association Francaise de Normalisation
ANSI	American National Standards Institute
DLM	Dynamic Loudness Model nach Chalupper und Fastl [33]
ELC(f)	Isophone (equal-loudness level contour)
ERB	Äquivalente rechteckige Bandbreite (equivalent rectangular bandwidth)
KS	Körperschall
KMO	Kaiser-Maier-Olkin-Maß
LS	Luftschall
MAF(f)	Ruhehörschwelle nach [47] (minimum audible field)
Mw	Arithmetischer Mittelwert
PA	Psychoakustische Lästigkeit (psychoaoustic annoyance)
RPC	Rapid Prototyping Center (BMW AG)

# Konstanten

---

$I_0 = 10^{-12} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$	Bezugsschallintensität
$P_0 = 20^{-6} \left[ Pa \right]$	Bezugsschalldruck
$Z_0 = 400 \left[ N \frac{s}{m^3} \right]$	Schallkennimpedanz

# Kurzfassung

Die Bewertung der kundenspezifischen Empfindungen und der kognitiven Erwartungen an die akustische Qualität von Fahrzeugen stellt einen wesentlichen Bestandteil des Designprozesses von Funktionsgeräuschen dar. Da die auditive Wahrnehmung des Menschen eine Vielzahl an Dimensionen umfasst, können die individuellen Anforderungen an die akustische Güte nur äußerst aufwendig erfüllt werden. Hierbei beeinflussen impulsartige Geräusche die wahrgenommene Qualität des gesamten Fahrzeugs besonders beim ersten Kontakt des Kunden mit dem Produkt maßgeblich. Die vorliegende Arbeit stellt einen ganzheitlichen Ansatz vor, mit dem die wahrgenommene Geräuschqualität ziel führend anhand psychoakustischer Metriken vorhergesagt werden kann. In einem ersten Schritt wurden physikalische und psychoakustische Parameter entsprechend der verbalen Deskriptoren der qualitativen Bewertung von Geräuschen des Türgriffschnappens abgeleitet. Anschließend wurden Hörversuche für Verriegelungsgeräusche und Türzuschlaggeräusche nach den Methoden des paarweisen Vergleichs und der kategorialen Bewertung durchgeführt. Basierend auf den erarbeiteten Ergebnissen zeigten lineare Regressionsanalysen eine signifikante Vorhersagegenauigkeit für zwei psychoakustische Parameter. Dies sind die bekannte und allgemein akzeptierte Perzentillautheit  $N_5$  sowie die Dauer der Schärfe, die im Rahmen dieser Arbeit erstmals betrachtet wurde. Deren relativer Beitrag zum subjektiven Qualitätsempfinden hängt vom jeweiligen Signaltyp ab. Der Einfluss der beiden Parameter auf die Geräuschqualität wurde mithilfe weiterer Experimente zum Geräusch des Rückschnappens von Blinkerhebeln bestätigt. Somit konnte die entwickelte Methode erfolgreich auf ein unabhängiges impulsartiges Fahrzeuggeräusch angewandt werden. Weiterhin wurde die parametergestützte Vorhersage der Perzentillautheit und der Dauer der Schärfe an mehrfach impulsartigen Geräuschen untersucht. Für die Signale der Warnblinkanlage korrelierte die objektive Prognose hoch mit dem subjektiven Qualitätsempfinden. Final wurde die Geräuschqualität des Türzuschlags und des Rückschnappens des Blinkerhebels kulturübergreifend bewertet. Mithilfe einer Metrik bestehend aus beiden psychoakustischen Parametern konnte die Signifikanz der Prognose nachgewiesen werden. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass eine lineare Kombination der Perzentillautheit  $N_5$  und der Dauer der Schärfe eine geeignete Basis für die qualitative Bewertung von impulsartigen Fahrzeuggeräuschen darstellen. Im Allgemeinen muss deren relativer Einfluss an einem neuen Signaltyp angepasst werden. Abschließend wurde eine umfassende Methodik für eine objektive Beschreibung und Prognose der Geräuschqualität von Fahrzeugen entwickelt.

# Abstract

The evaluation of customers' perceptions and cognitive expectation on acoustic quality is a key element in the designing process of vehicle sounds. As the human auditory perception comprises multiple dimensions, the degree of fulfilling the customers' requirements on acoustic quality is a complex task. In this respect, impulsive sounds have a substantial influence on perceived quality since they are the decisive sounds at the first contact between the customer and the vehicle inside a dealership. This study presents a holistic approach that allows predicting their perceived sound quality focusing on psychoacoustic metrics. In a first step, significant physical and psychoacoustic parameters were derived from verbal descriptors assessing the quality of door handle snapback sounds. Paired comparison tests and categorical scale judgments were carried out for door locking and door closing sounds. Based on the generated results, linear regression analysis revealed a significant predictive accuracy for two psychoacoustic parameters, namely the well-known and generally accepted percentile loudness  $N_5$  as well as the duration of sharpness  $T_S$  that was first considered in this study. Their relative contribution depends on the considered sound type. The influence of these parameters was confirmed in additional experiments evaluating the perceived quality of snapback sounds. Thus, the developed method was applied successfully for an independent impulsive vehicle sound. Furthermore, the predictive accuracy of the percentile loudness and the duration of sharpness was analyzed regarding multiple impulsive signals. As a result, the perceived quality of the signals showed high correlation. Finally, both psychoacoustic parameters revealed significant predictability within a cross-cultural analysis on sound quality of door closing and indicator snapback sounds. Overall, the data show that a linear combination of these parameters with signal type specific adjustments on their significance can serve as a good basis for the qualitative assessment of impulsive vehicle sounds. In conclusion, a comprehensive method was developed to impartially describe and predict perceived vehicle sound quality.



# Kapitel 1

## Einführende Bemerkungen

“Wer nichts verändern will, wird auch das verlieren, was er bewahren möchte“. Dieser Gedanke des einstigen Bundespräsidenten Gustav W. Heinemann [98] steht übertragen auf die Entwicklung moderner Automobile sinnbildlich für das Streben nach technischer Perfektion und nach emotionaler Begeisterung. Einen wichtigen Beitrag hierfür leisten messbare Größen wie die Leistungs- und Drehmomentkurven, die Raummaße des Fahrzeugs oder dessen Reichweite. Diese Merkmale stehen seit langem im Mittelpunkt der Entwicklung moderner Fahrzeuge. Sie bieten dem Kunden die Möglichkeit, seine persönlichen Erwartungen an das Fahrzeug anhand funktionaler und quantitativer Eigenschaften zu formulieren. Allerdings werden derartige Anforderungen immer schneller und präziser durch strategische und technische Lösungen erfüllt - ein Prozess der Sättigung entsteht. Deshalb rücken zunehmend subjektive, qualitative und komfortbasierte Produktkriterien zusätzlich in den Fokus der automobilen Entwicklung. Vor allem haptische, optische, akustische und immer mehr auch olfaktorische Reize sollen bewusst empfunden werden. Erfüllen oder übertreffen diese Reize die individuellen Erwartungen an das Design der industriellen Produkte, kann dies zur Zufriedenheit des Kunden führen und auf eine hohe Wertigkeit hinweisen [19], [106]. Zwangsläufig müssen hierfür alle qualitativ wahrnehmbaren Kriterien mit der kundenspezifischen Erwartungshaltung an das Gesamtprodukt und abhängig vom Kontext der jeweiligen Situation übereinstimmen [17], [77], [89], [92]. Allerdings kann die Güte von Geräuschen und deren individuelle Wahrnehmung auch von kulturellen Faktoren abhängen [90], [117], [134]. Damit stellt die akustische *Qualität* eine äußerst komplexe, stark wertbehaftete Größe der menschlichen Empfindung dar. Das Ziel eines Entwicklungsprozesses ist es deshalb auch, ein übergreifendes Verständnis für ein markenspezifisches und repräsentatives Image abzuleiten und eine qualitative Differenzierung zum Wettbewerb zu erreichen. In diesem Zusammenhang bieten die akustischen Reize ein bedeutendes und wachsendes Potential, um die erlebbare Qualität eines Fahrzeuges zu verbessern [193].

### 1.1 Aufgabenstellung und Motivation

Das akustische Wohlbefinden und der individuelle Komforteindruck wird während unterschiedlicher Fahrsituationen durch die Antriebs-, Wind- und Rollgeräusche [77] maßgeblich beeinflusst. Im Stillstand dagegen wird das wahrnehmbare Klangerlebnis von den elektromechanischen Verstellgeräuschen sowie den impulshaften Signalen von Türen, Klappen und funktionalen Elementen dominiert. Hier fehlen die optischen Reize des

bewegten Fahrens sowie die akustischen Maskierungseffekte des Motors oder der Reifen. Derartige Bedingungen führen zu einer erhöhten Aufmerksamkeit und Konzentration auf die akustischen Merkmale des Produkts. Dabei nimmt der Kunde den Klang der von ihm aktiv betätigten Druckknöpfe [103], Hebel oder Türen explizit wahr. Er assoziiert die akustische Wertigkeit kaufentscheidend mit der Qualität des Gesamtfahrzeuges [36], [29]. Dabei erweisen sich die komplexen und vielfältigen Erwartungen an die Geräuschqualität, deren übergreifende Abbildung und schließlich deren objektive Beschreibung oft als große Herausforderung an die Fahrzeughersteller.

Als wegweisend für den Kauf eines Fahrzeuges gilt der Schlüsselmoment während des ersten Kontaktes des Kunden im vorrangig ruhigen Verkaufsraum [204]. Hier erfolgt die qualitative Bewertung aller erlebbaren Geräusche erfahrungsbasiert und absolut. Ein relativer Vergleich zu Modellen des Wettbewerbs ist nur schwer realisierbar. Ausgelöst werden die Funktionsgeräusche durch eine aktive Handlung des Kunden [204] und beinhalten sowohl qualitative als auch funktionale Informationen [21], [76], [149]. Da die impulshaften Geräusche zudem auf einer schnellen Änderung der Reizgröße des Schalldrucks basieren, reagiert das menschliche Gehör sehr sensibel auf diesen Signaltyp [2], [20], [210]. Verglichen mit einem vorrangig konstanten Energieeintrag lösen plötzliche, für das Gehör überraschende Variationen eine erhöhte sensorische Intensität und damit eine signifikante Aufmerksamkeitswirkung aus [210]. Um diese komplexen Anforderungen im situativen Kontext der menschlichen Wahrnehmung gezielt abbilden zu können, müssen die vorherrschenden Randbedingungen, die ausgelösten Emotionen sowie der kognitive Prozess einer sensorischen Bewertung [108] berücksichtigt werden. Gemäß Abbildung 1.1 geschieht dieser Vorgang allerdings rein subjektiv. Das tatsächliche Erlebnis bleibt allein dem Kunden vorbehalten [77]. Dabei werden die als *Qualia* bezeichneten Wahrnehmungsqualitäten durch jene Eigenschaften bestimmt, welche aus der Empfindung eines physikalischen Reizes hervorgehen. Dieser Reiz ist allerdings, im Gegensatz zu den durch ihn ausgelösten kognitiven und neuronalen Effekten, direkt messbar. Zum Ausdruck kommen die Ergebnisse der wahrnehmungsbasierten Reizverarbeitung schließlich im reaktiven Verhalten des Menschen. Somit kann das auditive Qualitätsempfinden nur durch eine Gegenüberstellung der menschlichen Reaktion mit den inhärenten Merkmalen des akustischen Reizes beschrieben werden.

Mit dem deskriptiven Zusammenhang zwischen einem Reiz und einer Empfindung setzen sich die Fahrzeugingenieure im Rahmen ihrer Entwicklungsarbeit auseinander. Sie streben nach einer Möglichkeit, die vom Kunden als hochwertig beschriebene Qualität durch technische Lösungen im Produkt zu verankern. Deshalb werden vielfach semantische Abfragen durchgeführt, um die relevanten Eigenschaften eines Funktionsgeräusches ableiten zu können. Allerdings kann das auditive Qualitätsempfinden nur mithilfe abgestimmter Metriken systematisch und reproduzierbar beschrieben und vorhergesagt werden. Ein zielgerichteter Transfer, bei dem das Ergebnis der semantischen Abfrage zur Auswahl von deskriptiven Parametern führt, hat bisher kaum stattgefunden. Da akustische Phänomene durch die virtuelle Absicherung und die methodische Auslegung von Konzepten nur eingeschränkt erfasst werden können, werden qualitative Maßnahmen durch Experten zumeist erst kurz vor Serienanlauf kostenintensiv umgesetzt und wirksam. Die Entscheidungen basieren vorrangig auf ersten Prototypen und können

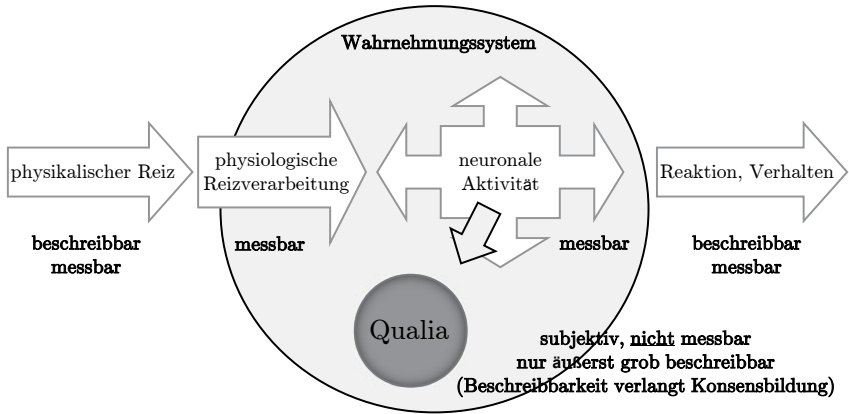


Abbildung 1.1: Schematische Grafik zur Erklärung der Wahrnehmungsqualitäten nach [77]; eigene Darstellung. Die Wahrnehmung von Qualität geschieht rein subjektiv und ist im Gegensatz zum auslösenden Reiz und der individuellen Reaktion nicht messbar.

sich von der klassischen Erwartungshaltung des Kunden unterscheiden. Zudem ist die Bewertung erst zu einem fortgeschrittenen Zeitpunkt der Entwicklung möglich, da der Entwicklungsstatus der Fahrzeuge hierfür eine gewisse Reife verlangt. Aufgrund der wachsenden Anforderungen an die erlebbare Qualität und die auditive Wertigkeit von Fahrzeugen kann eine derartige Vorgehensweise verbunden mit einer stetig steigenden Anzahl an Derivaten sowie einer verkürzten Entwicklungsdauer nicht länger vertreten werden.

Die vorliegende Arbeit soll daher die qualitative Wirkung von singular impulshaften Fahrzeuggeräuschen auf die auditive Wahrnehmung näher beleuchten. Um die akustische Wertigkeit eines solchen Geräusches beeinflussen zu können, wird, wie in Abbildung 1.1 angedeutet, ein tiefgreifendes Verständnis des Zusammenhangs zwischen den physikalischen Reizen und deren sensorischer Bewertung durch den Menschen benötigt.

## 1.2 Stand der Forschung

Den Gegenstand der vorliegenden Arbeit bildet die Entwicklung einer Methode zur Objektivierung des auditiven Qualitätsempfindens von singular impulshaften Fahrzeuggeräuschen. Der Begriff *objektiv* bezeichnet dabei die parametrische oder modellbasierte Beschreibung einer *subjektiv* mittels Experiment abgefragten Empfindung. Anhand des schematisch in Abbildung 1.2 dargelegten akustischen Transferpfades am Automobil soll der gegenwärtige Stand der Forschung zu diesem Thema gezeigt werden. Das Ziel ist es, die relevanten Aspekte, beginnend mit dem physikalischen Reiz bis hin zur subjektiven

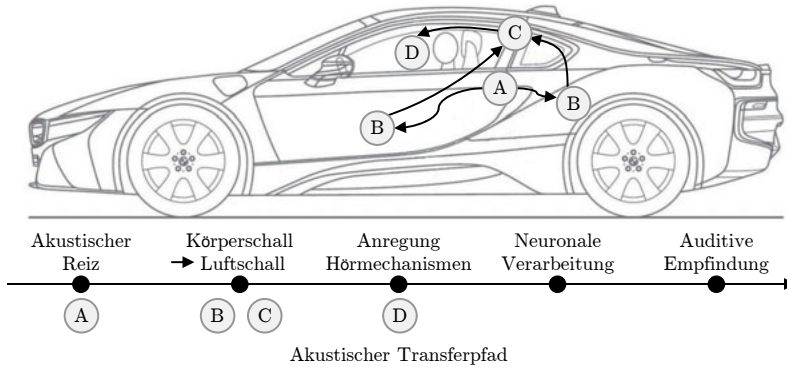


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung des akustischen Transferpfads am Automobil, exemplarisch gezeigt am Geräusch des Türzuschlags. (A) Akustischer Reiz, (B) Fluid- und Strukturschwingungen, (C) Luftschall, (D) Schalldruck am Außenohr.

Empfindung von Geräuschqualität und deren objektiver Abbildung, zu veranschaulichen. Da wichtige Beiträge mitunter aus differierenden Disziplinen hervorgehen, werden diese im Folgenden gebündelt präsentiert.

Einleitend werden die akustischen Reize am Gesamtfahrzeug anhand ihrer klassischen Merkmale thematisiert und unterschiedliche Methoden der subjektiven Bewertung aufgezeigt. Es schließt eine detaillierte Betrachtung von aktiv ausgelösten Funktionsgeräuschen an. Deren komplexe Charakteristik und deren mehrdimensionale Wirkung auf das auditive Empfinden und die damit einhergehenden psychologischen Vorgänge werden näher beleuchtet. Darauf aufbauend werden ausgewählte Parameter und Methoden zur Objektivierung der sensorischen Wahrnehmung von Geräuschen beschrieben. Abschließend wird der qualitative und wirtschaftliche Mehrwert eines Transfers der entwickelten Metriken in die praktische Anwendung diskutiert.

### Die akustischen Reize am Gesamtfahrzeug

Das emotionale und individuelle Erleben eines Fahrzeuges geschieht sowohl im Stillstand als auch in den vielfältigen Zuständen während der Fahrt. Abhängig von der Situation entwickelt der Kunde dabei eine entsprechende Erwartungshaltung an die wahrnehmbaren Signale. Vor allem deren akustische Qualität und die übermittelten Informationen beeinflussen das subjektive Urteil.

Während der Fahrt wird die Geräuschkulisse je nach Geschwindigkeit durch die Komponenten des Antriebs-, des Wind- und des Rollgeräusches dominiert [51], [204]. Im Unterschied zum Windgeräusch ergeben sich infolge der Anregungen des Antriebs und der Rad-Boden-Kontraktion zusätzlich zum Luftschall (LS) auch Körperschallanteile (KS). Diese führen beispielsweise zu Vibrationen am Sitz oder am Lenkrad. Derartige

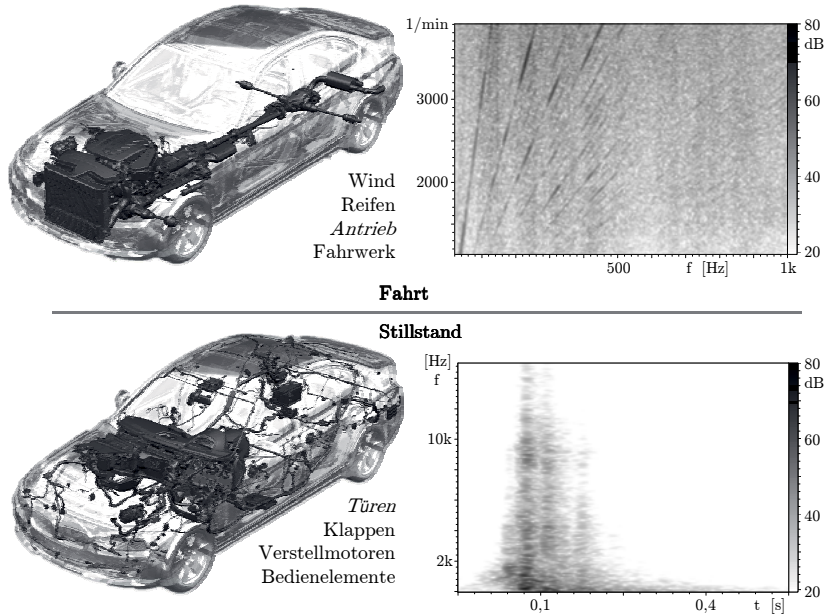


Abbildung 1.3: Quellen akustischer Reize am Gesamtfahrzeug, exemplarische Zusammenstellung. Oben: Volllastbeschleunigung eines Fahrzeugs mit Vierzylinder-Benzinmotor. Unten: Geräusch des Türzuschlags der Fahrertür eines Mittelklasse-Vans.

Phänomene nehmen in der Entwicklung von fahrzeugspezifischen Konzepten eine bedeutende Rolle ein und führen zu definierten Anforderungen an das jeweilige Klangbild. Für Limousinen der Oberklasse steht dabei der akustische Komfort mit leisen, wenig wahrnehmbaren Geräuschen im Vordergrund. Bei sportlichen Fahrzeugen hingegen soll die assoziierte Dynamik durch eine gezielte Motorakustik mittels präselektierter Abgasanlage unternalt werden. Exemplarisch zeigt Abbildung 1.3 oben das Campell-Diagramm des Motorhochlaufs eines Fahrzeuges, beginnend bei der Leerlaufdrehzahl bis zur Volllast. Als dunkle Linien höherer Pegel sind die Motorordnungen zu erkennen. Sie resultieren aus einer übereinstimmenden Frequenz von mehrfach impulshaften Schallemissionen des Motors und dessen Umdrehungsfrequenz oder Vielfachen davon. Abhängig von der Zylinderzahl gilt deren Ausprägung als entscheidend, um einen sportlichen Klangcharakter hervorzurufen [150], [204].

Für eine qualitative Wertung von Geräuschen führte von Bismarck [14] das Semantische Differential als Evaluierungsmethode ein. Dieser Forschungsansatz geht auf Charles Osgood zurück, der die drei Wahrnehmungsdimensionen *Evaluation*, *Potency* und *Activity* als grundlegend beschrieben hat [122], [139]. Hiermit konnte die auditive

Wahrnehmung anhand der zu bewertenden, kontradiktorischen Begriffe erfasst und in gezielte klangliche Anforderungen umgesetzt werden. Von dieser Möglichkeit profitierte vor allem der Automobilsektor, da nun die Erwartungen der Kunden verbal definiert werden konnten. Basierend auf dem akustischen Eindruck im Fahrzeuginnenraum entwickelten Handmann und Bodden [89] ein Qualitätsprofil, mit dem sie die Güte von Motorgeräuschen in unterschiedlichen Fahrzuständen bewerten ließen. So erwartet der Fahrer während der Beschleunigungsphase einen eher kräftigen akustischen Eindruck. Im Leerlauf dagegen soll der Schallpegel so gering wie möglich ausfallen. Um den multidimensionalen Wahrnehmungsraum für Motor- und Antriebsgeräusche innerhalb und außerhalb des Fahrzeuges vergleichen zu können, untersuchten Altinsoy et al. [3] eine Vielzahl an deskriptiven Adjektiven. Dabei stimmte ein Großteil der Begriffe für die subjektive Bewertung von Innen- und Außengeräuschen überein.

Patsouras [142], [143] und Hashimoto [91] legten den Fokus ihrer Forschungen auf die Schallabstrahlung von Dieselmotoren. Patsouras verglich die psychometrischen Methoden der Größenschätzung mit Ankerschall, Random Access und Semantisches Differential hinsichtlich der qualitativen und quantitativen Beurteilung der psychoakustischen Empfindungsgrößen. Aus den Ergebnissen ließ sich ein signifikanter Zusammenhang zwischen einzelnen Adjektivpaaren und objektiv beschreibbaren Parametern ableiten. Es wurde festgestellt, dass die relative Lautheit erwartungsgemäß mit den Begriffen *laut*  $\leftrightarrow$  *leise* korrelierte. Die Untersuchungen von Hashimoto zur Impulshaftigkeit von Motorsignalen führten zu einer qualitativen Metrik, die eine hohe Korrelation zu den subjektiven Bewertungen aufwies. Hierbei wurden die Signale im Zeitbereich sequentiell analysiert und anschließend gemittelt zu einem repräsentativen Wert zusammengefasst. Weitere semantische Untersuchungen gehen auf Namba und Kuwano [118] sowie Stefens [176] zurück. Letzterer untersuchte die Urteilsbildung bei Innengeräuschen von Elektrofahrzeugen.

Vor Antritt und nach Abschluss einer Fahrt rücken Geräusche in den Fokus der menschlichen Wahrnehmung, die explizit durch eine aktive Handlung ausgelöst werden. Hierzu zählen die Emissionen elektrisch angesteuerter Verstellmotoren, deren Struktur zu meist auf schmalen Frequenzbereichen hoher Lautstärke samt zugehöriger Ordnungen basiert [77], [160]. In Abbildung 1.3 unten befindet sich ein Fahrzeug mit diversen Elektromotoren, die allgemein zu einem erhöhten Komfort beitragen. So verlangt ein Geräusch, welches als qualitativ hochwertig eingestuft werden soll, eine idealisierte, konstante Drehzahl mit einer mehrfachen Periodizität der Trägerfrequenzen und einer sinusförmigen Modulation.

Im Unterschied dazu weisen passive Funktionsgeräusche von Türen, Klappen oder funktionalen Bedienelementen einen impulshaften Energieeintrag von kurzer Dauer auf [149]. Sie stellen meist singuläre Ereignisse dar, deren akustische Merkmale abhängig von der Karosserieform und den angebundenen Bauteilen variieren. Am Beispiel von Fahrzeugtüren entwickelte Liebing [121] ein Bewertungsverfahren für transiente Funktionsgeräusche, welches auf der Methode des Semantischen Differentials beruht. Er identifizierte sechs Faktoren, mit denen ein Türgeräusch im Wesentlichen beschrieben werden kann. Exemplarisch zeigt Abbildung 1.3 unten rechts ein solches Signal. Da mehrere Impulse schnell aufeinander folgen, gilt dieses Türgeräusch als nicht wertig.

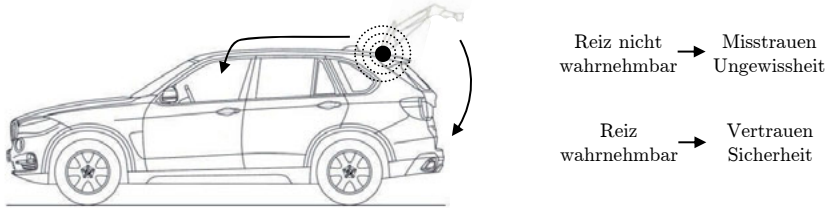


Abbildung 1.4: Informative und qualitative Bedeutung von akustischen Reizen; eigene, schematische Darstellung am Automobil abgeleitet nach [21], [76], [149]. Ist der Schließvorgang der Heckklappe wahrnehmbar, empfindet die beteiligte Person Vertrauen und Sicherheit.

### Passive Funktionsgeräusche als Informationsträger und Qualitätsmerkmal

Beim Erstkontakt mit dem Fahrzeug und im Besonderen während des Einstiegs nimmt der Kunde eine Vielzahl an mechanischen und funktionalen Geräuschen wahr und bewertet diese qualitativ. Mit dem subjektiven Urteil geht eine spezifische Gewichtung der sensorischen Wahrnehmungsmodalitäten einher. In diesem Zusammenhang weisen Haverkamp [92] und Blauert [17] darauf hin, alle wahrnehmbaren Kriterien des Produktes gemäß der Erwartungshaltung des Kunden aufeinander abzustimmen. Das Ziel ist es, die Interessen des Einzelnen zu erfüllen oder gar zu übertreffen und durch das Design sowie die erlebbaren Merkmale eine hohe Zufriedenheit hervorzurufen [19], [106]. Deshalb konzentrieren sich die Fahrzeughersteller zunehmend auf die auditive Empfindung des Menschen, um damit einen repräsentativen Maßstab für die subjektive Bewertung der Geräuschqualität abzubilden [74]. So kommt dem akustischen Klangbild von Türen [13], Klappen und funktionalen Elementen eine besondere Bedeutung zu [204]. Hierfür ist in Abbildung 1.4 exemplarisch der Vorgang einer automatischen Heckklappe dargestellt. Liegen die akustischen Reize nicht vor oder können sie aufgrund maskierender Effekte nicht wahrgenommen werden, fehlt die notwendige Information über den erfolgreichen Abschluss der Handlung. Folglich wird ein Gefühl von Misstrauen und Ungewissheit impliziert, was schließlich zur Annahme minderwertiger Qualität führt. Im Gegensatz dazu kann ein wahrnehmbares und zugleich hochwertiges Geräusch die Erwartungen des Kunden erfüllen und damit Vertrauen und Sicherheit hervorrufen.

Die meist ruhige Umgebung im Verkaufsraum und im Stillstand des Fahrzeuges sowie die fehlenden optischen Umgebungsreize während einer Fahrt definieren die vorherrschenden Randbedingungen. So bewertet der Kunde die Qualität des gesamten Produktes anhand der akustischen Merkmale des Türschließens, ohne den eigentlichen Effekt des Fahrens erlebt zu haben [18], [115], [122]. Für das Wertigkeitsempfinden von Haushaltsgeräten gilt ein ähnliches Phänomen. Altinsoy [1], [2] beschrieb den Einfluss von Anschlaggeräuschen als ausschlaggebend für die gesamte Produktqualität. Bei Waschmaschinen definierte er ein impulshaftes Zielgeräusch, welches auf die funktionale Güte des Waschvorganges schließen ließ. In diesem Zusammenhang empfohlen van der Auweraer et al. [9] eine detaillierte Analyse der Signale im Zeit- und Frequenzbereich. Dadurch

sollten die inhärenten Merkmalsausprägungen der qualitativen Wahrnehmung gegenüber gestellt werden. Gemäß seinen Untersuchungen zum Türzuschlaggeräusch zeigte die semantische Bewertung des Begriffs *solidity* eine gute Übereinstimmung mit den relevanten Geräuschattributen. Die wahrgenommene Lautstärke konnte dagegen nicht als alleiniger Deskriptor herangezogen werden. Auf Basis der Forschungen von Parizet et al. [141] entstand ein semantischer Ansatz, der das bevorzugte subjektive Urteil in Form von *verbalen Bildern* darstellt und dabei die signifikanten Geräuschcharakteristika andeutet. So kommt den Begriffen *scharf* und *laut* eine hohe Bedeutung zu, um das Wertigkeitsempfinden von Fahrzeugtüren qualitativ abzubilden.

Anhand weiterer Faktoren werden die komplexen Anforderungen an die erlebbaren Merkmale der mechanischen Funktionsgeräusche deutlich. Gemäß Lyon [127] gilt es, dem Kunden eine Information über den technischen Zustand zurückzuspiegeln und parallel eine Akzeptanz der akustischen Qualität hervorzurufen. Derartige qualitative Aspekte liegen dem Signal nicht von vornherein zugrunde und sind nicht von einer Fahrzeugklasse auf eine andere übertragbar [77]. Vielmehr existieren sie nur in einer mehrdimensionalen Verbindung mit dem Geräuschkomfort, welcher ebenfalls allein durch den Abgleich der subjektiven Wahrnehmung mit der individuellen Erwartungshaltung entsteht. Stimmen die entscheidenden Kriterien innerhalb dieser Beziehung nicht überein, so entsteht *Diskomfort*. Dieser lässt ein vermeintlich hochwertiges Geräusch im situativen Kontext des jeweiligen Fahrzeugkonzeptes als ungeeignet erscheinen [75]. Wird beispielsweise ein kraftvoller und satter Türzuschlag bei einer Limousine der Oberklasse positiv bewertet, kann dies für einen sportlichen Kleinwagen irritierend wirken. Terhardt [187] spricht deshalb von *akustischem Wohlklang*, durch den die subjektive Erwartung an die akustische Wertigkeit kategorisierbar wird.

Das Zusammenspiel von Geräuschqualität und Geräuschkomfort soll hier anhand des Schließens der Heckklappe (siehe Abbildung 1.4) diskutiert werden. Betätigt der Fahrer einen in die Heckklappe integrierten Knopf, soll sie elektrisch schließen [149]. Neben der optischen wird eine akustische Rückmeldung des Schließvorgangs oder zu dessen Abschluss erwartet [76]. Als Informationsträger gelten das periodisch modulierte Signal des elektrischen Verstellantriebes sowie das finale Verriegeln der Heckklappe. Nimmt der Fahrer diese Geräusche wahr, so vertraut er folglich auf eine ordnungsgemäß geschlossene Heckklappe. Sind die Signale zudem im situativen Kontext abgestimmt, empfindet der Kunde eine eher hohe Geräuschqualität [12], [149]. Ähnlich verhält es sich mit dem Funktionsgeräusch des Blinkers und der Warnblinkanlage. Es geht ursprünglich auf den hörbaren Schaltvorgang eines Relais zurück. Heutzutage wird es durch ein synthetisches Lautsprechersignal initiiert. Dieses Signal wird vom Fahrer als akustische Bestätigung erwartet, obwohl der technische Fortschritt einen geräuschfreien Ablauf ermöglichen würde. Nicht nur der Klang des Geräusches entscheidet über die individuelle Zufriedenheit, sondern vielmehr dessen Existenz [21]. Identische Phänomene bestehen bei weiteren Bedienelementen im Fahrzeug. Deren qualitative Empfindung basiert zudem auf einer akustisch-haptischen Interaktion. Neben der akustischen Botschaft und der Wertigkeit des Geräusches beim Rasten eines Knopfes muss zugleich dessen Widerstand bei der Betätigung mit der subjektiven Erwartungshaltung übereinstimmen [69], [137].



## Menschliche Hörempfindung und deren Modellierung

Im Gegensatz zum Sehsinn kann sich der Hörsinn einem dargebotenen Reiz nicht entziehen. Bewusst oder unbewusst findet eine ständige, aktive Verarbeitung akustischer Informationen statt. Dennoch kann der Mensch einer einzelnen Stimme folgen, obwohl zeitgleich viele weitere Unterhaltungen stattfinden (Cocktail-Party-Effekt) [78]. Folglich gelingt es, zwischen notwendigen und vernachlässigbaren Merkmalen zu unterscheiden und diese qualitativ zu bewerten. Physikalisch erreichen aber allein Druckschwankungen das menschliche Trommelfell.

Hier setzt die psychoakustische Forschung an und versucht, die auditive Empfindung analog zu den messbaren Parametern der Naturwissenschaften zu beschreiben. Es stellt sich die Frage, in welcher Verbindung die physikalischen Reize zu den individuellen Empfindungen stehen und ob es einen funktionalen Zusammenhang geben kann? So muss eine messbare Größe zumindest um eine bestimmte, relative Stufe abweichen, damit ihre Änderung wahrgenommen werden kann. Basierend auf den Randbedingungen der menschlichen Hörfläche löst die relative Reizänderung  $dR_p/R_p$  multipliziert mit der empirischen Konstante  $k$  eine Modifikation der Empfindungsgröße  $dE$  aus. Diesen Zusammenhang beschreibt das Weber-Fechnersche Gesetz wie nachfolgend dargestellt [62], [87], [100], [196].

$$dE = k \cdot \frac{dR_p}{R_p} \quad (1.1)$$

Als untergliederte Sparte der Psychophysik widmet sich die Psychoakustik dem auditiven Wahrnehmungssinn sowie der Wechselwirkung zwischen der subjektiven Hörempfindung und den objektiv messbaren Signalparametern [125], [130]. Im Mittelpunkt der Forschungen stehen die multidisziplinären Aspekte physikalischer, physiologischer sowie psychologischer Fachbereiche [12]. Dadurch wird ein besseres Verständnis der akustischen Informationsverarbeitung und deren objektiver Abbildung ermöglicht [89], [125]. Für die quantitative Beschreibung einer Empfindungsgröße sollte die Abhängigkeit von meist mehreren physikalischen Reizgrößen beachtet werden. Gemäß Zwicker [209] weisen die Reizgrößen kontextspezifisch einen unterschiedlich starken Einfluss auf die Empfindungsgrößen auf. So wird die Lautstärkeempfindung maßgeblich durch die Reizgröße des Schalldruckpegels charakterisiert; die Frequenz als physikalischer Reiz dominiert die Tonhöhenempfindung. Einen derartigen Zusammenhang nennt Zwicker eine *Empfindungsfunktion*.

Zu den bedeutenden Empfindungsgrößen zählen die hörakustischen Parameter *Lautheit*, *Schärfe*, *Tonalität* und *Rauigkeit*. Sie sind im Gegensatz zum Qualitätsempfinden wertfrei. Wichtige Ergebnisse zum Verständnis der Lautheit finden sich in den Veröffentlichungen von Zwicker und Fastl [206], [209], [210], Moore und Glasberg [80], [130], [131] sowie Stevens [179]. Sie konzentrierten sich in ihren Untersuchungen zur Empfindung der Lautstärke auf synthetische Stimuli, die vorrangig in laborähnlicher Umgebung subjektiv bewertet wurden. Anhand der dabei gewonnenen Erkenntnisse leiteten sie Modelle und Metriken ab, die sie an realen, meist technischen Geräuschen validierten und weiterentwickelten. Auf dem Gebiet der Fahrzeugakustik interessiert etwa die empfundene Qualität von Verbrennungsmotoren oder von Geräuschen der menschlichen Interaktion [59], [115], [143]. Zudem werden die Auswirkungen instatio-

närer Effekte oder der Einfluss von Hördefiziten auf die menschliche Wahrnehmung betrachtet. Terhardt bietet dazu in [186], [187] eine umfassende Zusammenstellung. Weiterhin diskutierten mehrere wissenschaftliche Abhandlungen die Auswirkungen von physikalischen Signaleffekten der Lautstärke auf die auditive Empfindung der Lautheit [80], [114], [179], [208]. Einen Zusammenhang zwischen der subjektiven Bewertung der Lautstärke und entsprechenden Parametern untersuchten Kuwano et al. bei natürlichen und synthetischen Geräuschen [117]. Hierzu zählten die Schallemissionen von diversen Verkehrsmitteln aber auch Musik oder synthetisches Rauschen. Der Fokus ihrer Arbeit lag dabei auf einem Vergleich des kulturellen Urteilsverhaltens von deutschen und japanischen Personen. Während die deutschen Teilnehmer Musik und Sprache als lauter werteten, tendierten die japanischen Probanden dazu, Geräusche anhand der Schallenergie zu klassifizieren. Damit liegt ein kulturspezifischer Einfluss vor.

Die wesentlichen Studien zur Modellierung der psychoakustischen Schärfe gehen auf Aures [7], [8], von Bismarck [14], [16] und Zwicker [209], [210] zurück. Ihre Ansätze unterscheiden sich in der frequenzabhängigen Gewichtung der spezifischen Lautheit. Hierbei ist ein maßgeblicher Faktor der empfundenen Schärfe durch die spektrale Einhüllende des Geräusches gegeben. Demgegenüber gilt die Struktur der Frequenzanteile sowie der mit der Lautheit geringfügig ansteigende Schärfewert als relativ unbedeutend. Ebenfalls als eigenständige Empfindungsgröße beschreibt Heldmann [99] die Impulshaftigkeit. Sie geht aus seinen Untersuchungen von zeitabhängigen Merkmalen transienter und impulshafter Schalle hervor. Nach den Arbeiten von Sottek [175] und Hashimoto [91] bilden die Lautheit und die Schärfe wesentliche Aspekte der Impulshaftigkeit ab.

Für eine Vielzahl an Geräuschen kann das auditive Qualitätsempfinden ebenfalls anhand einer Kombination von mehreren psychoakustischen Grundgrößen beschrieben werden. Den maßgeblichen Beitrag hierfür leistet zumeist die Lautheit. Bodden und Heinrichs [24] zeigten mittels Schmalbandmodulationsanalysen bei Leerlaufgeräuschen von Dieselmotoren, dass die empfundene Qualität sowohl von der Lautstärke als auch von der Impulshaftigkeit abhängt. Ähnliche Untersuchungen führte Patsouras [142] durch, um die Geräuschqualität von Dieselfahrzeugen prognostizieren zu können. Eine hohe Korrelation zu den subjektiven Urteilen wies die Kombination der Parameter der Lautheit, des Crest-Faktors<sup>1</sup> und der Verteilung der Impulshöhen auf.

Die aufgeführten Aspekte zeigen das große Potential von kombinierten Metriken auf der Basis hörakustischer Parameter. Sie stellen einen zielführenden Ansatz zur objektiven Abbildung der empfundenen Geräuschqualität dar [59], [71], [77], [116], [185]. Im Bereich impulshafter Geräusche sei auf den Ansatz von Baird et al. [11] verwiesen, der IT-Geräte auf deren akustische Impulshaftigkeit untersuchte. Willemsen und Rao [201] nutzten diese Geräusche und entwickelten ihrerseits ein psychoakustisches Modell, welches die empfundene Lästigkeit objektiv beschreibt. Zu den signifikanten Prädiktoren zählen die Impulshaftigkeit  $I_N$  (DIN EN ISO 7779 [46]), das 95%-Perzentil der Lautheit  $N_5$ , der Median der Schärfe  $S_{50}$  sowie das 95%-Perzentil der Rauigkeit  $R_5$ . Weitere Studien an anderen Fahrzeuggeräuschen veranschaulichten zusätzlich, inwiefern die akustische Güte anhand unterschiedlicher Empfindungsgrößen abgebildet werden kann [2], [19], [72], [116], [158].

---

<sup>1</sup>Der Crestfaktor eines Signals ist definiert durch das Verhältnis von Spitzenwert zu Effektivwert.

Den mehrdimensionalen Parameter der *psychoacoustic annoyance* entwickelten Zwicker und Fastl [210] basierend auf den experimentellen Untersuchungen von Widmann [198], [199], [200]. Damit sollen nicht nur die inhärenten Signalattribute sondern auch kognitive und ästhetische Effekte für eine qualitative Bewertung von Geräuschen berücksichtigt werden. Um diese psychoakustische Lästigkeit  $PA$  samt quantitativer Skala und Einheit beschreiben zu können, gilt die folgende Beziehung

$$PA \sim N(1 + \sqrt{[g_1(S)]^2 + [g_2(F, R)]^2}) \quad (1.2)$$

zu den psychoakustischen Grundgrößen der Lautheit  $N$ , der Schärfe  $S$ , der Schwankungsstärke  $F$  sowie der Rauigkeit  $R$  ( $g_1, g_2$ : empirisch ermittelte Konstanten). Ein derartiges Vorgehen führt in der psychologischen Forschung zu einem neuen Bezugssystem, in das das menschliche Empfinden eingeordnet werden kann [125].

Gemäß dem Zusammenhang nach Gleichung (1.2) wird ein Geräusch primär als lästig empfunden, wenn es eine hohe Lautheit aufweist. Besonders technische Geräusche, die beispielsweise von Lüftern, von Werkzeugmaschinen wie Sägen und Fräsen oder von bewegten Fahrzeugen stammen, eignen sich für eine objektive Bewertung mittels der Lästigkeit [210]. Im Gegensatz dazu sollte ein Geräusch anhand seiner Qualität bewertet werden, wenn diese im situativen Kontext der Funktion oder des Produktes eine wesentliche Bedeutung einnimmt [2], [17], [89]. So trägt die Geräuschqualität einer Fahrzeugtür maßgeblich zur subjektiven Bewertung des gesamten Fahrzeugs bei, wohingegen das Schließen einer Wohnungstür eher mit Lärm, Sicherheit und Geborgenheit verbunden wird [20], [67], [68], [148].

Eine gegenwärtig noch komplexe Herausforderung stellt die Objektivierung von singular impulshaften Geräuschen dar. Sie weisen eine sehr kurze Dauer, ein breites Frequenzspektrum und einen steilen Energiegradienten auf [71]. Erst die jüngsten Entwicklungen führten zu anschaulichen Ergebnissen bei einer psychoakustischen Modellierung [57], [60], [72]. Allerdings wird die Signifikanz der deskriptiven Parameter sowie deren Belastbarkeit und Validität in der Literatur kontrovers diskutiert. Hier sei auf das verkaufskritische Geräusch des Türzuschlags hingewiesen. Einige Untersuchungen beschreiben die Lautheit als signifikanten Parameter, um die wahrgenommene Qualität objektiv abzubilden [20], [67], [68], [148]. Dieser Hypothese scheinen andere Veröffentlichungen zu widersprechen [9], [71], [96], [141]. Sie erachten kombinierte Metriken als zielführend oder konzentrieren sich auf frequenzbasierte Analysen im Zusammenhang mit der qualitativen Bewertung [71], [141], [148]. Weiterführende Diskussionen über den quantitativen Beitrag unterschiedlicher Assoziationen finden sich in semantischen Studien wieder. Sie variieren hinsichtlich der Dimensionen des Wahrnehmungsraumes sowie der deskriptiven Faktoren [96], [115]. Grundsätzlich wird für das Geräusch des Türzuschlags ein *satter Klang* vielfach als hochwertig akzeptiert. Zielführend wäre es deshalb, solch eine verbale Assoziation in klassische Parameter zur Objektivierung des Qualitätsempfindens überführen zu können. Ein derartiger methodischer Ansatz existiert zum jetzigen Zeitpunkt allerdings nicht vollständig.

Weitere Untersuchungen zu singular impulshaften Schallen beziehen sich auf die Empfindungsgrößen der Lautheit und der Schärfe, deren Korrelation gegenüber der empfundenen Geräuschqualität als signifikant beschrieben wird. Roberts et al. [154] veranschaulichten

dies bei den Analysen von Abschlaggeräuschen eines Golfballes. Die maßgebliche Bedeutung der Begriffe *laut* und *scharf* zeigte Altinsoy [1], [2], als er Anschlaggeräusche an Haushaltsgeräten verbal klassifizieren ließ. Er entwickelte hierzu eine psychoakustische Metrik, für die er die Lautheit nach DIN 45631/A1 [41] sowie die Schärfe nach von Bismarck [16] nutzte. Bei den Zuschlaggeräuschen von Fahrzeugtüren zählten die verbalen Deskriptoren *scharf* und *laut* nach Parizet et al. [141] zu den meist genannten Adjektiven. Weiterhin galt allein die spezifische Lautheit gemäß Genuit [71] nur als bedingt aussagekräftig, um die subjektive Empfindung abzubilden.

Unabhängig von der qualitativen Wahrnehmung eines Geräusches konzentrierten sich einige Arbeiten gezielt auf die menschliche Reaktion gegenüber singulären und impulshaften Signalcharakteristika. So analysierten Jeon und Jeong [109], [110] die wahrgenommene Lautstärke von impulshaft ausgelöstem Trittschall. Sie nutzten hierfür die akustischen Parameter von Ando [4] und von Zwicker [210], dessen Lautheitsmodell hohe Korrelationswerte ergab. Den differenzierenden Effekt von einzelnen, variabel in einem Signal angeordneten Impulsen auf die Geräuschlautstärke untersuchten Namba und Kuwano et al. [116], [120]. Im relativen Vergleich wies derjenige Stimulus eine als geringer wahrgenommene Lautstärke auf, bei dem sich die lautere Sequenz am Ende befand. Zudem wurde geprüft, ob die Lautstärkeempfindung von impulshaften Geräuschen unterschiedlicher Dauer und Abfallzeit mittels des physikalischen Schalldrucks nachgebildet werden kann [119]. Hier resultierte eine sehr gute Übereinstimmung sowohl für sinusförmige als auch für rechteckige Trägerfrequenzen. Mithilfe der Methode des Semantischen Differentials führten Hansen und Weber [90] eine interkulturelle Studie zur Wahrnehmung von tonalen Komponenten in Geräuschen durch. Gemäß der Faktoranalyse ergaben sich lediglich geringe Unterschiede zwischen den Kulturen, da die Anordnung der Adjektive im semantischen Raum weitestgehend ähnlich war. Darauf aufbauend fanden Untersuchungen statt, bei denen psychoakustische Parameter mit der subjektiven Bewertung der einzelnen Faktoren verglichen wurden. Bei den Dimensionen *metallic* und *timbre* lagen Abweichungen vor, für die die kulturellen Prägungen der Teilnehmer als verantwortlich gelten.

Das Potential, einzelne psychoakustische Parameter mittels numerischer Methoden zu beschreiben und zu berechnen, wird beispielsweise anhand des von Chalupper und Fastl entwickelten *Dynamic Loudness Model* (DLM) [33], [60] deutlich. Mithilfe dieses Modells kann mitunter die Lautheit stationärer und transienter Geräusche für normalhörende Personen berechnet werden. Bei Menschen mit Hördefizit ist dies nur eingeschränkt möglich (z.B. Rennies et al. [151], Verhey et al. [190]). Weiterhin analysierten Sottek et al. [173], [175] die gehörgerechte Beurteilung impulshafter Fahrzeuggeräusche und beschrieben deren Impulshaftigkeit anhand einer Metrik. Sie basiert auf den dynamischen Eigenschaften des menschlichen Gehörs bei transienten Schallpegelverläufen, wobei die Impulshaftigkeit mit steigendem Pegel und steileren Flanken zunimmt.

Diese vielfältigen Aktivitäten zeigen, weshalb einer objektiven Abbildung der empfundenen Qualität von bestimmten Schallereignissen und im Besonderen von impulshaften Geräuschen eine solch hohe Bedeutung zukommt. Sie sind aber auch ein Indiz für die hohe Komplexität und den eigenständigen Charakter derartig strukturierter Geräusche.

## Anwendung in der Praxis

Der wirtschaftliche Erfolg eines industriellen Gutes hängt entscheidend davon ab, inwiefern dessen Reize vom Kunden als hochwertig klassifiziert und akzeptiert werden [1], [17], [106]. Kann hierfür ein qualitativer Zusammenhang zwischen subjektiver und objektiver Bewertung gefunden werden, lassen sich technische Ziele für ein hochwertiges Produkt definieren, frühzeitig in den Entwicklungsprozess integrieren und somit direkt prüfen. Speziell im Bereich der Automobilität gilt es deshalb, die individuell an das erlebbare Produktdesign gerichteten Erwartungen zielführend zu erfüllen und die Identität eines Markenproduktes zu wahren. Einen maßgeblichen Beitrag leistet das fahrzeugspezifische Klangkonzept, welches eine qualitative Differenzierung zum Wettbewerb ermöglicht. Dabei muss der Frage nachgegangen werden, welche Faktoren signifikant zu einem hochwertigen Geräusch beitragen [19], [22]. Das hierfür notwendige Verständnis muss die mehrdimensionale Wirkung der hör- und erlebbaren Merkmale auf das auditive Qualitätsempfinden [3] berücksichtigen. Mit dessen Kenntnis können relevante Geräuschmerkmale strategisch und konzeptionell ausgelegt werden, damit ein in sich stimmiges, zum Objekt passendes Gesamtbild entsteht [150].

Entsprechend der genannten Aspekte skizziert Genuit [73], [77] ein allgemeines Schema zur qualitativen Bewertung von Produktgeräuschen. In einem ersten Schritt wird das auditive Empfinden einer oder mehrerer Versuchspersonen empirisch erfasst. Ein Gütekriterium hierfür stellt der Grad der Reproduzierbarkeit dar. Führt die subjektive Bewertung unter denselben Rahmenbedingungen bei wiederholter Betrachtung zum selben Ergebnis, gilt das Resultat als reliabel. Weiterhin beschreibt die Validität den Grad der Genauigkeit, mit dem eine Untersuchung das Merkmal erfasst, was sie erfassen soll [26], [202]. Mit diesen Ergebnissen werden schließlich physikalische und psychoakustische Parameter verglichen. Sind diese Parameter statistisch signifikant, so wird eine objektive Modellierung der empfundenen Geräuschqualität möglich.

Der dargestellte Vorgang kann dem Hersteller im Entwicklungsprozess sowie in der späteren Serienfertigung zu einem vielfachen unternehmerischen Mehrwert verhelfen. Neben der eigentlichen Objektivierung wird ein referenzierbarer Zielwert in einem Lastenheft notwendig [150]. Er beschreibt die von der Funktion oder dem Produkt geforderte Geräuschqualität, abhängig von der Erwartungshaltung des Kunden und des individuellen Anspruchs des Herstellers. In der frühen Phase einer Entwicklung können somit technische Maßnahmen auf deren qualitative Wirkung untersucht und einzelne Komponenten schnell optimiert werden. Zudem erleichtert die objektive Prüfung von Zielen die Zusammenarbeit mit externen Lieferanten. Anhand eines verbindlichen und nachvollziehbaren Nachweises der Teilequalität kann die vom Kunden erwartete akustische Wertigkeit direkt verifiziert werden [77]. Eine zyklische oder sequentielle Analyse von Fahrzeugen oder ein abschließender End-of-Line-Test gemäß Abbildung 1.5 bieten zusätzlich mögliche, systematische Qualitätskontrollen. Somit stellt dieser Ansatz eine zugleich effiziente wie effektive Methode dar, um die Wertigkeit eines Produktes zielführend an die allgemeinen Erwartungen des Marktes heranzuführen.

Weiterhin zeigt sich das große Potential parameterbasierter Prognosemodelle bei der wettbewerbsübergreifenden Positionierung des eigenen Unternehmens. Da der ständige Entwicklungsfortschritt eine davon abhängige Prüfung der eigenen Anforderungen ver-

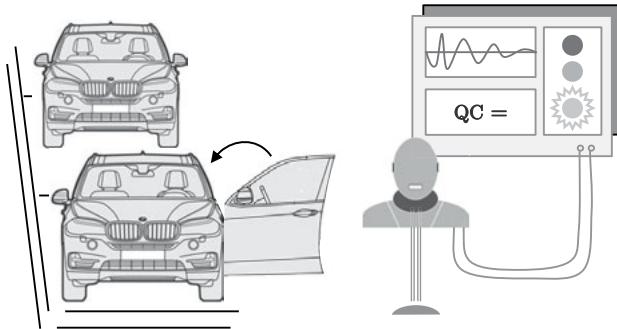


Abbildung 1.5: Qualitätskontrolle von Geräuschen in der Serienfertigung. Systematische, binaurale Prüfung der Geräuschqualität von Funktionsgeräuschen, exemplarisch dargestellt zum Türzuschlag.

langt, wird der relative Standpunkt zur Konkurrenz anhand von Wettbewerbsanalysen bestimmbar. Dazu werden gezielte Untersuchungen an ausgewählten Benchmarkfahrzeugen unterschiedlicher Klassen durchgeführt. Somit ist ein qualitativer Vergleich mit den eigenen Produkten möglich. Die objektive Einstufung geschieht mittels einer repräsentativen und skalierten Datenbank. In der Folge kann die unternehmensinterne Ziel- und Qualitätsgestaltung flexibel auf die Dynamik des Marktes sowie die mitunter länderspezifischen Erwartungen der Kunden angepasst und im Produkt umgesetzt werden.

## 1.3 Vorgehensweise und Methodik

Impulshafte Funktionsgeräusche tragen wesentlich zur wahrgenommenen Qualität des Gesamtfahrzeuges bei. Ausgelöst durch eine aktive Handlung des Kunden und aufgrund der schnellen Reizänderung reagiert das menschliche Gehör sehr sensibel auf diesen Signaltyp. Sowohl qualitative als auch informative Aspekte werden an den Fahrer weitergegeben. Deshalb sollten diese Geräusche neben dem technischen Zustand des Fahrzeugs auch eine akustische Gefälligkeit und Akzeptanz auslösen.

Da die Empfindung der Geräuschqualität subjektiv geschieht, ist sie nicht direkt messbar. Allerdings streben die Automobilhersteller nach messbaren und skalierbaren Qualitätsgrößen. Mit deren Hilfe können sie das Sounddesign der Fahrzeuge unmittelbar am Kunden orientieren. Um die Diskrepanz zwischen dem sensorischen Bewertungsprozess und der objektiven Abbildung des Qualitätsempfindens auflösen zu können, werden vielfältige Untersuchungen notwendig. Die auditive Wertigkeit muss anhand der perzeptiven Zusammenhänge zwischen dem physikalischen Reiz und der menschlichen Reaktion erfasst werden. Parallel dazu wird eine systematische Analyse der zugrunde liegenden Signale erforderlich. Korrelieren die Datensätze der subjektiven Bewertung und objektiven Vorhersage signifikant, so kann die wahrgenommene Geräuschqualität parametrisch beschrieben und prognostiziert werden.

In dieser Hinsicht sind für ein tiefgreifendes Verständnis des reizbasierten Qualitätsempfindens von impulshaften Fahrzeuggeräuschen die folgenden drei Leitfragen zu beantworten:

- Welche charakteristischen Aspekte bestimmen die Qualität von singular impuls-haften Fahrzeuggeräuschen?
- Inwiefern können objektive Parameter das subjektive Qualitätsempfinden impuls-hafter Fahrzeuggeräusche valide und reliabel abbilden?
- Existiert ein generalisierbarer Ansatz, um die akustische Qualität impulshafter Fahrzeuggeräusche beschreiben zu können?

Um diese Fragen zu beantworten, liegt der Fokus der Arbeit auf einer Kombination von zielführenden, methodischen Ansätzen, die in Abbildung 1.6 schematisch dargestellt sind. In einem ersten Schritt sollten die individuellen Assoziationen an die Qualität impulshafter Funktionsgeräusche verbal beschrieben werden, a). Dazu wurde der subjektive Wahrnehmungsraum mittels semantischer Analysen untersucht und anschließend auf übergeordnete Dimensionen reduziert. Dadurch lässt sich die allgemeine Erwartungshaltung der Menschen zusammenfassen. Anhand dieser Dimensionen und der darauf ladenden Begriffe werden gezielt objektive Parameter abgeleitet, b). Es wird dann ein hypothetischer Zusammenhang zwischen den Wahrnehmungsdimensionen und der Vorhersagekraft der Parameter angenommen. Darauf aufbauend wird das subjektive Qualitätsempfinden mittels psychoakustischer Parameter signifikant und valide abgebildet, c). Es werden sowohl verschiedene Signaltypen untersucht als auch unterschiedliche

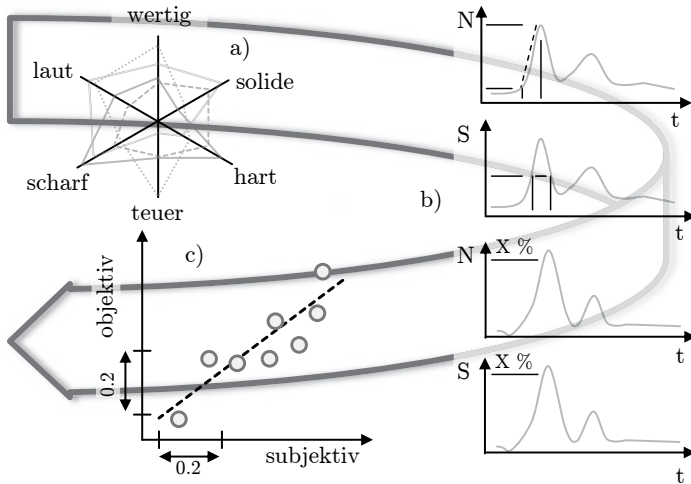


Abbildung 1.6: Vorgehensweise und methodischer Ansatz zur Objektivierung der Geräuschqualität impulshafter Funktionsgeräusche von Automobilen. a) Semantische Analyse des subjektiven Wahrnehmungsraums, b) Auswahl signifikanter physikalischer und psychoakustischer Parameter, c) Ableitung und Verifikation von parametrischen Prognosemodellen

Methoden des Hörversuchs angewandt. Dabei wird das Ziel verfolgt, die Übertragbarkeit der entwickelten Parametermodelle mitunter auch für die interkulturelle Prognose des Qualitätsempfindens zu untersuchen. Auf dieser Basis gelingt es, eine umfassende Methodik zur Objektivierung von impulshaften Fahrzeuggeräuschen zu gewinnen.



# Kapitel 2

## Grundlagen

Der grundlegende Transferpfad vom akustischen Reiz der Schallquelle bis hin zur neuronalen Verarbeitung des Wahrnehmungssystems ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Dabei wird die Sensorik des menschlichen Gehörs allein durch physikalische Schwingungen stimuliert. Deren kognitive Verarbeitung führt schließlich zu entsprechenden auditiven Empfindungen. Aufgrund derartig komplexer Zusammenhänge kann bislang nur der Mensch selbst als Messinstrument herangezogen werden, um eine Abbildung der individuellen Wahrnehmung zu erreichen. Dafür werden im Folgenden die theoretischen Grundlagen bereitgestellt.

### 2.1 Eigenschaften des Gehörsinns

Der nachstehende Abschnitt gibt Auskunft über den anatomischen Aufbau des Gehörs und zeigt die für diese Arbeit relevanten Effekte der Schallwandlung auf. Hierbei wird eine Vielzahl an auralen Transformationen durchlaufen. Diese beginnen bereits am Außenohr und resultieren in neuronalen Signalen an das Gehirn.

#### Anatomie des Gehörs

Vom Außenohr wird der Luftschall erfasst, dabei dessen Spektrum abhängig von der Einfallsrichtung des Signals verändert und an das Trommelfell weitergeleitet. Die individuell geformte, trichterförmige Ohrmuschel sowie der äußere Gehörgang übernehmen diese Aufgabe. Letzterer bestimmt durch seine charakteristische Länge die starke Hörempfindlichkeit des Menschen im Frequenzbereich von  $f = 2 - 4 \text{ kHz}$ . An die Membran des Trommelfells schließen die Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel zum Mittelohr hin an. Sie müssen den Schallwiderstand der Luft an die Impedanz des mit Flüssigkeit gefüllten Innenohres anpassen (etwa 4000-fach höher). Parallel zu dieser mechanischen Hebelübersetzung wird die physikalische Anregung einer großflächigen Membran auf das deutlich kleinere ovale Fenster transformiert. Letzteres liegt unterhalb der Steigbügelplatte und stellt die Verbindung zum Innenohr her. Für die optimale, lastfreie Funktion des Mittelohres gewährleistet die Eustachsche Röhre einen Druckausgleich zur äußeren Atmosphäre [164].

Während des Prozesses der auralen Reizverarbeitung wird die ursprünglich rein physikalische Information mehrfach transformiert. Zuerst regen die Bewegungen der Luftmoleküle das Trommelfell zu mechanischen Vibrationen an. Diese Vibrationen führen über eine Impedanzwandlung der Gehörknöchelchen zu pulsierenden Bewegungen des ovalen Fens-

ters. Daran schließt das eigentliche Hörorgan im Innenohr an, als Schnecke oder *Cochlea* bezeichnet. Sie gliedert sich in drei parallel verlaufende Skalen, die mit den Flüssigkeiten der Endo- und Perilymphe gefüllt sind und durch die Reissner- und Basilarmembran getrennt werden. Auf der Basilarmembran befindet sich das *Cortische Organ*, in dem die Schallrezeptoren als behaarte Sinneszellen eingebettet sind [86], [156]. Angeregt durch das ovale Fenster entstehen Fluidoszillationen, aus denen wiederum mechanische Schwingungen der Basilarmembran resultieren. Solch wellenförmige Auslenkungen werden *Wanderwellen* genannt und sorgen für eine größtmögliche Abscherung der behaarten Sinneszellen. Dadurch werden die Zellen zunächst polarisiert und folgend Botenstoffe ausgeschüttet, die schließlich ein Aktionspotential auslösen. Über den auditorischen Kortex werden die Aktionspotentiale durch die Hörbahn weiter an das Gehirn geleitet und in Form von Empfindungen erlebbar.

### Spektrale Verdeckungseffekte

Trifft der physikalische Reiz eines Geräusches zeitgleich mit einem weiteren, störenden Schall auf das menschliche Gehör, so kann dieser die Lautstärkeempfindung des ersten verringern oder vollständig verdecken. Dabei gibt die Mithörschwelle den maximal zulässigen Schalldruckpegel des maskierten Tones an, bei dem er unter Einfluss des Maskierers gerade noch wahrnehmbar bleibt. In diesem Zusammenhang treten auch nichtsimultane Effekte auf. Hier wird der wahrzunehmende Schall zeitlich vor- oder nach dem Störschall dargeboten.

Die spektrale Verdeckung wirkt simultan zum tatsächlichen Ton oder Geräusch und beeinflusst vor allem Signalanteile innerhalb einer Frequenzgruppe [78], [210]. Dabei hängt die Lautstärkeempfindung des Reizes maßgeblich von dessen spektraler Zusammensetzung und der des Maskierers ab. So berechnet sich beispielsweise für weißes (breitbandiges) Rauschen eine frequenzunabhängige Schallintensitätsdichte wie folgt.

$$I = \frac{\tilde{p}^2}{Z_0} \quad (2.1)$$

Die hierdurch erzeugten Mithörschwellen weisen unterhalb von 500 Hz einen horizontalen Verlauf auf, der sich abhängig vom Dichtepegel

$$L_E = 10 \log \frac{d \left( \frac{\tilde{p}}{20 \mu Pa} \right)^2}{\frac{df}{Hz}} dB \quad (2.2)$$

verschiebt. Nimmt dieser beispielsweise um 10 dB zu, so erhöht sich die Mithörschwelle ebenfalls um annähernd 10 dB. Im höherfrequenten Bereich wachsen die Mithörschwellen dagegen mit steigender Frequenz um etwa 10 dB pro Dekade an, wie ein Vergleich der Kurven von  $f_m = 0,25 \text{ kHz}$  und  $f_m = 1 \text{ kHz}$  in Abbildung 2.1 a) zeigt. Diese Charakteristik beschreibt die Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehörs, da nur sehr steile Filter einen derartigen Flankenanstieg (bis zu 100 dB/Oktave) nachbilden können [78]. In Bezug auf die Mittenfrequenzen von Schmalbandrauschen ergeben sich zwei weitere Effekte der Hörwahrnehmung. So verbreitert sich die verdeckte Fläche zu tiefen Frequenzen hin deutlich wobei die Maxima der Maskierung leicht zunehmen. Hierfür

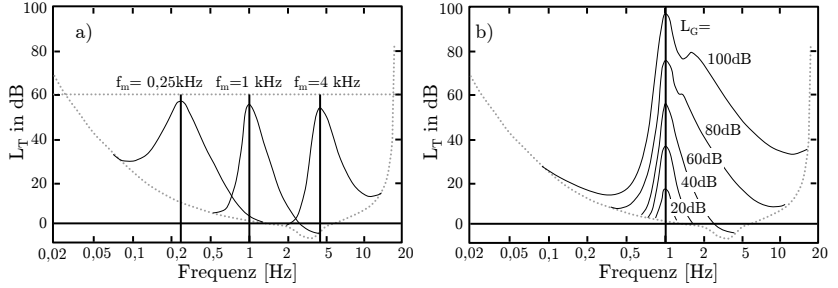


Abbildung 2.1: Spektrale Verdeckungseffekte des menschlichen Gehörs nach [210]; eigene Darstellung. Links: Pegel eines Testtones, maskiert durch ein bandbreites Geräusch mit einem Pegel von 60 dB und Mittenfrequenzen von 0,25, 1 und 4 kHz. Die gepunktete Linie markiert die Ruheshwelle. Rechts: Pegel eines Testtones, maskiert durch ein bandbreites Geräusch mit einer Mittenfrequenz von 1 kHz und verschiedenen Pegeln als Funktion der Frequenz des Testtones.

veranschaulicht Abbildung 2.1 b) die pegelbedingte Maskierung durch Schmalbandrauschen für eine Mittenfrequenz von 1 kHz. Grundsätzlich steigt die Mithörschwelle für jeglichen Schalldruckpegel des Maskierers stark an, wobei die mit zunehmendem Pegel immer flacher werdende obere Flanke zur Verdeckung eines immer größeren Spektralbereichs führt [59], [131], [198], [210]. Weiterhin sind in den abfallenden Flanken der Mithörschwellen leichte Einkerbungen zu erkennen. Gemäß Zwicker und Fastl [210] gehen sie aus bestimmten Nichtlinearitäten<sup>1</sup> im Gehör hervor, die zu hörbaren Distorsionsprodukten führen.

Eine weitere Charakteristik der menschlichen Hörempfindung betrifft die Gruppierung von Signalanteilen zu spezifischen Frequenzbereichen, wenn die entsprechenden Frequenzinhalte eine gewisse Nähe aufweisen [78]. Ausgehend von den Experimenten nach Fletcher<sup>2</sup> [65] zur Ableitung von Mithörschwellen verarbeitet das menschliche Gehör ein akustisches Signal, indem es dessen Anteile in einzelne Frequenzbänder separiert. Werden diese auch als Frequenzgruppen bezeichneten Bänder nacheinander aufgeführt, ergibt sich daraus die sogenannte *Barkskala*. Abhängig von der relativen Breite eines Bark können die beschriebenen, innerauralen Merkmale schließlich angenähert werden. Für die tatsächlichen Frequenzgruppen geschieht dies anhand von abgestimmten Terzfiltern [33], [58], [130].

<sup>1</sup>Schwebungen zwischen dem Ton und dem Verdeckter könnten auch besser hörbar werden.

<sup>2</sup>Fletcher untersuchte Sinustöne in weißem Rauschen, um deren Mithörschwellen zu bestimmen.

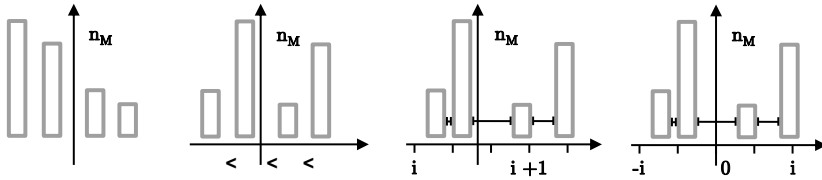


Abbildung 2.2: Kategoriale und kardinale Skalen, schematische Darstellung. Von links: Nominal-, Ordinal-, Intervall-, Verhältnisskala.

## 2.2 Klassifizierung der Geräuschqualität

Um die individuellen Empfindungen klassifizieren zu können, konzentriert sich die quantitative Forschung in ihrer Untersuchung auf den Menschen selbst. Dieses *Messen* gilt laut Stevens [178] als Prozess, der Ereignissen oder Objekten entsprechende Zahlenwerte auf der Basis fester Regeln zuordnet. Hierfür muss die Messtheorie der sich anschließenden statistischen Analysen auf drei Kriterien eingehen [180]. Das *Repräsentativitätsproblem* tritt auf, wenn die Eigenschaften empirischer Zusammenhänge durch numerische Beziehungen systematisch in Zahlenform dargestellt werden sollen. Jeder Messvorgang muss die verbindenden Interaktionen zwischen den Objekten adäquat wiedergeben und die Transparenz der Abbildung wahren. Dies gilt vor allem dann, wenn die erhobenen Daten verglichen oder standardisiert und hierfür in andere Messwerte überführt werden.

Im Weiteren verlangt das *Eindeutigkeitsproblem*, an den Datensätzen nur für zulässig erklärte Transformationen durchzuführen. So muss etwa der relative Abstand zweier gewandelter Objekte gleich bleiben. Derartige Anpassungen bieten oftmals leichter zu interpretierende Messwerte, die nun dem *Bedeutungsproblem* gegenüberstehen. Numerische Behauptungen werden dabei dahingehend hinterfragt, inwieweit sie für die empirischen Daten bedeutsam sind. Vor allem im Experiment fällt die Wahl mathematischer Operatoren schwer. Können beispielsweise die dreifache Motivation oder eine halb so intelligente Person psychologisch und technisch „gemessen“ werden? In den tatsächlich möglichen Fällen legt das Skalenniveau die zulässigen statistischen Analysen fest. Auf Stevens [177] geht die am weitesten verbreitete Klassifikation zurück. Er unterscheidet die Skalen hinsichtlich des Informationsgehalts der Daten und des Einsatzes von Rechenoperatoren [25], [26], [37], [157].

Einen Überblick über die vier Stufen gibt Abbildung 2.2. Den Einstieg stellt die *Nominalskala* dar. Als primitivstes Skalierungsmaß unterscheidet sie die Art der Objekte anhand der relevanten Dimension lediglich auf Gleichheit und Ungleichheit, unabhängig von der Größe ihrer eigenen Ausprägung  $n_m$ . Arithmetische Operatoren sind nicht zugelassen, die Häufigkeit gleicher Merkmalsausprägungen kann aber ermittelt werden. Als nächsthöhere Stufe ermöglichen *Ordinalskalen* eine Rangordnung der Objekte gemäß der untersuchten Dimensionen ( $>$ ,  $<$ ,  $=$ ). Eine Aussage über die Abstände innerhalb der Reihenfolge erlaubt erst das Niveau der *Intervallskala*. Neu sind die äquidistanten Skalenabschnitte ( $i$ ,  $i + 1$ ,  $i + 2$ , ...) sowie die Informationen, die aus der Differenz zweier

Objekte stammen (z.B. Größe des Intervalls). Zudem werden lineare Transformationen sowie die statistischen Maße der Standardabweichung und des arithmetischen Mittels verwendbar. Den maximalen Grad der Skalierung erreicht die *Verhältnisskala*, da sie zusätzlich einen Nullpunkt postuliert. Somit werden Quotienten von Daten als beschreibende Größen akzeptiert. Weiterhin dürfen jegliche arithmetische Operatoren und statistischen Maße angewandt werden. Zusammenfassend gelten die Nominal- und Ordinalskala als *kategorial* bzw. *nicht metrisch*, die Intervall- und Verhältnisskala heißen *kardinal* bzw. *metrisch*.

### 2.2.1 Menschliche Sensorik und Verarbeitung

Aufgrund der Vielfalt der ankommenden Reize hat der Mensch gelernt, seine Umwelt anhand kombinierter Sinneseindrücke zu beschreiben [82]. Andererseits gelingt es ihm, seine Sensorik auf einzelne, relevante Ausprägungen auszurichten. Er kann seine Aufmerksamkeit bewußt auf willkürliche Informationen lenken oder unbewußt intrinsische Signale anstoßen. Diese gelten im Augenblick der Wahrnehmung als irrelevant gegenüber den tatsächlich verfolgten Absichten des Subjektes [101], [112]. Allerdings kann ein Sinnesorgan einen physikalischen Reiz nur erkennen, wenn sich dieser im erfassbaren Bereich des Sinnesorgans befindet. So muss ein akustischer Reiz hinsichtlich Frequenz und Pegel im Bereich der menschlichen Hörfläche liegen, damit er wahrgenommen werden kann. Innerhalb dieser Grenzen liegen zudem bestimmte Wahrnehmungsfelder vor, die sich durch absolute Reizschwellen [161] voneinander abheben. So werden akustische Ereignisse aufgrund zu tiefer oder zu hoher Frequenzen gar nicht und Lautstärkeänderungen vorrangig nur stufenweise wahrgenommen. Ferner reagiert der Mensch insensibel auf konstante Reize [87]. Für ihn sind jene Empfindungen relevant, die aus einer Änderung des gegenwärtigen Zustandes hervorgehen.

Während des Alltags nehmen die hochempfindlichen Sinne des Menschen eine Vielfalt an reizbasierten Informationen auf. Wird der Mensch allerdings als Sensor herangezogen, so differenziert sich eine wissenschaftliche Beobachtung von einer alltäglichen vor allem durch die zielgerichtete und methodische Lenkung der Wahrnehmung [101]. Sie steht in systematischem Bezug zu bekannten Theorien oder theoretischen Ansätzen und fußt nicht auf spontaner Intuition. Die in ihr verankerten, kapazitiven Maxima der Informationsverarbeitung weisen auf die individuelle Bedeutung der beobachteten Merkmale hin. Diese starke Selektivität gilt nach Coombs [34], [101] als charakteristisch für den urteilenden Menschen. Hierbei können die wahrnehmbaren Merkmalsausprägungen mit Hilfe von Indikatoren wie der Größenschätzung oder den Ratingmethoden strukturiert werden. Allerdings beschreibt Wertheimer [197] das individuelle Wahrnehmungssystem als Einrichtung, der der Mensch eine eigene Organisation überlagert. Er kategorisiert die aufgenommenen Informationen erfahrungsbasiert und gewichtet sie dadurch intraviduell unterschiedlich. Umso wichtiger ist es deshalb, sich der genannten Kriterien für das subjektive *Messen* des Menschen bewusst zu sein.

In diesem Zusammenhang setzt eine objektive Modellierung von einer oder mehreren Wahrnehmungsdimensionen die Kenntnis der zugehörigen Empfindungsgrößen voraus. Das einzig belastbare Messinstrument stellt allein der Mensch dar. Als isoliertes Subjekt

oder als Teil einer repräsentativen Stichprobe liefert er unabhängige Ergebnisse. Dabei kommt der klassischen Bewertung der in dieser Arbeit untersuchten, singular impuls-haften Fahrzeuggeräusche eine besondere Bedeutung zu. Sie werden in ihrer realen Umgebung (fast) ausschließlich in absoluter Weise bewertet, da eine direkte Referenz zum Wettbewerb nur schwer realisierbar ist. Deshalb differenziert Bregman [30] das ungelernete Hören des Alltags vom aktiven Hören infolge eines bewussten Trainings. Diesen Ansatz verfolgt Berg [12] weiter und beschreibt den Prozess einer individuellen Urteilsbildung als Kombination eines wahren Wertes und einer verfälschenden Zufallsgröße. Letztere führt situativ und in Relation zu den psychologischen Randbedingungen zu Abweichungen vom tatsächlichen Skalenwert.

Werden die Urteile der einzelnen Subjekte zu einer ausreichend großen Stichprobe zusammengefasst, so lassen sich die individuellen Abweichungen minimieren. Dafür müssen die vom Individuum hervorgerufenen Störeffekte der psychischen Belastung oder der Gleichgültigkeit kontrolliert werden [26]. Deshalb wird ein objektives und valides Versuchsdesign notwendig, welches zu reproduzierbaren und belastbaren Ergebnissen führen kann.

### 2.2.2 Methodik der Hörversuche

Grundsätzlich nutzen die Wissenschaft und die industrielle Praxis experimentelle Hörversuche, um die individuelle Empfindung wiederhol- und kontrollierbar klassifizieren zu können. Bei diesen Versuchsreihen gelten die Methoden des Paarvergleichs, der Ratingskalen sowie des Semantischen Differentials als wesentlich und besonders wirksam [59], [140]. Mithilfe dieser Ansätze kann die wahrgenommene Geräuschqualität in Form von Merkmalen beschrieben werden, die im Vergleich zu anderen Fahrzeuggrößen (z.B. Verbrauch, Gewicht,  $c_w$ -Wert) ausschließlich subjektiv bewertbar sind.

#### Semantisches Differential

Ursprünglich von Osgood [138], [139] für die psycholinguistische Forschung entwickelt, dient das Semantische Differential der mehrdimensionalen Skalierung sprachlicher Bedeutung. Übertragen auf hörakustische Untersuchungen führt diese Methode einen qualitativen Maßstab ein. Mit Hilfe *konnotativer* und *denotativer* Antonympaare werden die individuellen Hörempfindungen meist auf einer bipolaren, mehrstufigen Skala erfasst. Dabei steht der Begriff denotativ für den abstrakten Inhalt eines sprachlichen Objektes, ohne auf Nebenbedeutungen einzugehen (rau - glatt, weich - hart). Im Unterschied dazu repräsentiert die Definition konnotativ assoziative, emotionale oder wertende Merkmale (billig - luxuriös, schön - hässlich). Als entscheidendes Kriterium für die Qualität der Ergebnisse gilt die Auswahl der kontradiktorischen Begriffe. Sie sollen die wahrnehmbaren Ausprägungen der zu bewertenden Objekte möglichst detailliert erfassen, unangemessene oder redundante Informationen aber vermeiden. Weiterhin muss das Versuchsdesign die Konzentrationsfähigkeit und die Belastungen der Versuchspersonen berücksichtigen. So lassen sich Gewohnheitseffekte durch eine variable Verteilung positiv und negativ assoziierter Adjektive auf beiden Seiten der Skala minimieren. Parallel dazu steigt das Risiko versehentlicher Urteile. Allerdings kann deren Plausibilität mittels statistischer Verfahren geprüft werden [26], [77].

Davison und Sharma [37] zufolge gelten die erhobenen Daten als intervallskaliert, da von äquidistanten Stufen des Maßstabs ausgegangen werden kann. Diese Annahme setzt Skalenstufen voraus, welche die Deskriptoren nicht zusätzlich unterteilen. So beinhaltet eine siebenstufige Skala, ausgehend von der neutralen Position, eine dreifach negative sowie eine dreifach positive Wertung. Gegenüber ordinal skalierten Daten erlaubt dieses *metrische Niveau* die Verwendung arithmetischer Mittelwerte. Auf ihnen basiert schließlich die Reduzierung der Wahrnehmungsdimensionen anhand einer Faktoren- oder Clusteranalyse (siehe Kapitel 2.4).

### Paarvergleich

Beim Paarvergleich werden zwei Objekte  $A$  und  $B$  hinsichtlich eines vorab festgelegten Kriteriums verglichen. Vor allem bei geringeren Unterschieden in den Merkmalsausprägungen erweist sich diese Methode als vorteilhaft. Durch den relativen Vergleich liegt der Versuchsperson eine direkte Referenz vor, was die qualitative Urteilsbildung erleichtert. Bei lediglich zwei Möglichkeiten ( $A > B, B > A$ ) muss sich der Proband zwangsweise entscheiden (*Wahlzwang*) [77]. Dabei steht einer einfacheren Analyse der Daten das Risiko willkürlich abgegebener Antworten gegenüber. Lässt das Versuchsdesign eine Gleichwertigkeit der Objekte zu ( $A = B$ ), tendieren unsichere Probanden zu diesem Urteil. Treten bewusst oder unbewusst unvollständig ausgefüllte Bögen auf, können notwendige Korrekturen gemäß des Missing-Data-Ansatzes integriert werden [10], [202]. Die Konzentration und das Durchhaltevermögen der Probanden werden durch ein zeitliches Limit und damit durch eine maximale Anzahl an Paaren

$$n_{\text{Paare}} = \frac{k_{\text{Stimuli}} (k_{\text{Stimuli}} - 1)}{2} \quad (2.3)$$

gewahrt [26], [35], [169]. Diese Aspekte tragen maßgeblich zur Qualität und Verwendbarkeit des Versuchsergebnisses bei. Die Auswahl der Geräuschbeispiele  $k_{\text{Stimuli}}$  schließt das von Luce [126] geforderte, restriktive Kriterium der *Kontextunabhängigkeit* einer Wahlsituation ein. So gilt ein relativer Vergleich als kontextunabhängig [38], [189], wenn die vollständigen Skalenwerte der Stimuli in die Beurteilung eingehen. Deshalb wurden in dieser Arbeit unabhängige Aufnahmen verschiedener Hersteller mit diversifizierter Klangcharakteristik für die experimentellen Hörversuche verwendet.

Für konsistente und valide Bewertungen muss der Versuchsleiter die ausgewählten Stimuli sinnvoll kombinieren. Dabei müssen Gewohnheitseffekte und zu geringe Unterschiede in der Reizdarbietung möglichst ausgeschlossen werden. Einen zielführenden Ansatz hierfür bietet der verwendete Algorithmus der Ross-Matrix gemäß Tabelle 2.1. Er maximiert einerseits die Anzahl der Paare, die zwischen dem ersten und dem nächsten Abspielen eines Stimulus liegen. Zum anderen tritt jedes zu vergleichende Objekt ähnlich häufig an erster und zweiter Position auf [157].

### Kategoriale Bewertung

Bei der kategorialen Bewertung wird ein Objekt anhand eines im Voraus bestimmten Kriteriums beurteilt. Dabei liegt meist eine sieben- oder neunstufige *Likertskala* zu Grunde, deren Merkmalskontinuum definitionsgemäß gleich groß abgestuft ist [26]. So entspricht z.B. der Wert 1 dem Begriff *stimme überhaupt nicht zu*, das Maximum 7

Tabelle 2.1: Matrix nach Ross [157]. Methodische Kombination der Stimuli für  $n = 8$  Geräusche.

Abfolge der Wiedergabe														
Stimulus	I		II		III		IV		V		VI		VII	
	1	2	2	3	1	3	3	4	1	4	4	5	1	5
	3	8	8	4	4	2	2	5	5	3	3	6	6	4
	4	7	7	5	5	8	8	6	6	2	2	7	7	3
	5	6	-	-	6	7	-	-	7	8	-	-	8	2
	6	1	-	-	7	1	-	-	8	1	-	-	-	-

steht für *stimme voll und ganz zu*. Die Auswertung der Ergebnisse führt zu kategorialen, ordinalskalierten Daten. Im Unterschied zum relativen Ansatz des Paarvergleichs gibt der Proband eine absolute Wertung ab, wobei mögliche, verfälschende Effekte berücksichtigt werden müssen. Entscheidend für die subjektive Bewertung der aufeinanderfolgenden Objekte sind deshalb die inhärenten Ausprägungen des ausgewählten Kriteriums. Folgt beispielsweise ein durchschnittliches Objekt auf ein extrem ausgeprägtes, kann das Urteil durch eine Drift beeinflusst werden. Dem entgegen wirkt ein Test-Retest-Ansatz mit randomisierter Abfolge der Geräusche [99], [169]. Hierbei wird jeder Stimulus zwei Mal mit variierenden Vorgängergeräuschen präsentiert. Weiterhin minimieren Geräusche, die vor dem eigentlichen Experiment abgespielt werden, die zentrale Antworttendenz. Der Proband erhält dadurch einen Überblick über die relevanten Merkmalsausprägungen und nutzt vermehrt die vollständige Skala aus [77].

### Rangfolgetest

Anhand einer vorab spezifizierten Eigenschaft soll der Versuchsteilnehmer eines Rangfolgetests eine definierte Anzahl an Objekten  $n$  gemäß seiner empfundenen Präferenz der Reihe nach ordnen [26], [64], [77]. Basiert das Versuchsdesign auf einem Wahlzwang, so muss der Urteiler jedem Objekt einen eigenständigen Rangplatz zuordnen. Andernfalls können mehrere Objekte auf dieselbe Platzierung gesetzt werden. Einen entscheidenden Faktor für die Leistungsfähigkeit der kognitiven Verarbeitung stellt die Anzahl der zu vergleichenden Stimuli dar. Da deren Rangordnung unabhängig voneinander auf einem konstruierten Kontinuum stattfindet, sollte die Größe der Stichprobe limitiert werden<sup>3</sup>. Methodisch wird zwischen einem *vollständigen* und einem *unvollständigen* Rangfolgetest unterschieden. Während die Versuchsteilnehmer beim vollständigen Ansatz alle Objekte bewerten, beinhaltet der unvollständige Test nur einen Teil der relevanten Stimuli. Für beide Varianten lässt sich eine repräsentative, ganzzahlige Rangreihenfolge der Objekte anhand der kumulierten Antworten ableiten. Da hieraus ein ordinalskaliertes Ergebnis resultiert, beinhaltet der Zwischenraum einzelner Objekte keine metrische Information über den tatsächlichen Abstand [77]. Folglich sind keine quantitativen Angaben über die empfundene Intensität des spezifizierten Kriteriums möglich.

<sup>3</sup>Für die Geräuschbewertung wäre eine maximale Anzahl von sieben Geräuschen denkbar, um den kombinatorischen Aufwand für die Probanden möglichst gering zu halten [77].



## 2.3 Akustische und hörakustische Kennwerte

Um eine verlässliche Aussage über die Qualität von Geräuschen zu erhalten, scheinen instrumentelle Mittel gegenwärtig noch nicht auszureichen [89]. Methodisch ermöglichen daher allein Hörversuche eine qualitative Abstufung der menschlichen Empfindung. Darauf aufbauend können psychophysische Parametermodelle abgeleitet werden, deren Güte und Signifikanz eine Prüfung mittels statistischer Verfahren erfordert.

### 2.3.1 Physikalische Parameter

Während des 20. Jahrhunderts wurde die Forschungsarbeit lange durch Ansätze geprägt, die auf physikalischen Effekten beruhen. So entstand z.B. die logarithmische Darstellung des Schalldruckpegels als Maß für die wahrgenommene Lautstärke. Um die subjektive Wirkung allerdings besser bewerten zu können, fehlte eine zeit- und frequenzbasierte Analyse der Geräuschstrukturen.

#### Lautstärke und energetische Mittelung

Im Allgemeinen werden die Gehörmechanismen allein durch Schwingungen stimuliert, die sich wellenförmig im Medium Luft ausbreiten. Erfüllen diese Schwingungen bestimmte physikalisch messbare Kriterien, lösen sie eine Hörempfindung aus. So kann die wahrgenommene Lautstärke abhängig von der Frequenz und dem Schalldruckpegel des auftretenden Signals beschrieben werden. Aus diesem Zusammenhang lässt sich die Hörfläche des Menschen ableiten und anhand der *Kurven gleicher Lautstärke* nach Abbildung 2.3 darstellen (DIN 45630 [40] und ISO 226 [47]). Die ersten Forschungen gehen auf Fletcher und Munson im Jahr 1933 zurück [66]. Weiterführende Untersuchungen finden sich exemplarisch in [61], [182].

Studien haben gezeigt, dass die Hörempfindung leiser Töne zu tiefen Frequenzen hin durch eine ansteigende Ruhehörschwelle begrenzt wird. Sie ergibt sich aus dem Schalldruckpegel eines Sinustones oder schmalbandigen Geräusches, den der Mensch eben noch wahrnehmen kann. Somit wird im tieffrequenten Bereich ein deutlich höherer Schalldruck benötigt, um ein zu höheren Frequenzen hin vergleichbares Lautstärkeempfinden auszulösen. Zwischen  $0,5\text{ kHz} - 4\text{ kHz}$  erreicht das menschliche Gehör die höchste Sensitivität. Hier liegt zugleich der Tiefpunkt der als Schmerzgrenze bezeichneten oberen Schwelle des Hörbereichs. Weiterhin treten unangenehme Empfindungen der Lautstärke ab  $L = 100\text{ dB}_{SPL}$  auf. Steigen die Pegel zu Werten von  $L = 120\text{ dB}_{SPL} - 140\text{ dB}_{SPL}$  an, können die Gehörmechanismen zerstört werden. Um einer Schädigung durch derartige Belastungen entgegenzuwirken, spannen die Mittelohrmuskeln das Trommelfell vor. Damit ändert sich die Übersetzung durch die Gehörknöchelchen; es resultiert ein erhöhter mechanischer Widerstand. Für diese Dämpfung tiefer Frequenzanteile ( $f \leq 2\text{ kHz}$ ) beträgt die muskuläre Reaktionszeit  $100\text{ ms} - 200\text{ ms}$  [125], [164].

Gemäß der Kurven gleicher Lautstärke (siehe Abbildung 2.3) gelten Töne mit gleichem Schalldruckpegel aber unterschiedlicher Frequenz als verschieden laut. Der objektiv messbare Druck reicht somit nicht aus, um das menschliche Empfinden zu beschreiben. Hierfür wird der Lautstärkepegel  $L_S$  mit der Einheit *phon* eingeführt. Per Definition ist der Lautstärkepegel, den eine eben einfallende Welle mit einer Frequenz  $f = 1000\text{ Hz}$

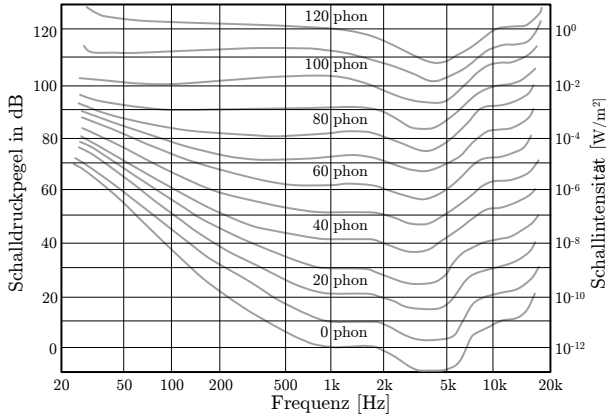


Abbildung 2.3: Hörfläche des Menschen nach ISO 226 [47]. Kurven gleicher Lautstärke mit Ruheshörschwelle (0 *phon*-Kurve) und Schmerzgrenze (120 *phon*-Kurve); eigene Darstellung.

hervorrufen, gleich dem Schallpegel  $L$  dieser Welle. Somit lässt sich der Schalldruckpegel  $L_P$  bei einem Referenzdruck von  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$  nach DIN 1318 [39] wie folgt berechnen.

$$L_P = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (2.4)$$

Für nicht stationäre Geräusche sollte vorab der effektive Schalldruck aus der energetischen Mittelung über den betrachteten Zeitraum  $T$  berechnet werden.

$$\tilde{p}_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=0}^T p(k)^2} \quad (2.5)$$

### A-Bewertung und energieäquivalenter Dauerschallpegel

Isoliert betrachtet kann der Schalldruckpegel die empfundene Lautstärke nicht ausreichend abbilden. Neben der frequenzabhängigen Empfindlichkeit des Ohres gilt gleichzeitig die Bandbreite des Schallereignisses als relevant. Mit Rücksicht auf diese für das Gehör charakteristischen Eigenschaften wurde die in ISO 10845 [105] genormte A-Bewertung eingeführt. In Kombination mit dem A-bewerteten Schalldruckpegel (DIN 61672) [45] resultiert eine Frequenzgewichtung des Signals, die eine global akzeptierte Annäherung an die menschliche Lautstärkeempfindung erreicht. Die Ausgabe des A-bewerteten Schalldruckpegels

$$L(A) = 10 \lg \left( \sum_{i=1} 10^{(L_i + \Delta i/10)} \right) \quad (2.6)$$

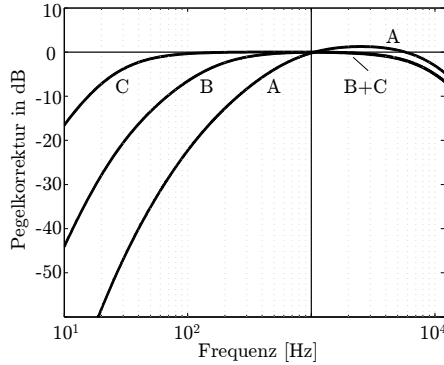


Abbildung 2.4: Frequenzbewertungskurven für Luftschall nach [84], eigene Darstellung.

erfolgt mittels einer Filterkurve, deren Frequenzgang sich an der invertierten 40 *phon*-Kurve orientiert und aus Abbildung 2.4 hervorgeht. Weiterhin können auch die in DIN 45633 [42] aufgeführten Abschwächfaktoren  $\Delta i$  zu den gemessenen Terzpegeln hinzu addiert werden [133].

Die frequenzabhängig gedämpften Pegel sind allerdings nur eine Näherung für die tatsächliche Wahrnehmung [84], da die *phon*-Kurven für Geräusche gelten, deren Bandbreite innerhalb einer Frequenzgruppe liegt. Zudem erscheint das Urteil bei der Gewichtung unterschiedlicher Pegel als zweifelhaft, wenn lediglich eine einzelne *phon*-Kurve für die Filterung invertiert wurde [125]. So senkt die A-Bewertung von z.B. Entriegelgeräuschen die tiefen Frequenzen zu stark ab, da diese Pegel von  $62 \text{ dB} < L < 78 \text{ dB}$  aufweisen [125]. Hierbei wäre der aus dem Maschinenbau stammenden A-Bewertung die ebenfalls in ISO 10845 [105] dokumentierte B-Bewertungskurve für Innengeräusche von Kraftfahrzeugen vorzuziehen [84], [125]. Innerhalb eines Bereichs der Lautstärkepegel von  $60 \text{ phon} < L < 85 \text{ phon}$  werden tiefere Frequenzen weniger stark gedämpft. Jedoch weist Zwicker in [209] auf die Risiken hin, die sich durch eine derartig simple Bewertung und Messung ergeben können. Er vergleicht hierzu einen schmalbandigen Schall mit einem breitbandigen. Obwohl beide den gleichen dB(A)-Wert besitzen, unterscheiden sie sich in ihrer empfundenen Lautstärke um mehr als das Dreifache.

Während der Pegel bei stationären Geräuschen tendenziell einfach bestimmt werden kann, kommt bei intermittierenden Signalen die Frage nach einem quantitativen Vergleich auf. Der sogenannte *energie-äquivalente Dauerschallpegel*  $L_{eq}$  repräsentiert vielfach einen geeigneten Mittelwert, der anstelle von Zeitverläufen betrachtet wird. Er berechnet sich gemäß Gleichung (2.7) aus dem Quadrat des Schalldrucks im zeitlichen Mittel und gibt somit die mittlere Schallenergie an. Die Integrationszeit  $T$  differiert je nach Anwendungsfall von subsekundären bis hin zu stündlichen Werten.

$$L_{eq} = 10 \lg \left( \frac{1}{T} \left( \int_0^T \frac{p_{eff}^2(t)}{p_0^2} \right) dt \right) \quad (2.7)$$

### 2.3.2 Hörakustische Betrachtungen

Die hörakustischen Parameter ermöglichen eine Rückkopplung der menschlichen Empfindung auf die auslösenden physikalischen Reize. Sie unterstützen mathematisch formulierbare Modelle, die die auditive Wahrnehmung des Menschen nachbilden können. Zu den klassischen Parametern der Psychoakustik zählen *Lautheit*, *Schärfe*, *Rauigkeit* und *Tonalität*, die für den Menschen unabhängig voneinander wahrnehmbar sind [59], [210].

#### Spektrale Lautheitssummation

Der als *spektrale Lautheitssummation* bezeichnete Effekt beschreibt die Tatsache, wonach breitbandige Signale für gewöhnlich eine größere Lautheit hervorrufen als schmalbandige, wenn beide bei gleichem Pegel dargeboten werden [66], [212]. Wird beispielsweise die Bandbreite eines synthetischen Rauschens vergrößert und der Pegel konstant gehalten, bleibt die Lautheit solange gleich, bis die Breite der Frequenzgruppe überschritten wird. Liegen gleichzeitig Signalanteile in benachbarten Stufen der Barkskala vor, nimmt die Lautheit mit Ausnahme von sehr niedrigen Pegeln zu [100]. Zudem wurde gezeigt, dass der Effekt der spektralen Lautheitssummation von der Dauer abhängt (z.B. Verhey und Uhlemann [192]). So weisen gleich laute, schmalbandige und breitbandige Rauschsignale mit einer Länge von 10 ms um bis zu 9 dB größere Pegeldifferenzen im Vergleich zu 1000 ms langen Signalen auf [153]. Zudem stellten Heeren et al. [97] in ihren Untersuchungen dar, wie sich die spektrale Lautheitssummation bei Geräuschen verhielt, deren Frequenzkomponenten nicht zeitgleich dargeboten wurden.

#### Lautheitsmodell nach Zwicker

Die Kurven gleicher Lautstärke basieren lediglich auf dem Schalldruckpegel und der Frequenz eines Signals. Im Vergleich dazu berücksichtigt das in DIN 45631/A1 [41] und in ISO 532B [104] hinterlegte Modell zur Bestimmung der Lautheit zudem die Frequenzgruppenbreiten sowie die Frequenzselektivität des menschlichen Gehörs. Als Grundlage dienen die Forschungen von Zwicker [209], [210], [211], dessen Vorstellung gegenüber der auditiven Wahrnehmung in verbesserten Ergebnissen resultiert [204]. Gemäß Abbildung 2.5 gliedert sich das Verfahren zur Lautheitsberechnung [172], [209] in zwei Abschnitte. Unabhängig von der Lautheit werden zuerst die Erregungsmuster bestimmt. Darauf aufbauend berechnet sich die Gesamtlautheit durch Summation der Teillautheiten.

In einem ersten Schritt wird der Hörfrequenzbereich in Intervalle aufgeteilt, die den kritischen Bändern der Bark-Skala entsprechen. Dieses Spektrum wird anschließend mit der Dämpfungsfunktion des Außenohres überlagert und die Anregungspegel werden definiert. Vorab muss die Schallintensität innerhalb jedes kritischen Bandes berechnet worden sein. Danach werden die Gesamterregungen jeder Frequenzgruppe aufsummiert. Hierbei werden die Erregungspegel durch Kern- und Flankenerregung schrittweise bestimmt. Befinden sich alle Anregungspegel innerhalb der menschlichen Hörfläche, bilden die Schallintensitäten das Maß für die Kernerregungen. Dieser Prozess basiert auf den zugrunde liegenden Frequenzgruppen. Dabei führen die Kernerregungen zu maskierenden Eigenschaften, denen anhand der Flankenerregung Rechnung getragen wird. Im Unterschied zur Kernerregung weisen die Flanken eine endliche Steilheit auf.

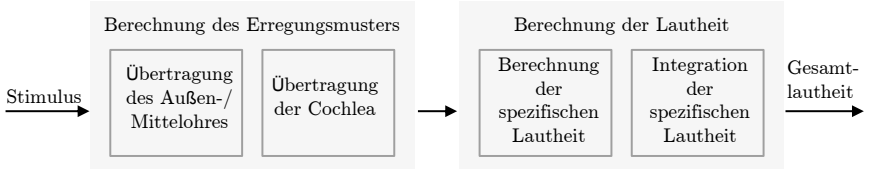


Abbildung 2.5: Lautheitsmodell nach Zwicker [210], [209], schematische Darstellung. Nachbildung des sensorischen, auditiven Systems des Menschen für die Berechnung des Erregungsmusters, Berechnung der Gesamtlautheit durch Integration der berechneten spezifischen Lautheit.

Im niederfrequenten Bereich bleibt dieser Gradient konstant. Bei hohen Frequenzen auf der Rückflanke ist er allerdings pegelabhängig [206], [209]. Folglich hängt die Flankensteilheit von der Intensität der Erregung sowie der Mittenfrequenz der jeweiligen Frequenzgruppe ab.

Nachdem alle Kern- und Flankenerregungspegel zu einer Gesamtintensität zusammengeführt wurden, folgt die Berechnung der spezifischen Lautheit  $N'$  [206] [33].

$$N' = 0,08 s^{0,23} \left[ \left( 1 - s - \frac{E}{E_0} \right)^{0,23} - 1 \right] \frac{\text{sonne}}{\text{Bark}} \quad (2.8)$$

$$s = \frac{E_{HS}}{E_0}$$

Mit  $E_{HS}$  wird die Erregung an der Ruhehörschwelle bezeichnet. Der Parameter  $E_0$  gibt diejenige Erregung an, die der Bezugsintensität für  $I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  entspricht. Zudem stellt  $E$  die vom Geräusch abhängige Erregung innerhalb eines kritischen Bandes dar. Die Transformation gemäß Gleichung (2.8) erfolgt in Anlehnung an das Potenzgesetz von Stevens [179], der die Wahrnehmung von Schall prinzipiell als Intensitätsempfindung beschreibt.

Die Integration der spezifischen Teillautheiten  $N'$  über alle Tonheitsbänder  $z$  ergibt als Skalar die Gesamtlautheit  $N$ .

$$N = \int_0^{24\text{Bark}} N'(z) dz \text{ sonne} \quad (2.9)$$

In diesem Zusammenhang brachte die DIN 45631 im Jahr 2008 eine Änderung A1 [41] mit sich. Neu war ein Modell zur Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche [194], [208]. Das Modell, das auf der stationären Lautheit nach Zwicker basiert, bildet das nichtlineare Abklingverhalten des menschlichen Gehörs detailliert nach. Ein Tiefpass mit einer Zeitkonstanten von  $t = 2 \text{ ms}$  repräsentiert die zeitliche Auflösung des Gehörs [207]. Dadurch werden temporale Effekte und Maskierungsverläufe berücksichtigt [54], [55], [56], [78].

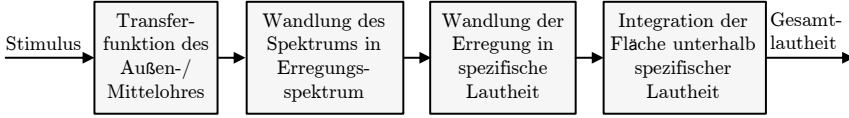


Abbildung 2.6: Lautheitsmodell nach Moore und Glasberg [80], [131], schematische Darstellung. Berücksichtigung der Transferfunktionen des Außen- und Mittelohres, anschließende Wandlung des Spektrums in spezifische Lautheit und Integration der berechneten spezifischen Lautheit zur Gesamtlautheit.

### Lautheitsmodell nach Moore und Glasberg

Das Modell zur Vorhersage der Lautheit nach Moore und Glasberg [5], [104] basiert auf neueren Erkenntnissen zu den Kurven gleicher Lautstärke [61], [181], [195]. Schematisch zeigt das Diagramm in Abbildung 2.6 die Ermittlung der Lautheit in vier aufeinander folgenden Blöcken. Zu Beginn berücksichtigt das Modell den dämpfenden Einfluss des Außen- und des Mittelohres anhand von festgelegten Filtern, die den Gehöreigenschaften nachempfunden sind. Da die Empfindlichkeit des Gehörs für Frequenzen  $f < 1000 \text{ Hz}$  an der Ruheshörschwelle  $MAF(f)$  im Vergleich zur 100 *phon*-Kurve gleicher Lautstärke  $ELC(f)$  schneller abfällt, schlagen Moore und Glasberg [80], [131] eine frequenzabhängige Korrektur vor. Somit berechnet sich der Erregungspegel an der absoluten Hörgrenze  $L_{ETHRQ}$  wie folgt.

$$L_{ETHRQ}(f) = MAF(f) - ELC(f) + 100 \quad (2.10)$$

Für  $f > 1000 \text{ Hz}$  nutzt der Filter dann wieder die invertierte Kurve der absoluten Hörschwelle am Trommelfell. Im darauf folgenden Block werden die Erregungsmuster entsprechend ihrer orts- und frequenzabhängigen Verteilung entlang der Basilarmembran gewonnen. Hierfür sind die Filter maßgeblich, die anhand der Mittenfrequenzen  $f_m$  und ihrer Ausprägung bezüglich Form und Pegel in die Kalkulation mit eingehen. Moore und Glasberg weichen dabei von der von Zwicker vorgestellten *Bark*-Skala ab und führen die sogenannte äquivalente rechteckige Bandbreite *ERB* ein [129].

$$ERB = 24,7 \log_{10} (4,37 f_m + 1) \quad (2.11)$$

Der nächste Schritt beinhaltet die Umrechnung der Erregungsmuster in die spezifische Lautheit  $N'$ .

$$N' = C \left[ \left( \frac{E_{SIG}}{E_0} \right)^\gamma - \left( \frac{E_{THRQ}}{E_0} \right)^\gamma \right] \rightarrow E_{SIG} > E_{THRQ} \quad (2.12)$$

$$N' = 0 \rightarrow E_{SIG} < E_{THRQ}$$

Dieser Prozess hängt von der Erregung durch das Signal  $E_{SIG}$  ab [131]. Dabei stellt  $E_{THRQ}$  die Erregung der absoluten Hörschwelle dar. Der Korrekturfaktor wird zu  $C = 0,08722$  gewählt, damit sich die Lautheit  $N = 1 \text{ sone}$  für einen Sinuston ( $f = 1000 \text{ Hz}$ )

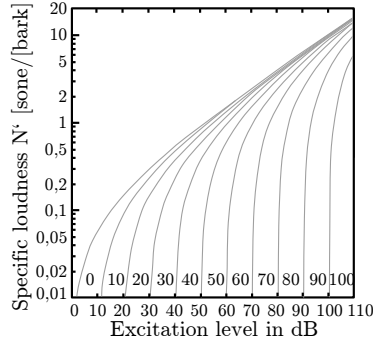


Abbildung 2.7: Transformation der Erregungspegel in spezifische Lautheit nach [131], eigene Darstellung.

mit einem Pegel von  $L = 40 \text{ dB}_{SPL}$  ergibt. Mittels der Konstante  $\gamma = 0,204^4$  folgt eine Annäherung zwischen der Erregung  $E_{SIG}$  und der spezifischen Lautheit  $N'$ . Sobald sich  $E_{SIG}$  an  $E_{THRQ}$  angleicht, wird die Funktion für die Lautheit gemäß Abbildung 2.7 steiler. Nähere Untersuchungen hierzu sind in [155], [203] zu finden.

Für die Berechnung der Gesamtlautheit werden die spezifischen Teillautheiten über der ERB-Skala integriert. Nach allgemeiner Auffassung gelten diese Flächen als etwa proportional zur neuronalen Aktivität des menschlichen Hörsystems [131].

### Lautheitsmodell nach Boulet

In ihrer Dissertation thematisierte Boulet [27], [28] das Lautheitsempfinden von impulshaften Geräuschen. Das Ziel war es, den Pegel impulshafter Geräusche (50, 60, 75 *phon*) in der wahrgenommenen Lautstärke so einzuregeln, dass er dem eines breitbandigen Geräusches von 1 s Dauer entspricht. Die in den Untersuchungen bewerteten Signale resultierten aus einer Hüllkurve, deren linearer Anstieg 2 *ms* zum Amplitudenmaximum dauerte. Ohne Plateau erfolgte direkt ein exponentieller Abfall, bei dem die Pegelminderung von  $-60 \text{ dB}$  eine Zeitkonstante bestimmte (analog dem Nachhall).

Im zweiten Schritt betrachtete Boulet eine Methode zur Berechnung der Lautheit impulshafter Geräusche im Zeitbereich. Anhand der Einregelmethode nach Zwicker ermittelte sie die abhängige Variable der Lautheit experimentell. Hierbei bewerteten die Probanden 24 reale und 16 synthetische Signale. Das vorgeschlagene Lautheitsmodell für impulshafte Schalle basiert auf der Geräuschenergie  $E_{SI}$  sowie der Abfallzeit  $T_d^5$ . Im *ESI* (estimateur de sonie d'impulsions) genannten Modell berechnet sich die Lautheit

<sup>4</sup>Die Lautheit eines Tones mit  $f = 1000 \text{ Hz}$  verdoppelt sich bei einem Anstieg um 10 *dB* oberhalb von  $40 \text{ dB}_{SPL}$ .

<sup>5</sup>Die Abfallzeit  $T_d$  beschreibt die Dauer, in der das Signal von 90% auf 10% der maximalen Amplitude fällt.

$N_{ESI}$  mit den empirisch ermittelten Konstanten  $\delta = 0,27$  und  $\beta = 0,1$  wie folgt.

$$N_{ESI} = q E_{SI}^{\delta} + T_d^{\beta} \quad (2.13)$$

Die mathematische Berechnung beginnt mit dem Filtern des akustischen Signals nach den 24 Barkbändern. Für jedes dieser kritischen Bänder wird die Energie und die Abfallzeit ermittelt. Sie dienen als Eingangsgrößen, um die bandspezifische Lautheit abzuleiten. Die simultane Maskierung wird mit dem Modell von Zwicker und Fastl [209], [210] berücksichtigt. Abschließend werden die spezifischen Lautheiten zur Gesamtlautheit für impulshafte Geräusche  $N_{ESI}$  addiert.

### Schärfe nach Zwicker

Die Schärfe eines Geräusches hängt von den Spektralanteilen ab, ungeachtet dessen, ob das Spektrum kontinuierlich oder diskontinuierlich aus benachbarten Linien aufgebaut ist. Zwicker multipliziert für die Berechnung der psychoakustischen Schärfe  $S$  die spezifische Lautheit mit einer Gewichtungsfunktion  $g_Z(z)$  und erhält

$$S = c \frac{\int_{z=0}^{24Bark} N'(z) g_Z(z) z \, dz}{\int_{z=0}^{24Bark} N'(z) z \, dz} \quad acum \quad (2.14)$$

Dabei beschreibt  $g_Z(z)$  einen von der Tonheit abhängigen Faktor, der größere Tonheiten gegenüber kleineren stärker gewichtet.

$$\begin{aligned} g_Z(z) &= 1 \quad \rightarrow \quad 0 < z < 16 \text{ Bark} \\ g_Z(z) &= 0.66 e^{0,171 z} \quad \rightarrow \quad 16 < z < 24 \text{ Bark} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Auf diesem Prinzip basiert das in DIN 45692 [44] genormte Verfahren zur Darstellung der psychoakustischen Schärfe.

### Schärfe nach Aures

In seiner Dissertation [7] modifiziert Aures das Modell der Schärfe und berechnet sie abhängig von der Gesamtlautheit.

$$S = c \frac{\int_{z=0}^{24Bark} N'(z) g_A(z) z \, dz}{\ln \left( \frac{\frac{N}{sone} + 20}{20} \right)} \quad acum \quad (2.16)$$

Der psychoakustische Parameter Schärfe bewertet die Verschiebung des energetischen Schwerpunktes und folgt der Einheit *acum*. Referenziert wird der Wert von 1 *acum* bei einem Schalldruckpegel von  $L_P = 60 \text{ dB}$  eines schmalbandigen Rauschens der Frequenzgruppenbreite bei 1 *kHz*. Neben den vorgestellten Modellen existieren weitere Verfahren nach DIN 45692 [44] und nach von Bismarck, die zu ähnlichen Werten führen. Sie unterscheiden sich lediglich durch den Beginn und das Ausmaß der tonheitsbedingten Gewichtung  $g(z)$ .



## 2.4 Handhabung empirischer Daten

Jegliche empirische Forschung gründet auf der Interaktion von physikalischen Reizen gegenüber der Wahrnehmung und der kognitiven Verarbeitung des Menschen [101]. Fechner [62] stellte die These auf, dass eine mathematische Gesetzmäßigkeit zwischen den Erscheinungen des menschlichen Bewusstseins und den ihnen entsprechenden physikalischen Vorgängen existiert. Die Intensität geistiger Tätigkeit sei proportional zur relativen Änderung des physikalischen Reizes. Letzteren verbinde ein logarithmischer Zusammenhang mit der Empfindung des Menschen, deren 'Einheit' wahrnehmbare Unterschiedsschwellen seien. Dabei beschreibt Fechner das Subjekt selbst als den Beobachter, die Objekte der Beobachtung entsprechen den Empfindungen.

Dem gegenüber steht die konträre Ansicht von Stevens [178]. Für ihn repräsentiert der Versuchsleiter den Beobachter, das Objekt der Beobachtungen liegt in den Reiz-Antwort-Beziehungen. Diese oppositionellen Ansätze zeigen deutlich, welche Herausforderungen die Handhabung empirischer Daten mit sich bringt.

### 2.4.1 Statistische Verfahren

Um die Signifikanz empirisch erhobener Daten prüfen zu können, müssen bestimmte Kriterien und Indikatoren der jeweiligen Testsituation berücksichtigt werden. Ausgehend vom Skalenniveau, der Anzahl der Stichproben und unabhängigen oder abhängigen Messungen gelten die im Folgenden beschriebenen Tests als zielführend.

#### Varianz und Standardabweichung

Bei psychometrischen Studien interessiert insbesondere die quantitative Beziehung von unabhängigen und abhängigen Variablen. Dabei kann die Streuung der menschlichen Wahrnehmung das gesuchte Ergebnis verschleiern. Als statistisches Maß für die Streuung von metrischen Daten beschreibt die Varianz  $\sigma^2$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (2.17)$$

die Verteilung der einzelnen Merkmalsausprägungen um den Mittelwert. Hier ist  $n$  die Anzahl der Messwerte,  $x_i$  die jeweilige Beobachtung und  $\bar{x}$  das arithmetische Mittel. Zieht man die Wurzel, ergibt sich die Standardabweichung  $\sigma$ . Sie gilt als anschaulicher, da sie dieselbe Dimension wie die Beobachtungen besitzt.

#### Test auf Normalverteilung

Bei der Anwendung multivariater Analysemethoden setzt man voraus, dass die empirisch erhobenen Daten einer normalverteilten Grundgesamtheit entstammen. Als ein möglicher Test hierfür gilt der Kolmogoroff-Smirnow-Anpassungstest, der sich für kleine Stichproben eignet. Dabei dient die allgemeine Dichtefunktion

$$H = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp - \frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \quad (2.18)$$

zur Ermittlung der Gauß- oder Normalverteilung auf Basis des Erwartungswertes  $\mu$  und der Varianz  $\sigma^2$ . Verglichen wird schließlich die flächenmäßige Abweichung der empirischen von einer stochastischen Verteilungsfunktion [168]. Ein Überschreiten des 95%-Bereichs führt dazu, die Annahme auf Normalverteilung zu verwerfen und die Nullhypothese  $H_0: F_x(x) = F_0(x)$  für ungültig zu erklären. Dem Vorteil der stabilen und vielseitigen Anwendung steht die geringe Belastbarkeit der Aussage des Tests gegenüber.

### Prüfung auf Signifikanz

In der sozialwissenschaftlichen Forschung liefern Stichproben eine reduzierte Menge an Daten, mit deren Hilfe Prognosen getroffen werden können. Offen bleibt, inwieweit das geschätzte Modell die Grundgesamtheit abzubilden vermag. Diese Fragen klärt ein Test auf *statistische Signifikanz*, der die Wahrscheinlichkeit eines Mittelwertunterschiedes auf dessen Zustandekommen prüft. Gilt das Ergebnis als signifikant, kann es mit dem Zufall nicht mehr erklärt werden [10], [26], [169].

#### *t-Test*

Der *Zweistichproben-t-Test* prüft den linearen Zusammenhang zweier Messreihen anhand deren Mittelwerte. Zu Grunde liegt die Gegenüberstellung der Null- zur Alternativhypothese. Als Eingangsgrößen für die Berechnung des t-Wertes werden das arithmetische Mittel und die Streuung verwendet. Gesucht ist die Wahrscheinlichkeit, die das statistische Verhältnis der beiden Mittelwerte zueinander beschreibt. Sie lässt sich, abhängig vom in der Fachliteratur bekannten Niveau, als signifikant (95%) bzw. hochsignifikant (99%) aus der Tabelle der t-Verteilung ermitteln.

Im Rahmen einer Regressionsanalyse prüft der t-Test die Güte der Regressionskoeffizienten  $\beta_i$ . Zu Grunde liegt ein vereinfachter Nullhypothesentest  $H_0: \beta_i = 0$ , der die Entscheidung über den Verbleib einzelner Koeffizienten im Modell beeinflusst. Somit reduziert sich die Berechnung von  $t_{emp}$  auf den Quotienten aus Regressionskoeffizient  $\beta_i$  und dessen Standardfehler  $s_d$ . Die statistische Auswertung folgt der t-Verteilung nach Student um den Mittelwert null [26], [88]. Ergibt der tabellarische Vergleich  $t_{emp} > t_{tab}$ , so ist die Nullhypothese zu verwerfen. Der Einfluss der unabhängigen auf die abhängige Variable gilt als statistisch signifikant.

#### *F-Test*

Mit Hilfe des von Fisher entwickelten *F-Tests* kann bewertet werden, ob sich zwei Stichproben in Hinblick auf deren Varianzen unterscheiden. Erneut stellt die Irrtumswahrscheinlichkeit das Kriterium dar, weshalb die aufgestellte Hypothese zu bestätigen oder zu verwerfen ist. Die Nullhypothese  $H_0$  postuliert dabei eine Ablehnung des kausalen Zusammenhangs von auditiven gegenüber instrumentellen Daten, die in einer Regression untersucht werden. Keine Verbindung besteht, sollten die Regressionskoeffizienten null sein;  $H_0: \beta_i = 0$ . Anhand des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  lässt sich der empirische F-Wert  $F_{emp}$  wie folgt berechnen.

$$F_{emp} = \frac{R^2/J}{(1 - R^2)/(K - J - 1)} \quad (2.19)$$

K beschreibt dabei den Stichprobenumfang, J die Anzahl der Regressoren. Resultiert aus einem Vergleich der Werte  $F_{emp} > F_{tab}$ , wird der durch die Regressionsbeziehung hypothetisch angenommene Zusammenhang als signifikant erachtet.

### ***U-Test***

Anhand einer gemeinsamen Rangfolge von zwei Stichproben überprüft der *U-Test* statistisch, ob die Mittelwerte beider Gruppen voneinander abweichen. Die Nullhypothese  $H_0$  nimmt dabei identische Mittelwerte an [64], [168]. Als nichtparametrisches Äquivalent zum unabhängigen *t-Test* müssen die analysierten Ergebnisse keine Normalverteilung aufweisen. Dagegen werden die Stetigkeit der untersuchten Merkmale oder zumindest rangskalierte Daten und voneinander unabhängige Stichproben vorausgesetzt. Der Prüfung auf Signifikanz liegt eine charakteristische Prüfgröße  $U_i$  zugrunde, die sich wie folgt für jede der beiden Stichproben berechnen lässt.

$$U_i = n_1 n_2 \frac{(n_i (n_i + 1))}{2} \sum_{x_i} \text{Rang}(x_i); \quad i = 1, 2 \quad (2.20)$$

Durch die Parameter  $n_1$  und  $n_2$  sowie  $n_i$  wird die jeweilige Teilnehmerzahl der ersten und zweiten Gruppe abgebildet. Weiterhin gehen die summierten Rangwerte  $x_i$  gruppenspezifisch in die Berechnung mit ein. Abschließend wird der kleinere der beiden Werte  $U_i$  für den Abgleich zu einer statistischen Referenzverteilung  $U_{krit}$  herangezogen. Gilt die Beziehung  $U > U_{krit}$ , so behält die Nullhypothese Gültigkeit. Folglich kann ein statistisch signifikanter Unterschied der Mittelwerte beider Stichproben abgelehnt werden.

### **Chi-Quadrat-Test**

Beim Hörversuch des paarweisen Vergleichs resultieren aus einem widersprüchlichen oder unmotivierten Verhalten häufig inkonsistente Antworten der Probanden. Diese Intransitivität kann anhand der Anzahl *zirkulärer Triaden* erkannt werden. Ein Beispiel für eine solche zirkuläre Triade bei einer qualitativen Bewertung ist:

$$\text{Geräusch A} \xrightarrow{\text{wertiger}} \text{Geräusch B} \xrightarrow{\text{wertiger}} \text{Geräusch C} \xrightarrow{\text{wertiger}} \text{Geräusch A}$$

Kendall [113] hat gezeigt, dass anhand des  $\chi^2$ -Tests statistisch entschieden werden kann, ob das Antwortverhalten des Probanden konsistent ist. Liegen mindestens  $n \geq 7$  Geräusche vor, kann der empirische Wert  $\chi^2$  zuverlässig wie folgt berechnet werden.

$$\chi^2 = \left( \frac{8}{n-4} \right) \left( \frac{1}{4} {}_n C_3 - d + \frac{1}{2} \right) + dF \quad (2.21)$$

Die auf den Urteiler zurückzuführenden zirkulären Triaden  $d$  und deren maximal mögliche Anzahl des Vektors  ${}_n C_3 = \binom{n}{3}$  gehen ebenso ein wie die Freiheitsgrade  $dF$ .

$$dF = \frac{n(n-1)(n-2)^2}{n-4} \quad (2.22)$$

Sie legen gemeinsam mit der Vertrauenswahrscheinlichkeit  $1 - \alpha$  einen theoretischen Wert  $\chi_{tab}^2$  fest. Ist der empirische Wert größer als der aus einer Tabelle abzulesende theoretische,  $\chi_{emp}^2 > \chi_{tab}^2$ , so behält die Nullhypothese  $H_0$  in der Form: „Die Antworten der Probanden sind zufällig entstanden“ ihre Gültigkeit.

## 2.4.2 Multivariate Analysemethoden

Mithilfe der multivariaten Analysemethoden wird das Zusammenwirken von mehr als zwei Variablen untersucht. Eine übergeordnete Einteilung unterscheidet dabei zwischen Verfahren, die die Beobachtungen mithilfe signifikanter Variablen klassifizieren oder die den Einfluss von unabhängigen auf die abhängige Variable beschreiben [88]. Die Reduktion von mehrdimensionalen Datenstrukturen auf eine kleinere Anzahl hypothetischer Größen zählt ebenfalls zu diesen Verfahren. Die beiden letztgenannten Ansätze werden nachstehend detaillierter dargestellt.

### Kollinearität und Reliabilität

Liegen nicht normalverteilte Variablen vor, kann eine Korrelation anhand des Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman geschätzt werden. Der Test nach Bravais-Pearson greift hingegen auf normalverteilte Größen zurück [26]. Bravais und Pearson haben in ihrer Forschung einen Parameter entwickelt, der die Stärke des linearen Zusammenhangs zweier Datensätze mithilfe des Parameters  $r$  wie folgt prüft.

$$r = \text{Kor}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n \left( x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}} \quad (2.23)$$

Nimmt der auf den Wertebereich von  $[-1, 1]$  normierte Parameter  $r$  Werte nahe Eins an, besteht eine hohe Korrelation. Bei niedrigen Werten nahe Null liegt nur eine geringe Korrelation vor. Für die Datensätze  $X$  und  $Y$  stellen die mit  $x_i$  und  $y_i$  gekennzeichneten Variablen Singularbewertungen auf intervallskaliertem Niveau dar.

Weiterhin kann mithilfe einer Korrelationsanalyse ein Experiment auf seine Reliabilität hin untersucht werden, wenn bestimmte Voraussetzungen berücksichtigt werden. Dabei stellen reliable Daten einen wichtigen Nachweis für die Validität von Schlussfolgerungen dar, die auf empirischen Werten von Tests und Messungen basieren. Einschränkung gilt, dass die Korrelation an sich keinen Hinweis auf eine direkte Kausalität zweier Variablen oder den Einfluss einer dritten gibt [26], [88]. Weisen die Daten zumindest ein ordinalskaliertes oder besser ein intervallskaliertes Niveau auf, können sinnvolle Korrelationswerte berechnet werden [70], [81], [90]. Als mögliches Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs bietet sich der Pearson-Korrelationskoeffizient (auch: Produkt-Moment-Korrelation) zur Quantifizierung der Reliabilität an [144]. Allerdings müssen die Variablen annähernd normalverteilt vorliegen. Zudem können durch ihn keine systematischen Fehler erkannt werden, weshalb seine Verwendung in speziellen Fällen zu unterschiedlichen Auffassungen führt [70], [159].

Werden Studien erhoben, die auf einer numerischen, ordinalen Bewertungsskala basieren, wird deren Reliabilität häufig mit dem Index *Cronbach  $\alpha$*  hinterfragt. Liegt eine Skalierung gemäß dem Vorschlag von Likert vor [124], schlagen Zumbo et al. [205] eine Berechnung des *ordinal  $\alpha$*  vor. Da die klassische Berechnung des *Cronbach  $\alpha$*  kontinuierliche Testantworten annimmt, soll anstatt der Korrelationsmatrix nach Pearson beim *ordinal  $\alpha$*  eine polychorische Korrelation verwendet werden. Letztere

stellt ein *parameterfreies* Maß dar, welches die Eigenschaften ordinalskalierten Daten berücksichtigt<sup>6</sup>. Eine Verletzung dieser Voraussetzung würde zu verzerrten Schätzwerten der Reliabilität führen [70], [205].

Trotz der Bedeutung und der verschiedenen Konzepte zur Bewertung der Reliabilität gibt es keine einheitlichen Aussagen über deren Nutzen oder deren Relevanz. Vor allem für die Analyse von ordinalskalierten Daten wird ein quantitativer Vergleich kritisch betrachtet [26], [113], [169]. So können Erinnerungs- und Übungseffekte während eines Experiments zu einer Überschätzung der Reliabilität führen. Ein weiterer Aspekt beschreibt, dass die genannten Merkmale bei den Testpersonen möglicherweise mehr oder weniger stark auftreten. Dies würde zusätzlich zu einem unkontrollierbaren Einfluss auf die Reliabilität führen [26], [205].

### Regression und multiple Regression

Ein Ziel dieser Arbeit besteht in der parametrischen Prognose der empfundenen Geräuschqualität. Als Kernfrage muss die kausale Beziehung und die Wirkung der *unabhängigen* Variable auf die *abhängige* Variable beantwortet werden. Hierfür stellt die Regressionsanalyse mathematische Modelle bereit, die im einfachsten Fall auf einem linearen Zusammenhang basieren,  $y = b_0 + b_1 x_1$ . Existiert eine ausreichende Korrelation, kann der Wert neuer, nicht ursprünglich für die Modellierung vorliegender Datensätze  $y$  prognostiziert werden. Den Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der  $y$ -Achse bestimmt das konstante Glied  $b_0$ . Hinzu kommt der Wert der unabhängigen Variable  $x_1$  multipliziert mit dem Regressionskoeffizienten  $b_1$ .

Real existieren allerdings stets Abweichungen von einer idealisierten Vorhersage, insbesondere bei psychometrischen Untersuchungen. Den Einfluss dieser Mess- oder Beobachtungsfehler kennzeichnet der Fehlerterm  $e_k$ .

$$\sum_{k=1}^K e_k^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - (b_0 + b_1 x_k)]^2 \rightarrow \min \quad (2.24)$$

In ihm konstituieren sich die für jegliche empirische Werte  $k$  ermittelten Differenzen (*Residuen*). Mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate lassen sich die charakteristischen Koeffizienten berechnen [52].

$$b_1 = \frac{k (\sum x_k y_k) - (\sum x_k) (\sum y_k)}{k (\sum x_k^2) - (\sum y_k)^2}; \quad b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (2.25)$$

Positive und negative Werte werden nicht kompensiert, dafür große Differenzen überproportional gewichtet. Beschränkt sich eine lineare Regression auf eine unabhängige Variable, gilt die Optimierungsvorschrift der Gleichung (2.25) für den Regressionskoeffizienten  $b_1$  und die Konstante  $k$  [10].

Weiterhin interessiert ein Kriterium, welches eine qualitative Bewertung der Regressionsrechnung ermöglicht. Bekannt unter dem Prinzip *goodness of fit* bewertet das

<sup>6</sup>Gegenüber dem Korrelationskoeffizienten nach Pearson benötigt die polychorische Korrelation nicht die Annahme, dass die Beziehung zwischen den Variablen linear ist. Der Rangkorrelationskoeffizient ist robust gegenüber Ausreißern, basiert aber auf einem iterativen Rechenprozess.

Bestimmtheitsmaß  $R^2$  die Güte der Anpassung an die empirischen Daten. Es legt die Größe der Streuung der abhängigen Variable fest, die anhand der unabhängigen Variablen erklärt werden kann. Das betrachtete Regressionsmodell ist umso leistungsfähiger, je mehr sich das Maß der berechneten Werte gegen Eins verschiebt;  $R^2 \rightarrow 1$ . Reicht ein Regressor nicht aus, um den Regressanden signifikant zu prognostizieren, kann von der bivariaten Methode auf die multivariate Analyse übergegangen werden. Der ursprüngliche Ansatz erweitert sich wie folgt auf die multiple Anwendung mehrerer unabhängiger Variablen.

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_jx_j \quad (2.26)$$

Hierin enthalten sind  $j$  Regressionskoeffizienten, die den Einfluss der Prädiktoren auf die geschätzte Zielgröße  $\hat{y}$  beschreiben. Beziehen sich die unabhängigen Variablen nicht auf dieselbe Skala, können die Koeffizienten standardisiert werden. Derartig transformiert bilden sie ein Maß für die Relevanz der Regressoren  $J$  basierend auf dem Stichprobenumfang  $K$ . Das korrigierte Bestimmtheitsmaß  $R_{adj}^2$

$$R_{adj}^2 = R^2 - (1 - R^2) \frac{J}{K - J - 1} \quad (2.27)$$

beschreibt die Streuung gewichtet durch die Größe der Freiheitsgrade. Zunehmend fehlerhafte oder irreführende Ergebnisse können allerdings entstehen, wenn der Informationsgewinn pro Faktor nicht zielführend ist [10]. Solche Vorhersagen gelten als nicht valide. Identifiziert eine Korrelationsanalyse vorab stark linear abhängige Parameter, kann deren parallele Verwendung zu Scheinbeziehungen führen. In diesem Fall werden die entsprechenden Parameter nicht für die Regressionsfunktion verwendet.

## Faktoranalyse

Die *explorative Faktoranalyse* verfolgt methodisch das Hauptziel, hypothetische Größen (latente Faktoren) aus der Korrespondenz zwischen den manifesten Variablen abzuleiten. Letztere teilen ihre gesamte Varianz auf mehrere Elemente auf und legen somit fest, wie stark sie auf die jeweiligen Faktoren laden. Voraussetzung für dieses Ergebnis ist eine Hauptkomponentenanalyse, die die empirisch erhobenen Daten mittels einer Korrelationsmatrix analysiert. Auf deren Grundlage lässt sich ein Urteil über die Zuverlässigkeit der Faktorenanalyse bilden. Der Ablauf ist schematisch in Abbildung 2.8 dargestellt.

Neben der statistischen Signifikanz [26] erweist sich der Barlett-Test auf Sphärizität [64] als relevant. Er prüft hypothetisch, inwieweit Korrelationen zwischen den betrachteten Variablen vorliegen. Schließlich bewertet das Kaiser-Maier-Olkin-Maß (KMO-Maß), inwiefern die Daten für eine Faktorenanalyse geeignet sind. Diese Berechnung basiert auf dem Varianzanteil, den alle Variablen miteinander teilen. Dabei gelten Werte oberhalb 0,8 als lobenswert, unterhalb von 0,5 als inakzeptabel [64] [10].

Wie viele Wahrnehmungsdimensionen letztendlich vorliegen, hängt von der tatsächlichen Aussagekraft eines Faktors ab. Hierfür differenziert Cattell [32] die Bedeutung der Faktoren anhand des graphischen Wendepunktes im Screeplot. Zusätzlich empfiehlt Kaiser [111], jegliche Faktoren mit Eigenwerten von  $\lambda > 1$  zu berücksichtigen, da deren eigene Varianz stets jene einer beinhaltenden Variable übersteigt.

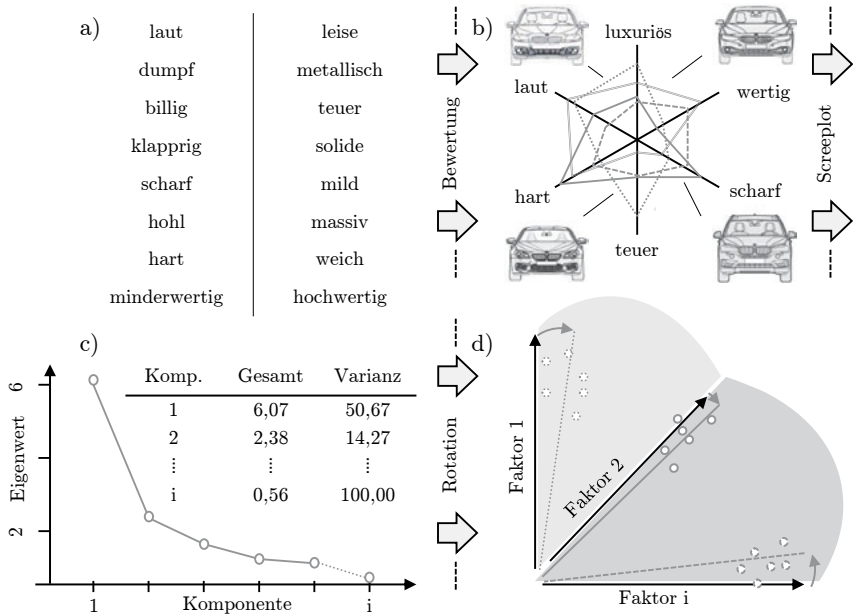


Abbildung 2.8: Semantische Abfrage mit anschließender Faktoranalyse, schematische Darstellung. a) Auswahl der semantischen Begriffe, b) subjektive Geräuschbewertung, c) Reduktion der Wahrnehmungsdimensionen (Screeplot), d) Rotation der Faktoren zur Maximierung der Faktorladungen.

# Kapitel 3

## Objektivierung singular impulshafter Geräusche

Im diesem Kapitel wird eine Methodik entwickelt, mit der die wahrnehmbare Geräuschqualität von singular impulshaften Fahrzeuggeräuschen anhand objektiver Parameter beschrieben werden kann. Die generelle Herangehensweise für die gehörrichtige Aufnahme der Geräusche sowie die explizite Durchführung der notwendigen Hörversuche wird vorab dargestellt. Weiterhin wird ein Überblick der bewertenden Probanden gegeben und die methodische Vorgehensweise zum Vergleich von physikalischen und psychoakustischen Parametern schematisch dargestellt.

In einem ersten Schritt werden relevante Modellparameter zur Objektivierung der Qualität impulshafter Fahrzeuggeräusche abgeleitet. Hierfür wird der multidimensionale Wahrnehmungsraum mithilfe einer semantischen Abfrage auf charakteristische Dimensionen reduziert. Anhand deren Varianz und der entsprechenden Faktorladungen der bewerteten Begriffe erfolgt die gezielte Ableitung exemplarischer, objektiver Parameter. Ausgehend hiervon wird untersucht, inwiefern diese Parameter die wahrnehmbare Geräuschqualität von impulshaften Fahrzeuggeräuschen beschreiben und prognostizieren können. Zuerst werden für das Verriegelungsgeräusch von Fahrzeugtüren lineare Parametermodelle abgeleitet und mittels technisch [162] und synthetisch bearbeiteter Stimuli [166] verifiziert. Dabei wird unter anderem der Frage nachgegangen, wie sich eine Prognose anhand physikalischer Parameter von einer Vorhersage auf der Basis psychoakustischer Modelle unterscheidet? Um die Übertragbarkeit der signifikanten Parameter auf unabhängige Signale zu überprüfen, schließen sich weiterführende Untersuchungen zum Türzuschlaggeräusch an. Hierbei wird auch der kulturelle Einfluss in die Betrachtung mit einbezogen. Für das Signal des Türzuschlags weist der psychoakustische Parameter *Dauer der Schärfe* ( $T_S$ ) eine im Vergleich zum Verriegelungsgeräusch noch höhere Korrelation zur wahrgenommenen Geräuschqualität auf. Eine detaillierte Analyse der *Dauer der Schärfe* konzentriert sich nachfolgend auf die technische und synthetische Variation von Türzuschlaggeräuschen. Motiviert durch die erfolgreiche objektive Abbildung der empfundenen Qualität wird die entwickelte Methodik samt kulturübergreifender Betrachtung nochmals ganzheitlich auf ein weiteres impulshafte Geräusch angewandt. Abschließend soll die subjektive und objektive Bewertung von mehrfach periodischen Signalen zeigen, inwiefern die abgeleiteten psychoakustischen Parameter die Qualität einer neuen Geräuschklasse vorhersagen können.



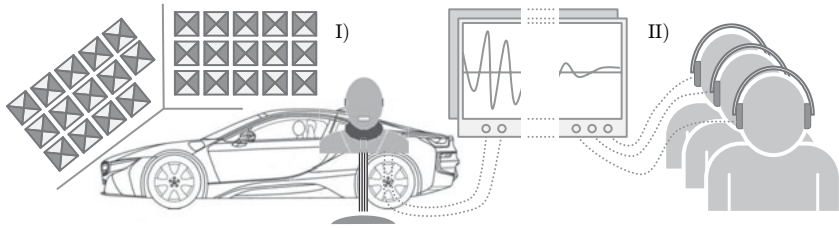


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Geräuschaufnahme mit einem Kunstkopf im Semi-Freifeldraum I) samt anschließender Wiedergabe mittels offener Kopfhörer II).

### 3.1 Generelle Herangehensweise

Das hier angewandte Vorgehen konzentriert sich allein auf die akustischen Merkmale des Gesamtfahrzeuges. Ein Einfluss des geometrischen Anbindungskonzeptes der Geräuschquelle wird nicht betrachtet. Weiterhin wird bei der hier vorgestellten Analyse physikalischer und hörakustischer Parameter eine im Vergleich zu anderen Autoren abweichende Herangehensweise genutzt. Deren Fokus liegt in der Regel auf synthetischen Signalen [2], [119], [120] oder isolierten Komponenten [11], [154].

#### Aufnahme der Stimuli

Die Aufnahme der Geräusche fand in einem Semi-Freifeldraum statt. Er weist einen schallharten Boden und schallabsorbierende Elemente an den Seitenwänden und der Deckfläche auf. Durch diesen Aufbau kann das Abbild eines realitätsnahen Freifeldes angenähert werden, wobei die in der Natur reflektierten und sich überlagernden Signalanteile fehlen. Exemplarisch zeigt Abbildung 3.1 I) eine schematische Darstellung.

Für die gehörgerechte, binaurale Aufnahme der Geräusche wurden zwei Kunstköpfe vom Typ HMS IV der Firma HEAD acoustics GmbH verwendet. Um einen zeit- und phasenrichtigen Mitschnitt der Signale zu gewährleisten, fand eine Synchronisation zueinander statt. Ein Kopf steht außerhalb des zu messenden Objektes, je 45 cm hinter und neben der B-Säule. Er wurde so platziert, dass sich seine Ohrmikrophone 165 cm über dem Boden befinden und der Korpus dem Fahrzeug im 45°-Winkel zugewandt ist. Dieser Aufbau simuliert eine durchschnittliche, männliche Person<sup>1</sup> [163] beim Öffnen der Tür. Der zweite Kopf befindet sich innerhalb des Fahrzeuges auf dem Fahrersitz und repräsentiert den klassischen Insassen. Für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen wurde eine identische Position sichergestellt, bei der die Ohrmikrophone stets vor der B-Säule und oberhalb der Türbrüstung liegen<sup>2</sup>.

Mit Ausnahme des Türzuschlags bleibt das Fahrzeug für die Aufnahme aller weiteren

<sup>1</sup>Gemäß der Zusammensetzung der Probanden wurde das 50%-Perzentil eines Mannes im Alter von 26 – 40 Jahren gewählt. Die Person trägt leichte Bekleidung und die Kompression der Zwischenwirbelscheiben wurde zur Tagesmitte bestimmt.

<sup>2</sup>Die exakte Platzierung wurde nach einer internen Anweisung vom Unternehmen der BMW AG vorgenommen.

Signale im geschlossenen Zustand. Modellspezifische Phänomene wie ein variierender Dichtungsgegendruck oder maskierende Einflüsse einzelner Stellmotoren treten somit nicht auf. Weiterhin gewährleistet eine externe Stromversorgung den identischen Ladezustand der Batterie, um davon abhängige Effekte zu minimieren.

Für das Geräusch des Türzuschlags erweist sich die gemessene Schließgeschwindigkeit als ein entscheidendes Kriterium für die wahrgenommene Qualität. So gilt es, ein vollständiges Einrasten sicherzustellen und zugleich ein realitätsfernes Missbrauchsverhalten durch einen zu schnellen Schließvorgang zu vermeiden. Entsprechend der experimentellen Erfahrung innerhalb der BMW AG und bereits durchgeführter Untersuchungen [121] wird die Schließgeschwindigkeit auf  $v = 1,2 \frac{m}{s}$  (Toleranz:  $\pm 0,02 \frac{m}{s}$ ) standardisiert. Eine Lichtschranke am Schließbügel erfasst den tatsächlichen Geschwindigkeitswert.

Um die inhärente Geräuschqualität der Aufnahmen reliabel und belastbar bewerten zu können, werden herstellerspezifische Störgeräusche und Verzerrungen aus den Signalen entfernt. Hierzu zählen durch Blinker, Hupe oder klappbare Außenspiegel verursachte Schallemissionen. Sie schließen häufig an die relevanten Signalausschnitte an. Um ein homogenes Versuchsdesign sicherzustellen [19] werden die Stimuli hinsichtlich deren Länge und Schalldruckpegel normiert.

#### Durchführung der Hörversuche

Die auditive Empfindung wird isoliert vom haptischen und optischen Sinneseindruck über Kopfhörer gemäß Abbildung 3.1 II) stimuliert. Zu einer möglichst wirklichkeitsgetreuen Wiedergabe tragen offene Kopfhörer des Typs STAX SR-202 bei. Sie bilden den gesamten Hörfrequenzbereich quasi vollständig frei von kopfhörerspezifischen Verzerrungen ab. Die Hörversuche fanden in einem schallreduzierten Raum bei homogenen Lichtverhältnissen statt. Jeder der Hörplätze wurde samt zugehörigem Equipment<sup>3</sup> durch die Firma HEAD acoustics GmbH zueinander angeglichen. Zu Beginn des Experiments lag den Teilnehmern ein schriftlicher, standardisierter Text vor. Dieser erklärte die zugrunde liegende Versuchsmethode sowie den weiteren Ablauf. Anschließend präsentierte der Versuchsleiter die zu bewertenden Geräusche einmalig. Waren bei den Probanden noch Fragen zum anstehenden Hörversuch offen, wurden diese durch den Versuchsleiter beantwortet und danach mit der Bewertungsphase begonnen. Hier erhielten die Teilnehmer ein zusätzliches Blatt Papier, welches abhängig von der jeweiligen Aufgabe mit einem entsprechenden Vordruck versehen war. Das individuelle Urteil musste handschriftlich eingetragen werden.

Im Folgenden werden die verwendeten Hörversuchsmethoden spezifiziert und detailliert aufgezeigt:

- *Semantisches Differential*

Für das Türgriffschnappen und das Rückschnappen des Blinkerhebels wurde jeweils ein kontextspezifisches Semantisches Differential entwickelt (siehe auch Kapitel 2.2.2). Es basierte auf einer bipolaren, siebenstufigen Likertskala. Methodisch geplante Kontroll- und Experimentalbedingungen glichen mögliche Lerneffekte

---

<sup>3</sup>Jeder Teilnehmer erhält einen Kopfhörer, der über einen Verstärker (HPS IV 2486 PVA IV.3) von einem programmierbaren, digitalen Equalizer (HPS IV 2482 PEQ IV) bedient wird.

sowie nachlassende Konzentration aus. Deshalb variierte neben der zufälligen Polung der Adjektive auf der linken und rechten Seite auch deren Reihenfolge für jeden Fragebogen. Im Anschluss an die subjektive Bewertung wurden die Ergebnisse zusammengefasst und mittels explorativer Faktoranalyse (IBM SPSS Statistics, Version 23) ausgewertet. Dabei wurden identisch assoziierte Adjektive per Hauptkomponentenanalyse zu übergreifenden Wahrnehmungsdimensionen reduziert. Der graphische Wendepunkt im Screeplot einerseits sowie die Eigenwerte von  $\lambda > 1$  dienten als Kriterium aussagekräftiger Faktoren. Abschließend führte eine Varimax-Rotation<sup>4</sup> dazu, die Ladungsquadrate innerhalb der extrahierten Faktoren zu maximieren.

- *Paarvergleich*

Mit wachsender Dauer einer subjektiven Bewertung fällt die Unterdrückung nicht auditiver Sinne zunehmend schwer. Zu den möglichen Ursachen dieser Konzentrationschwächen zählen neben Ermüdung auch Unter- oder Überbelastung. Um einer erschwerten Auswertung vorzubeugen, liegt die maximale Anzahl der zu bewertenden Stimuli bei acht Geräuschen (28 Paare)<sup>5</sup> je Hörversuch. Eine anschließende Befragung der Urteiler ergab, dass deren Konzentrationsfähigkeit durch den zeitlichen Rahmen nicht beeinträchtigt gewesen ist.

Folgendes Muster wurde für die Wiedergabe eines Paares eingehalten:

$$2x \text{ Stimulus } A \longrightarrow 2x \text{ Stimulus } B \quad 1x \text{ Stimulus } A \longrightarrow 1x \text{ Stimulus } B$$

Der Versuchsleiter spielte jeden Stimulus *A* und *B* zweimal vor. Nach einer kurzen Pause wurden beide Signale nochmals direkt nacheinander präsentiert. Dabei trafen die Probanden ihre Entscheidung für das von ihnen als hochwertiger wahrgenommene Geräusch (Wahlzwang). Um das Antwortverhalten auf Konsistenz zu untersuchen, wurden deren Urteile mithilfe des  $\chi^2$ -Tests statistisch geprüft. Der kritische Wert der Irrtumswahrscheinlichkeit lag bei  $\alpha = 0,05$ .

Bei der qualitativen Bewertung wird die Entscheidung auf dem individuellen, psychologischen Kontinuum getroffen. Sie gibt allerdings keinen Aufschluss über den tatsächlichen Zwischenraum [136]. Die Größe des qualitativen Abstandes muss aus der Häufigkeit gewonnen werden, mit der die Probanden einen Stimulus einem anderen vorziehen [169]. Die so gewonnenen ordinalskalierten Ergebnisse lassen sich mittels einer Dominanzhäufigkeitsmatrix in eine Intervallskala überführen [113], [169], [188]. Besitzen zwei Rangfolgen intervallskaliertes Niveau, können sie in einen gemeinsame überführt werden. Hierfür sind mindestens zwei simultan auftretende Objekte notwendig. Weisen diese ein identisches Verhältnis in beiden Gruppen auf, berechnen sich die Transformationen jeglicher Werte  ${}_2R_i$  in der gemeinsamen Ordnung zu  ${}_1R_i^n$ .

$${}_1R_i^n = {}_1R_y + ({}_2R_i - {}_2R_y) \frac{{}_1R_x - {}_1R_y}{{}_2R_x - {}_2R_y} \quad (3.1)$$

<sup>4</sup>Bei der Varimax-Rotation werden die Faktoren so lange im vorher festgelegten Wahrnehmungsraum gedreht, bis die Varianz der quadrierten Ladungen ihr Maximum für jeden Faktor erreicht.

<sup>5</sup>Die maximale Bewertungsdauer samt standardisierter Einführung war auf 25 Minuten beschränkt.

Die mit einer  $_1$  gekennzeichneten Positionen stammen aus der Zielgruppe, die mit einer  $_2$  markierten aus der zu überführenden Gruppe.

Prinzipiell legt das Verfahren nach Bradley, Terry und Luce die Distanz  $w_{jk}$  der Objekte  $j$  und  $k$  danach fest, wie häufig das eine Objekt gegenüber dem anderen bevorzugt wurde. Dafür wird der folgende logarithmische Zusammenhang benutzt.

$$w_{jk} = \lg \frac{N_k}{N_j + N_k} - \lg \frac{N_j}{N_j + N_k} \rightarrow w_{jk} = \lg \frac{N_k}{N_j} \quad (3.2)$$

$N_j$  repräsentiert jeweils die kumulierte Häufigkeit der Probandenantworten bei einem Paar, wenn ein insgesamt konsistentes Urteilsverhalten vorliegt. Unter Beachtung der Eigenschaften intervallskalierter Daten berechnen sich die Werte  $r_k$  aus der Spaltensumme  $\sum_{j=1} w_{jk}$  und der Geräuschanzahl. Abschließend wird die Datenreihe durch Nullsetzen ihres Minimums verschoben und mit der Wurzel der Quadratsumme  $\sqrt{\sum (r_k^2)}$  normiert (siehe Tabellen A.1 und A.2 im Anhang).

- *Kategoriale Bewertung*

Bei der Methode der kategorialen Bewertung wurden die Probanden gebeten, die Geräuschqualität auf einer sieben- oder neunstufigen Skala zu bewerten<sup>6</sup>. Deren Zentrum beschreibt per Definition ein neutrales Urteil. Anhand der opponierenden Begriffe *qualitativ minderwertig* und *qualitativ hochwertig* wurde die Skalierung in äquidistanten Stufen weiter spezifiziert. Ein Geräusch wurde drei Mal inklusive kurzer Pausen abgespielt, wobei ein erneutes Abspielen auf Probandenwunsch möglich war. Um den Einfluss des vorangehenden Geräusches zu minimieren, wurde die Abspielfolge der Geräusche für jeden Teilnehmer variiert und jeder Stimulus pro Experiment zweimal dargeboten (Test und Retest). Dadurch kann die Reliabilität und somit die Aussagekraft der Probandenurteile anhand einer Korrelationsanalyse nach Pearson (siehe Kapitel 2.4) hinterfragt werden. Sie prüft den linearen Zusammenhang zwischen der ersten und zweiten Bewertung der Geräusche. Wird ein kritischer Wert von  $r_{krit} = 0,521$  (einseitiger Test) für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,05$  überschritten, galten die Daten als reliabel. Weiterhin diene die Methode der kategorialen Bewertung vorrangig zur unabhängigen Validierung der intervallskalierten Ergebnisse.

- *Rangfolgetest*

Für die detaillierte Evaluation des psychoakustischen Parameters  $T_S$  wurden acht Geräusche des Türzuschlags synthetisch verändert (siehe hierzu die Ausführungen in 3.4.2). Durch eine sequentielle Abstufung im Zeitbereich kamen zu jedem Original zwei weitere Stimuli hinzu. Da diese Maßnahme zu komplexen und schwer differenzierbaren Geräuschmerkmalen sowie zu einer hohen Anzahl an Stimuli führte, wurde für die Bewertung die Methode des *unvollständigen Rangfolgetests* mit Wahlzwang gewählt. In einem Experiment wurden je neun der 24 Signale präsentiert, sodass sich abschließend eine für alle Geräusche repräsentative Rangfolge ableiten ließ.

<sup>6</sup>Eine neunstufige Skala wurde gewählt, wenn von den Teilnehmern bei vorab durchgeführten Paarvergleichen eine größere Anzahl an Bewertungsstufen angesprochen wurde.

## Probanden

Die Probanden für alle Experimente dieser Arbeit kamen aus dem näheren Umfeld der Fahrzeugentwicklung der BMW AG und waren deshalb mit den akustischen Anforderungen qualitativ hochwertiger PKW vertraut. Unter den 42 Mitarbeitern befanden sich 28 Laien sowie 14 Fachkräfte der Akustik. Vier von ihnen waren wiederum als Geräuschexperten für Türen und Klappen tätig. Die Abbildung 3.2 zeigt die nationale Herkunft sowie die Aufteilung nach Geschlecht (16 Frauen im Alter von 23-40 Jahren und 26 Männer im Alter von 19-52 Jahren)<sup>7</sup>. Insgesamt betrug der Altersdurchschnitt 30,2 Jahre. An den drei Hörversuchen zur subjektiven Bewertung des psychoakustischen Parameters  $T_5$  nahmen ausschließlich acht Experten der Funktionsakustik teil.

Bei keinem der Probanden lag ein dokumentierter Hörschaden vor; sie galten deshalb als normalhörend. Eine Fahrerlaubnis besaß jeder Teilnehmer, wobei acht Personen ein Fahrzeug der Marke BMW fuhren. Mit Ausnahme von vier Probanden war mindestens einer der Fahrzeugtypen vom Kleinwagen bis zur oberen Mittelklasse in Privatbesitz. Eine derartige Zusammensetzung der Probanden stellte sicher, dass kein reines Expertenwissen abgebildet wurde. Vielmehr lag ein breites Spektrum vor, in dem sich Laien aber auch mit der akustischen Entwicklung vertraute Personen wiederfinden.

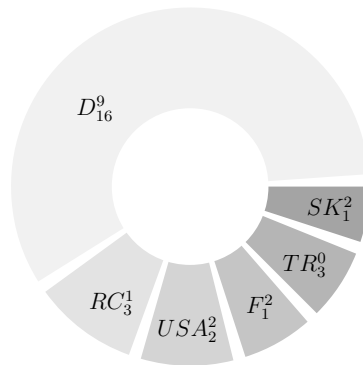


Abbildung 3.2: Zusammensetzung der Probanden für die Hörversuche, aufgeteilt nach nationaler Herkunft und Geschlecht,  $X_m^w$ . D: Deutschland, RC: Republik China, USA: Vereinigte Staaten von Amerika, F: Frankreich, TR: Türkei, SK: Slowakei.

## Objektive Modellparameter

Ein Teilziel dieser Arbeit konzentriert sich auf den qualitativen Vergleich von physikalischen und psychoakustischen Parametern zur objektiven Prognose der empfundenen Geräuschqualität. Dieser Prozess ist schematisch in Abbildung 3.3 dargestellt. Auf der Grundlage der kumulierten Ergebnisse des paarweisen Vergleichs lässt sich eine

<sup>7</sup>Das Fehlen einzelner Personen bei den Hörversuchen sowie eine zwischenzeitliche Veränderung des Alters ist nicht explizit aufgeführt.

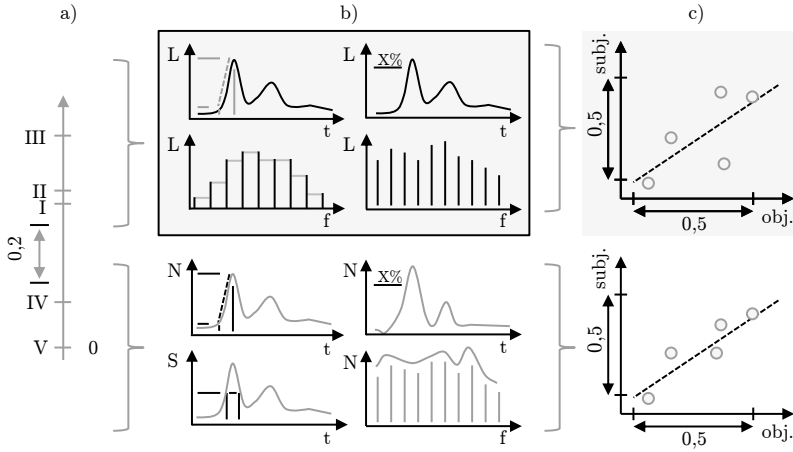


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise bei der Objektivierung von Geräuschqualität. Auf der Basis von intervallskalierten Daten, abgeleitet von der subjektiven Bewertung a) und den berechneten Werten der physikalischen b) (oben) und psychoakustischen b) (unten) Parameter finden lineare Regressionsanalysen statt c).

intervallskalierte Rangfolge der Geräusche mithilfe des Ansatzes nach Bradley, Terry und Luce [113], [169], [188] ableiten, a). Dieses Skalenniveau stellt eine notwendige Voraussetzung dar, um eine Beziehung zwischen der empfundenen Geräuschqualität und deren objektiver Prognose abzuleiten. Um den Prozess der Objektivierung möglichst effizient und effektiv zu gestalten, werden gezielt physikalische und psychoakustische Parameter ausgewählt. Diese Parameter ergeben sich aus den Ergebnissen einer vorab durchgeführten Studie zur Reduktion des Wahrnehmungsraums. Vor allem die psychoakustischen Parameter beschreiben primär Empfindungsgrößen oder stehen in Bezug zu einer Empfindungsgröße, die mit dem Kontext der abgeleiteten Wahrnehmungsdimensionen assoziiert wird, b) (siehe Kapitel 3.2). Auf Basis dieser Gesamtheit werden schließlich Modellparameter mittels Regressions- und Korrelationsanalysen abgeleitet, c). Die Güte der einzelnen Modelle und Parameter wird anhand der Signifikanz und Reliabilität beurteilt, mit der die wahrgenommene Geräuschqualität unabhängig von Signaltyp beschrieben und vorhergesagt werden kann.

Nicht betrachtet werden die Rauigkeit [173] und die Tonalität [43]. Die Norm des letztgenannten Parameters fordert länger andauernde Geräusche wobei die Rauigkeit bei wiederkehrenden, periodischen Signalanteilen bestimmte Merkmale der Modulation und die Einhüllende berechnet. Sie wird vor allem in der Antriebsakustik verwendet und eignet sich weniger für singuläre Geräusche [184].

## 3.2 Ableitung relevanter Modellparameter

Die harmonische Abstimmung eines Geräusches auf das Produkt sowie die Integration des kognitiven Aspektes stellen die wesentlichen Bestandteile einer qualitativen Geräuschemetrik dar. Hierfür ist es zunächst wichtig, die individuelle Erwartungshaltung des Menschen an einen wertigen Klang zu erfassen. Durch die verbale Beschreibung des Wahrnehmungsraumes werden diese perzeptiven Zusammenhänge identifiziert und stellen so hypothetische Dimensionen für die Beschreibung der Daten dar. Anhand der dadurch zugrunde liegenden Assoziation können objektive Parameter als deskriptives Maß für die Geräuschqualität ausgewählt und interpretiert werden.

### 3.2.1 Semantischer Wahrnehmungsraum

Das Ziel dieser Studie ist es, den Wahrnehmungsraum von singular impulshaften Fahrzeuggeräuschen anhand von übergeordneten Dimensionen zu charakterisieren. Mit diesen Dimensionen und den darauf ladenden Begriffspaaren werden bestimmte Geräuschmerkmale in Verbindung gebracht, die die wahrnehmbare Qualität des Signals bestimmen. Im Folgenden wird die Hypothese aufgestellt und untersucht, dass anhand der assoziierten Bedeutung der Dimensionen objektive Parameter abgeleitet werden können, die in direkter Beziehung zu den klassischen Empfindungsgrößen stehen. Damit sollen parametrische Modelle entwickelt werden können, die die Geräuschqualität von Signalen desselben Typs gezielt und präzise beschreiben und vorhersagen können.

#### Stimuli und Methode

Um die akustischen Anforderungen und Erwartungen an ein hochwertiges impulshaftes Fahrzeuggeräusch verbal abzubilden, fanden Untersuchungen am Geräusch des Türgriffschnappens statt. Hierfür wurden acht Signale binaural aufgenommen und nach der Methode des Semantischen Differentials bewertet. Jeweils vier dieser Geräusche waren Teil eines halbstündigen Experiments. Dabei wurden die Teilnehmer gebeten, jeden Stimulus anhand deskriptiver Adjektive auf einer siebenstufigen Likertskala zu beurteilen. Abschließend wurden die Daten aller Probanden zusammengeführt und mittels einer Faktoranalyse ausgewertet (siehe Kapitel 2.4.2). Hiermit konnte der Wahrnehmungsraum anhand der statistischen Kriterien (Barlett-Test, Kaiser-Maier-Olkin-Maß, Eigenwert  $\lambda > 1$ ) auf die relevanten Faktoren reduziert werden.

Da explizit die emotionalen Assoziationen gegenüber singular impulshaften Fahrzeuggeräuschen erfasst werden sollten, wurden die deskriptiven Adjektive kontextspezifisch ausgewählt. Hierfür identifizierten zwölf Fachkräfte der Funktionsakustik der BMW AG 19 charakteristische Begriffspaare. Im Anschluss wurden Laien befragt, inwiefern die ausgewählten Begriffe für die subjektive Bewertung des Türgriffschnappens geeignet wären. Hieraus resultierten die in Tabelle 3.3 aufgelisteten 17 Adjektivpaare. Weiterhin sollten die Stimuli mit der höchsten und niedrigsten empfundenen Geräuschqualität formal auf dem jeweiligen Fragebogen gekennzeichnet werden. So konnte anhand der Ausprägung der bipolaren Bezeichner ein optimaler Klang für die Entwicklung der relevanten Bauteile und deren Peripherie abgeleitet werden.

## Ergebnis

Neben Attributen wie *laut*  $\leftrightarrow$  *leise* und *hochfrequent*  $\leftrightarrow$  *tieffrequent*, die direkt den Klang beschreiben, treten Kombinationen ohne Verbindung zur auditiven Empfindung auf. Hierzu zählen z.B. *luxorios*  $\leftrightarrow$  *einfach*, *klapprig*  $\leftrightarrow$  *solide* und *billig*  $\leftrightarrow$  *teuer*. Affektive Verknüpfungen gegenüber Geräuschen lösen Paare wie *lästig*  $\leftrightarrow$  *angenehm*, *störend*  $\leftrightarrow$  *erwünscht* und *minderwertig*  $\leftrightarrow$  *hochwertig* aus, da hier eine konnotative Assoziation zugrunde liegt. Durch diese Begriffe kann der mehrdimensionale Wahrnehmungsraum impulshafter Fahrzeuggeräusche detailliert abgebildet werden, da sie sich aus Assoziationen der Geräuschqualität, des Geräuschkomforts sowie der Psychoakustik zusammensetzen.

Das Ergebnis der qualitativen Wahrnehmung eines Geräusches des Türgriffschnappens weist signifikante Unterschiede in der Beurteilung des optimalen Klanges auf. In Tabelle 3.1 weicht der arithmetische Mittelwert  $\bar{x}$  aller Adjektivpaare zwischen dem als hochwertig (hellgrau) und dem als minderwertig (dunkelgrau) beschriebenen Stimulus um mindestens eine Skalenstufe ab.

Die auf den Faktor *Wertigkeit* ladenden Begriffspaare beschreiben jeweils die vorletzte oder die maximale Ausprägung für das als hochwertig wahrgenommene Geräusch. Dabei wird die äußerste Stufe durch die Attribute *hochwertig*, *teuer* und *luxuriös* erreicht. Demgegenüber befinden sich die arithmetischen Mittelwerte von *lästig*, *störend* und *unangenehm* bei  $\bar{x} = 3$  und zeigen somit nur eine leicht negativ assoziierte Tendenz für den als minderwertig empfundenen Stimulus.

Als Teil der zweiten Wahrnehmungsdimension *Intensität* weisen *laut*  $\leftrightarrow$  *leise* eine Differenz von zwei Zwischenstufen sowie *hart*  $\leftrightarrow$  *weich* eine Abweichung von einer Stufe in der Beurteilung auf. Die Probanden bevorzugen das leisere und eher weichere Geräusch. Weiterhin gilt ein *massiver* verglichen zu einem *hohlen* Klang als hochwertig. Aus den schriftlichen Kommentaren geht hervor, das eine hohl klingende Tür mit mangelnder Sicherheit und minderwertiger Qualität verknüpft wird.

Mit  $\bar{x} = 7$  für das wertigere und  $\bar{x} = 2$  für das weniger wertigere Geräusch erreicht das Begriffspaar *klapprig*  $\leftrightarrow$  *solide* die größte Differenzierung relativ zu den weiteren Adjektiven des Faktors *Dynamik*. Weiterhin bestätigt die ähnlich starke Ladung der Adjektive *hochfrequent* und *scharf* eine auditive Schärfeempfindung, wenn sich hochfrequente Anteile im Stimulus wiederfinden [116]. Diese Wahrnehmungsdimension kann anhand der Norm für die Schärfe [44] berechnet werden [15], [210]. Somit können diese Begriffe den Frequenzinhalt der Geräusche annähernd beschreiben.

Für die vierte Wahrnehmungsdimension weist das schlechtere Geräusch einen arithmetischen Mittelwert  $\bar{x} = 2$  und das als hochwertig wahrgenommene  $\bar{x} = 6$  für alle Attributpaare auf. Somit differenzieren die Probanden innerhalb der Faktoren *Klang* und *Wertigkeit* identisch stark. Unabhängig davon bestätigt die ähnliche Bewertung von *ploppig*  $\leftrightarrow$  *nicht ploppig* mit  $\bar{x} = 2$  bzw.  $\bar{x} = 3$  die fehlende Assoziationskraft.

Die Hörempfindung für das Rückschnappen des Türgriffes umfasst nach Tabelle 3.2 einen reduzierten Wahrnehmungsraum von vier Dimensionen. Mit Werten von  $0,77 < KMO < 0,84$  für das Kaiser-Meyer-Olkin-Maß lässt sich die Faktoranalyse für diesen Datensatz als *gut geeignet* interpretieren. Der Barlett-Test auf Sphärizität weist mit einer Signifikanz  $p_s = 0,00$  die Hypothese zurück, die Ergebnisse könnten aus einer



Tabelle 3.1: Mittelwerte der semantischen Bewertung eines als hochwertig (++) und minderwertig (--) klassifizierten Geräusches des Türgriffschnappens.

laut			--		++		leise
gut		++				--	schlecht
klapprig		--				++	solide
minderwertig		--				++	hochwertig
blechern		--			++		nicht blechern
unangenehm			--		++		angenehm
hart				++	--		weich
ploppig		--	++				nicht ploppig
hohl			--			++	massiv
billig		--				++	teuer
dumpf		++			--		metallisch
lästig			--		++		angenehm
luxuriös	++					--	einfach
werthaltig		++			--		wertlos
störend			--		++		erwünscht
scharf				--	++		mild
hochfrequent			--		++		tieffrequent

Tabelle 3.2: Prozentuale und kumulative Verteilung der Varianzanteile der reduzierten Dimension beim Türgriffschnappen.

Faktor	Erklärte Gesamtvarianz			
	Summe	% der Varianz	Kumulativ in %	
Wertigkeit	7,72	45,40	45,40	
Intensität	2,47	14,55	59,95	
Dynamik	1,86	10,93	70,88	
Klangfarbe	1,39	8,19	79,07	

Tabelle 3.3: Rotierte Komponentenmatrix beim Türgriffschnappen. Darstellung der Faktorladungen auf die reduzierten Dimensionen.

Begriffspaar	Faktor			
	Wertigkeit	Intensität	Dynamik	Klangfarbe
lästig - angenehm	-0,898			
störend - erwünscht	-0,835			
billig - teuer	-0,809			
minderwertig - hochwertig	-0,808			
werthaltig - wertlos	0,769			
unangenehm - angenehm	-0,767			
luxuriös - einfach	0,734			
laut - leise		0,879		
hohl - massiv		-0,844		
hart - weich		0,787		
hochfrequent - tieffrequent			0,866	
scharf - mild			0,823	
klapprig - solide			0,671	
gut - schlecht				0,832
dumpf - metallisch				0,796
blechern - nicht blechern				-0,680
ploppig - nicht ploppig				

Population alleiniger Nullkorrelationen stammen. Im Mittel aller Geräusche ergibt sich eine kumulierte Varianz von  $\sigma^2 = 79,07\%$ . Den prozentual größten Betrag leistet der Faktor *Wertigkeit* mit  $\sigma^2 = 45,40\%$ . Gemäß Tabelle 3.3 laden z.B. die Begriffspaare *lästig*  $\leftrightarrow$  *angenehm* mit  $r = -0,898$ , *störend*  $\leftrightarrow$  *erwünscht* mit  $r = -0,835$  und *minderwertig*  $\leftrightarrow$  *hochwertig* mit  $r = -0,808$  negativ auf den ersten Faktor. Dagegen zeigt das Paar *luxuriös*  $\leftrightarrow$  *einfach* mit  $r = 0,734$  einen positiven Wert.

Mit einem Varianzanteil von  $\sigma^2 = 14,55\%$  beschreiben die Adjektive *laut*  $\leftrightarrow$  *leise* ( $r = 0,879$ ), *hohl*  $\leftrightarrow$  *massiv* ( $r = -0,844$ ) und *hart*  $\leftrightarrow$  *weich* ( $r = 0,787$ ) den als *Intensität* bezeichneten zweiten Faktor. Der dritte wird mit den Ladungen  $r = 0,866$  für *hochfrequent*  $\leftrightarrow$  *tieffrequent*,  $r = 0,823$  für *scharf*  $\leftrightarrow$  *mild* und  $r = 0,671$  für *klapprig*  $\leftrightarrow$  *solide* als *Dynamik* benannt. Aus Tabelle 3.2 geht hierfür ein Eigenwert von  $\lambda = 1,86$  und ein prozentualer Varianzanteil von  $\sigma^2 = 10,93\%$  hervor. Die vierte Wahrnehmungsdimension *Klangfarbe* weist die statistischen Kennwerte  $\lambda = 1,39$  sowie  $\sigma^2 = 8,19\%$  auf. Entsprechend Tabelle 3.3 umfasst sie die verbalen Deskriptoren *gut*  $\leftrightarrow$  *schlecht* mit  $r = 0,832$ , *dumpf*  $\leftrightarrow$  *metallisch* mit  $r = 0,796$  sowie *blechern*  $\leftrightarrow$  *nicht blechern* mit  $r = -0,680$ .

Die Kombination *ploppig*  $\leftrightarrow$  *nicht ploppig* erfüllt das Kriterium der Normalverteilung nicht und kann keinem der vier Faktoren zugeordnet werden. Es liegt eine hohe Standardabweichung  $\sigma = 2,76$  relativ zum Mittel der weiteren Adjektive ( $\sigma = 1,24$ ) vor. In den schriftlichen Rückmeldungen der Hörversuche dokumentieren primär Probanden mit nicht deutscher Muttersprache fehlende Assoziationen mit dem Ausdruck *ploppig*.

### 3.2.2 Exemplarische Parameter

Der Wahrnehmungsraum des Türgriffschnappens lässt sich nach den vorliegenden Untersuchungen auf vier Dimensionen reduzieren. Hierbei stellt die *Wertigkeit* einen der Faktoren und zugleich den mit der höchsten Varianz dar. Da die auditive Wertigkeit eines Geräusches primär nur experimentell messbar ist und darüber hinaus den eigentlichen Gegenstand der Untersuchung bildet, kommt der Auswahl der objektiven Parameter eine erhöhte Bedeutung zu.

#### Physikalische Parameter

Nach der *Wertigkeit* stellt die *Intensität* die Wahrnehmungsdimension mit der zweithöchsten Varianz dar. Hierauf laden Begriffe wie *laut*, *massiv* und *hart* in annähernd gleicher Weise. Aus physikalischer Sicht werden deshalb diejenigen Parameter ausgewählt, die in Zusammenhang mit der energetischen Charakteristik und dem Schalldruck der Geräusche stehen. Neben dem Schalldruckpegel  $L_{dB SPL}$  wird die mittlere und maximale Steigung zum Maximum des Schalldruckpegels  $L_m$  und  $L_m^*$  betrachtet. Dadurch soll ein möglicher Einfluss der Lautstärke und deren impulshafter Anstieg auf die Wahrnehmung der Signale geprüft werden. Ein weiteres Kriterium stellen die Mittelwerte der Lautstärke aus einem niederfrequenten  $[200\text{ Hz} < L_{tfT} < 400\text{ Hz}]$  und hochfrequenten Bereich  $[5000\text{ Hz} < L_{hfT} < 8000\text{ Hz}]$  dar. Die Wahl der Bereiche ist durch die von Zwicker<sup>8</sup> entwickelten Barkbänder motiviert [210].

Für die Dimension *Dynamik* erfasst der Parameter  $t_{min}$  den zeitlichen Verbleib des Geräusches oberhalb eines Pegels von 45 dB und damit die Geräuschkdauer abhängig von der Lautstärke. Der Effekt der *Klangfarbe* wird durch den spektralen Schwerpunkt  $f_{Sp}$  berücksichtigt.

#### Psychoakustische Parameter

Um den Faktor *Intensität* objektiv abbilden zu können, werden im Rahmen der psychoakustischen Analysen vorrangig Parameter auf Basis der Lautheit ausgewählt. Für die instationären Geräusche nutzt die vorliegende Arbeit die Lautheit  $N$  und davon abgestufte Perzentillautheiten  $N_x$ <sup>9</sup> nach DIN 45631/A1 [41]. Alternative Berechnungs-

<sup>8</sup>Zwicker et al. [211] bieten eine Software an, die die Lautheit anhand der Terzspektren nach ISO 532B berechnet [104]

<sup>9</sup>Die Perzentillautheit  $N_5$  entspricht der Lautheit, die in 5% der Messzeitintervalle erreicht oder überschritten wird.

modelle der Lautheit gehen auf Glasberg und Moore  $N_{TVL}^{10}$  sowie auf Boulet  $N_{ESI}^{11}$  zurück. Ähnlich dem physikalischen Ansatz wird die mittlere Steigung zum Maximum (95%-Perzentil) der Lautheit  $N_m$  sowie die maximale Steigung  $N_m^*$  berücksichtigt. Die Berechnung des Schärfewertes  $S_{max}$  erfolgt nach Zwicker und beschreibt die dritte Wahrnehmungsdimension *Dynamik*, da hierauf Begriffe wie *scharf* und *hoch-/tieffrequent* laden. Parallel dazu wird die Dauer der Schärfe  $T_S$  [93] berechnet, solange sich der Wert der Schärfe oberhalb eines charakteristischen Grenzwertes von 1 *acum* befindet<sup>12</sup>. Die Idee für den Parameter  $T_S$  fußt auf den schriftlich und mündlich kommunizierten Antworten der Probanden, die in den Hörversuchen häufig die unterschiedliche Dauer der “Weichheit“ eines Geräusches als Kriterium für die Wertigkeit nennen. Analog zum physikalischen Ansatz repräsentiert der durch eine A-Bewertung überlagerte frequenzabhängige Schwerpunkt  $f_{Sp(A)}$  die vierte Dimension *Klangfarbe*. Abhängig vom Frequenzinhalt der Geräusche sollen damit die Begriffe *metallisch* oder *blechern* aufgegriffen werden.

### 3.3 Korrelation signifikanter Modellparameter

Noch bevor die Akustik und die Haptik des Türgriffs einen Einfluss auf die kognitive Wahrnehmung beim Öffnen der Türen nehmen, löst das Entriegeln der Fahrzeugtür eine akustische Information über den entsperren Zustand aus. Entsprechend tritt ein Verriegelungsgeräusch auf, sobald der Fahrer das Fahrzeug zusperrt oder damit anfährt<sup>13</sup>. Da maskierende Effekte zumeist fehlen, kommt den inhärenten akustischen Ausprägungen eine erhöhte Bedeutung für die qualitative Wahrnehmung der einzelnen Funktion sowie des Gesamtfahrzeugs zu.

In einem ersten Schritt werden Verriegelungsgeräusche von Serienfahrzeugen subjektiv anhand der wahrgenommenen Geräuschqualität bewertet, schematisch dargestellt in Abbildung 3.4a). Hierzu dienen Hörversuche nach den Methoden der relativen und absoluten Skalierung. Parallel dazu werden die Werte der in Kapitel 3.2 identifizier-

<sup>10</sup>Bei  $N_{TVL}$  gibt es die short-term (STL) und die long-term (LTL) loudness. Es bleibt offen, welche Lautheit für derartig kurze Geräusche benutzt werden soll.

<sup>11</sup>Zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren verwendet Boulet impulsartige Geräusche von deutlich längerer Dauer als die in dieser Arbeit verwendeten.

<sup>12</sup>Fällt der Schärfewert für weniger als 5 ms unter die Grenze von 1 *acum* und übersteigt diesen Wert anschließend wieder, wird die Berechnung so fortgesetzt, als wäre das Signal jederzeit oberhalb der Grenze verblieben. Da die psychoakustische Schärfe auf die Berechnung der Lautheit zurückgeht und die untersuchten Geräusche ein breitbandiges Frequenzspektrum aufweisen, befindet sich die gewählte Dauer von 5 ms im Bereich der Maskierungseffekte des menschlichen Gehörs [210]. Das Gehör benötigt für die Wahrnehmung der Lautheit eine bestimmte Dauer des Tones, um die Tönhöhe präzise zu erfassen. Für Töne, deren Dauer unterhalb der kritischen Dauer liegt, hat das auditorische System des Menschen nicht genügend Zeit und der Ton wird als „Klick“ wahrgenommen. Dieser Prozess geschieht unabhängig von der Frequenz. Deswegen wird für Töne oberhalb einer Frequenz von 1 kHz eine kritische Dauer von 10 ms angenommen [85], [154]. Somit findet für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Signale lediglich ein geringer Abfall der Lautheit statt, der wegen der charakteristischen Signaleigenschaften nicht explizit wahrgenommen werden kann.

<sup>13</sup>Das automatische Verriegeln des Fahrzeugs beim Anfahren kann optional eingestellt werden oder eine länderspezifische Anforderung darstellen.

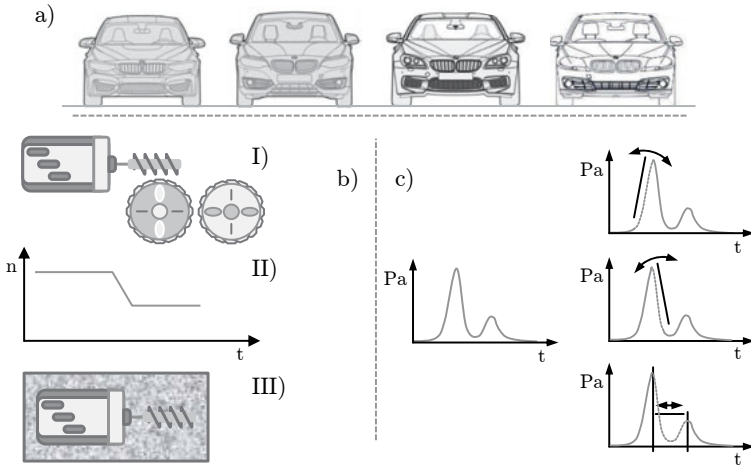


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens zur Objektivierung der Geräuschqualität von Verriegelungsgeräuschen. Im Anschluss an die Experimente zu Serienfahrzeugen a) finden Studien zu technisch variierten Geräuschen b) und synthetisch veränderten Signalen c) statt.

ten physikalischen und psychoakustischen Parameter zu den entsprechenden Signalen berechnet. Daran schließen lineare Regressionsanalysen an, aus denen schließlich die jeweiligen Parametermodelle zur objektiven Beschreibung und Prognose der subjektiv empfundenen Geräuschqualität hervorgehen.

Zur unabhängigen Validierung und Prüfung der objektiven Modelle erfolgen b) Untersuchungen an Geräuschen technisch veränderter Schlösser und c) synthetisch bearbeiteter Stimuli. Das Ziel ist es, die Qualität von Verriegelungsgeräuschen anhand objektiver Parameter prognostizieren zu können. Die gewählte Vorgehensweise ermöglicht es darüber hinaus, die qualitative Wirkung technischer Maßnahmen und den Einflussbereich von relevanten, inhärenten Signalmerkmalen zu erfassen und zu spezifizieren.

### 3.3.1 Verriegelungsgeräusche von Serienfahrzeugen

In den folgenden Untersuchungen zu realen Verriegelungsgeräuschen werden physikalische und psychoakustische Parametermodelle abgeleitet und validiert. Sie bilden die Grundlage für ein übergreifendes Modell, um die Güte von Geräuschen dieses Typs belastbar und reliabel beschreiben zu können. Weiterhin soll die Hypothese analysiert werden, inwiefern psychoakustische Parameter gegenüber physikalischen Parametern eine höhere Signifikanz in der objektiven Vorhersage aufweisen.

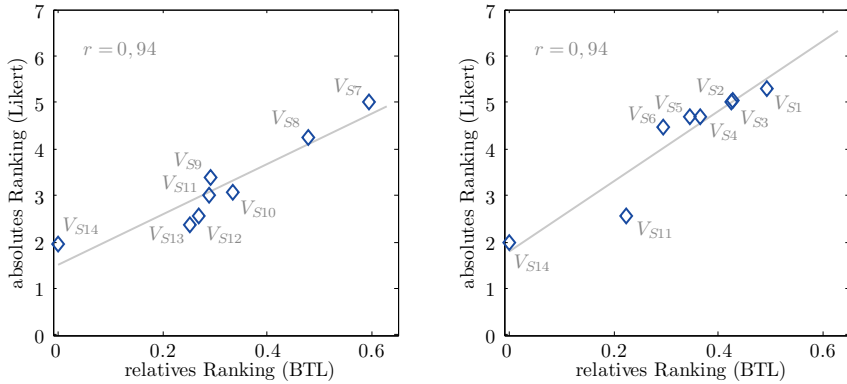


Abbildung 3.5: Korrelationsanalyse der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs und des absoluten Rankings anhand einer siebenstufigen Likertskala. Geräuschqualität von Verriegelungsgeräuschen von Serienfahrzeugen. Links: Gruppe A. Rechts: Gruppe B

#### Stimuli und Methode

Für die Studien wurden 14 Verriegelungsgeräusche von Serienfahrzeugen des Premiensegments aufgenommen. Sie werden in zwei Gruppen A und B zu je acht Stimuli<sup>14</sup> aufgeteilt und nach der Methode des paarweisen Vergleichs<sup>15</sup> klassifiziert. Um das Ergebnis dieser relativen Bewertung zu validieren, schließen zusätzlich absolute Experimente auf Basis einer siebenstufigen Likertskala an.

#### Ergebnis

In das kumulierte Ergebnis der subjektiven Geräuschbewertung fließen ausschließlich die Daten von konsistent antwortenden Teilnehmern ein. Als statistische Kriterien liegen der  $\chi^2$ -Test beim paarweisen Vergleich und der Korrelationskoeffizient nach Pearson bei der Methode der kategorialen Bewertung zugrunde. Entsprechend dieser Indikatoren mussten die Bewertungen von fünf der 42 Teilnehmer ausgeschlossen werden. Zudem wurden alle Stimuli  $V_{Si}$  auf Normalverteilung geprüft, wobei diese Hypothese für Geräusch  $V_{S6}$  verworfen werden muss. Eine detaillierte Auswertung der absoluten Urteile befindet sich im Anhang in Abbildung A.1. Basierend auf einer Korrelationsanalyse zwischen den intervallskalierten und absoluten Daten der subjektiv bewerteten Geräuschqualität ergibt sich für beide Gruppen A<sup>16</sup> und B ein hoher Wert von  $r = 0,94$ . Somit werden diese Ergebnisse als valide betrachtet. Sie sind in Abbildung 3.5 dargestellt.

<sup>14</sup>Zwei der Geräusche sind in beiden Gruppen identisch.

<sup>15</sup>Die Berechnung der Intervallskala ist exemplarisch im Anhang in den Tabellen A.1 und A.2 dargestellt.

<sup>16</sup>Die Verriegelungsgeräusche von Gruppe A werden als Fast-Fourier-Transformation im Anhang in den Abbildungen A.23 - A.26 dargestellt.

*Physikalischer Ansatz*

Für die Signale von Gruppe A führt die lineare Regressionsanalyse zu folgendem physikalischen Modell.

$$AW_{phy\ Series} = 0,32 + 0,10 \cdot L_{tfT} - 0,36 \cdot L_{hfT} + 0,07 \cdot t_{min} \quad (3.3)$$

Der Ansatz basiert auf den gemittelten Pegelwerten nieder- und hochfrequenter Terzbänder  $L_{tfT}$  und  $L_{hfT}$ . Für einen hohen Regressionskoeffizienten von  $R^2 = 0,93$  und ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß von  $R_{adj}^2 = 0,90$  muss die Signaldauer  $t_{min}$  hinzugenommen werden. Die Methoden der t- und F-Statistik ( $\alpha = 0,05$ ) beschreiben den hypothetisch postulierten Zusammenhang als signifikant. Der entsprechende Vergleich zwischen der objektiven Prognose des Modells (Ordinate) und der subjektiv empfunden Wertigkeit (Abszisse) ist in Abbildung 3.6 (links) dargestellt. Da der Parameter  $L_{hfT}$  mit  $-0,36$  die höchste Gewichtung aufweist, besitzt die Lautstärke hoher Frequenzen einen stark negativen Einfluss auf die Geräuschqualität. Des Weiteren werden tief-frequente Lautstärkeaspekte sowie ein länger andauernder Schließvorgang mit einer höheren Geräuschqualität verbunden. Eine unabhängige Validierung dieses Modells findet anhand der für Gruppe B ermittelten Daten statt. Hierbei korreliert die objektive Vorhersage nach Gleichung (3.3) mit einem Wert von  $r = 0,92$  mit der intervallskalierten Rangfolge der subjektiven Bewertung. Eine grafische Darstellung befindet sich im Anhang in Abbildung A.2.

*Psychoakustischer Ansatz*

Die Ableitung eines psychoakustischen Modells erfolgt analog zum physikalischen Ansatz mittels der Methode der linearen Regression und liefert

$$AW_{psy\ Series} = 0,27 - 0,23 \cdot N_5 - 0,07 \cdot T_S - 0,14 \cdot N_m^* \quad (3.4)$$

Basierend auf den subjektiven und objektiven Daten von Gruppe A ergeben sich die Perzentillautheit  $N_5$  und die eigens weiterentwickelten Parameter  $N_m^*$  und  $T_S$  als signifikante Prädiktoren ( $R^2 = 0,95$ ). Die Gewichtung von  $-0,23$  für  $N_5$  macht deutlich, dass ein leiseres Geräusch als hochwertiger empfunden wird. Einen weniger starken Einfluss zeigen die maximale Steigung  $N_m^*$  des impulshaften Anstiegs der Lautstärke mit  $-0,14$  und die Dauer der Schärfe  $T_S$  mit  $-0,07$ . Damit liegt ein qualitativ wertigeres Geräusch vor, wenn keine hochfrequenten Effekte nachklingen und dadurch ein gedämpfter Signalcharakter entsteht. Da der gesamte Modellierungsansatz von vier Freiheitsgraden bestimmt wird, gilt ein statistischer t-Wert von  $t_c = 2,78$  als grenzwertig. Er wird von allen Parametern überschritten, wobei die größte Differenz auf den Betrag von  $|t_{N_5} = -4,12|$  zurück geht. Somit weist die Perzentillautheit  $N_5$  die höchste Signifikanz auf. Die Daten der Regressionsanalyse zeigt Abbildung 3.6 (rechts). Darüber hinaus resultiert ein Korrelationswert von  $r = 0,95$ , wenn Gleichung (3.4) zur Prognose der subjektiven Rangfolge von Gruppe B verwendet wird. Dieser Wert übersteigt den des physikalischen Ansatzes (siehe Abbildung A.2).

Inwiefern kombinierte Metriken im Vergleich zu einzelnen Parametern zu einer höheren Vorhersagekraft der Geräuschqualität führen, soll anhand der psychoakustischen Modellierung gezeigt werden. Der Fokus liegt dabei auf der Lautheit  $N$ , der Perzentillautheit

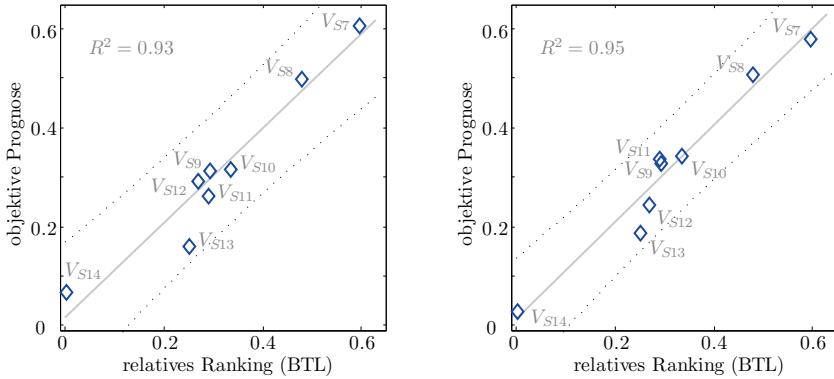


Abbildung 3.6: Regressionsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs mithilfe der objektiven Parameterwerte. Verriegelungsgeräusche von Serienfahrzeugen, Gruppe A. Links: physikalische Parameter. Rechts: psychoakustische Parameter

$N_5$ , der Schärfe  $S$  und der Dauer der Schärfe  $T_S$ . Deren Korrelation zur empfundenen Wertigkeit beschreibt Abbildung 3.7 am Beispiel der Verriegelungsgeräusche von Gruppe A. Für diesen Signaltyp weisen die lauthheitsbasierten Parameter  $N$  und  $N_5$  hohe Werte von  $r_N = -0,86$  und  $r_{N_5} = -0,88$  auf. Davon abweichend führt die Schärfe nur zu  $r_S = -0,55$ , wenn deren Maximum betrachtet wird. Im Gegensatz dazu korreliert die Dauer der Schärfe  $T_S$  ( $r_{T_S} = -0,83$ ) deutlich besser mit der Geräuschqualität. Deren objektive Vorhersagekraft liegt in etwa auf dem Niveau der Luthheitsparameter.

### 3.3.2 Technische Variation

Anhand von Kapitel 3.3.1 wurden Signalcharakteristika objektiv beschrieben, die einen signifikanten Einfluss auf die Qualitätswahrnehmung von Verriegelungsgeräuschen aufweisen. Im Folgenden werden diese Effekte gezielt durch die Integration technischer Maßnahmen variiert. Einerseits können die bestehenden Parametermodelle unabhängig validiert und weiter verbessert werden. Andererseits gelingt es dadurch, die qualitative Wirkung der technischen Veränderungen zu bewerten und zielführend in den akustischen Entwicklungsprozess des Fahrzeuges einfließen zu lassen.

#### Stimuli und Methode

Die Maßnahmen zur technischen Variation der Verriegelungsgeräusche konzentrieren sich auf das Schließmodul in der Tür. Sie sind schematisch in Abbildung 3.4 b) dargestellt. Zusätzlich zum Einfluss I) einer optimierten Werkstoffpaarung der Zahnräder und II) einer reduzierten Spannungsversorgung im Antrieb des Verriegelungsmechanismus wird III) eine ins Schloss integrierte Dämmung untersucht [162].



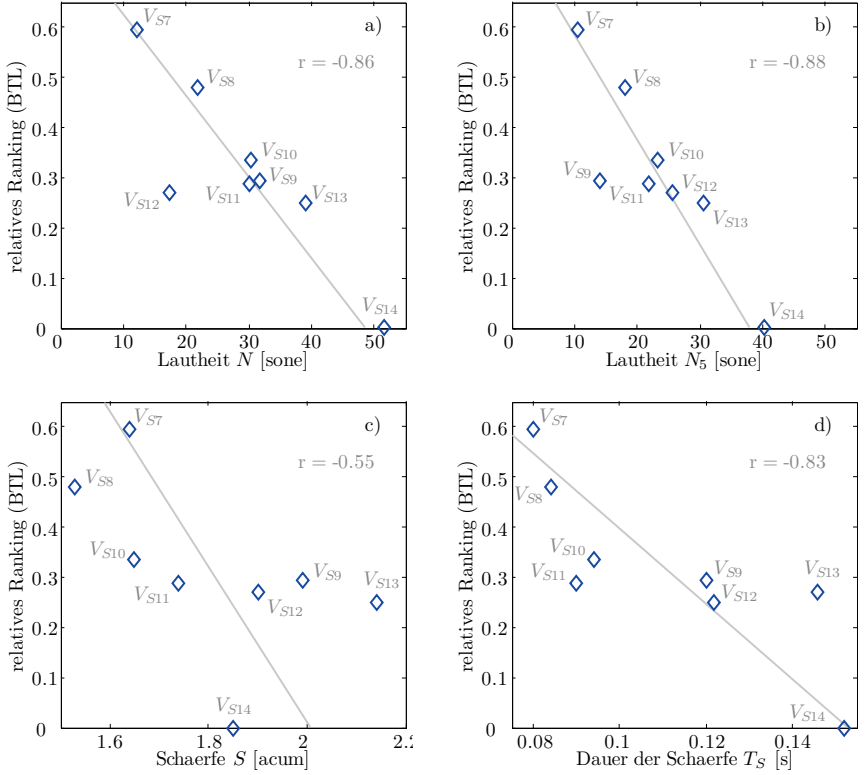


Abbildung 3.7: Korrelationsanalyse der Geräuschqualität von Verriegelungsgeräuschen von Serienfahrzeugen: a) Lautheit  $N$ , b) Perzentillautheit  $N_5$ , c) Schärfe  $S$ , d) Dauer der Schärfe  $T_S$

In Zusammenarbeit mit dem Rapid Prototyping Center (RPC) der BMW AG wurde ein akustisch verbessertes Material ausgewählt. Ausgehend von unterschiedlichen Kunststoffgranulaten wurden mehrere Bauteile mittels des 3D-Druckverfahrens gefertigt und manuell feinbearbeitet. Abschließend erfolgte der Einbau in ein Serienschloss, wobei das Bauteil mit der höchsten akustischen Wertigkeit für die Experimente verwendet wurde. Für einen verlangsamten Vorgang der Verriegelung wurde die Spannung über ein Potentiometer auf etwa 40% des ursprünglichen Wertes verringert. Die Funktion des Schlosses blieb vollständig erhalten. Mithilfe der akustischen Dämmung (Polyester beflocktes Polyurethan) wurden neben der Motor- und Antriebseinheit auch die Fügestellen im Gehäuse verstärkt gekapselt.

Insgesamt wurden acht Geräusche subjektiv nach der Methode des paarweisen Vergleichs bewertet und die Ergebnisse in eine intervallskalierte Rangfolge transformiert. Die anschließende Objektivierung ermöglicht eine kreuzweise Validierung mit den Daten aus Kapitel 3.3.1.

#### Ergebnis

Die Prüfung der Antworten auf Konsistenz geschieht anhand des  $\chi^2$ -Tests. Basierend auf einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,05$  wurden die Urteile von drei Männern und einer Frau nicht in das Gesamtergebnis mit aufgenommen.

#### Physikalischer Ansatz

Die physikalischen Parameter  $L_{tfT}$ ,  $L_{hfT}$  und  $t_{lim}$  beschreiben die empfundene Wertigkeit von technisch variierten Verriegelungsgeräuschen wie folgt.

$$AW_{phy\ tech} = 0,26 + 0,07 \cdot L_{tfT} - 0,28 \cdot L_{hfT} + 0,06 \cdot t_{min} \quad (3.5)$$

Für diesen Zusammenhang ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,91$ , den Abbildung 3.8 (links) veranschaulicht. Analog zu den Stimuli der Serienfahrzeuge liegt für den Parameter  $L_{hfT}$  mit einem Koeffizienten von  $-0,28$  ein hoher negativer Wert vor. Die weiteren Parameter  $L_{tfT}$  und  $t_{min}$  gehen positiv in die Berechnung ein und erreichen etwa ein Viertel der Gewichtung von  $L_{tfT}$ . Statistisch betrachtet weist der empirische Wert des F-Tests mit  $F_{emp} = 9,8$  auf ein signifikantes Modell hin. Mit der Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,05$  bestätigt der t-Test diese Annahme.

Unter Nutzung der intervallskalierten Rangfolge der Serienfahrzeuge (Gruppe A) erfolgt eine kreuzweise Validierung der physikalischen Modelle aus beiden Studien. Aus der Korrelationsanalyse resultiert ein Wert von  $r = 0,92$ , wenn die Geräuschqualität der technisch variierten Signale mit dem Ansatz der Serienfahrzeuge (Gleichung (3.3)) prognostiziert wird. Für die kreuzweise Vorhersage ergibt sich der Wert  $r = 0,91$ .

#### Psychoakustischer Ansatz

Es wurde ein dreiparametriges Modell entwickelt, das sich aus den psychoakustischen Parametern  $N_5$ ,  $T_S$  und  $N_m^*$  zusammensetzt.

$$AW_{psy\ tech} = 0,26 - 0,13 \cdot N_5 - 0,11 \cdot T_S - 0,05 \cdot N_m^* \quad (3.6)$$

Das Modell führt zu Regressionskoeffizienten von  $R^2 = 0,95$  und  $R_{adj}^2 = 0,91$ . Die Parameter  $N_5$ ,  $T_S$  und  $N_m^*$  sind auch Teil der objektiven Modellierung der Geräusche von Serienfahrzeugen. Gemäß Gleichung (3.6) kristallisieren sich die Perzentillautheit ( $-0,13$ ) und die Dauer der Schärfe ( $0,11$ ) als ausschlaggebende Parameter heraus, um die Geräuschqualität gut beschreiben und vorhersagen zu können. Im Vergleich zum physikalischen Modell erreicht die statistische Prüfung auf Signifikanz einen deutlich höheren empirischen F-Wert von  $F_{emp} = 26,4$ .

Das psychoakustische Modell des Kapitels 3.3.1 führt bei einer Korrelationsanalyse zwischen der subjektiven und objektiven Geräuschqualität der technisch veränderten Verriegelungsgeräusche zu einem Wert von  $r = 0,96$ . Wird die klassifizierte Rangfolge der Serienfahrzeuge von Gruppe A mit Gleichung (3.6) objektiv beschrieben, korreliert dies

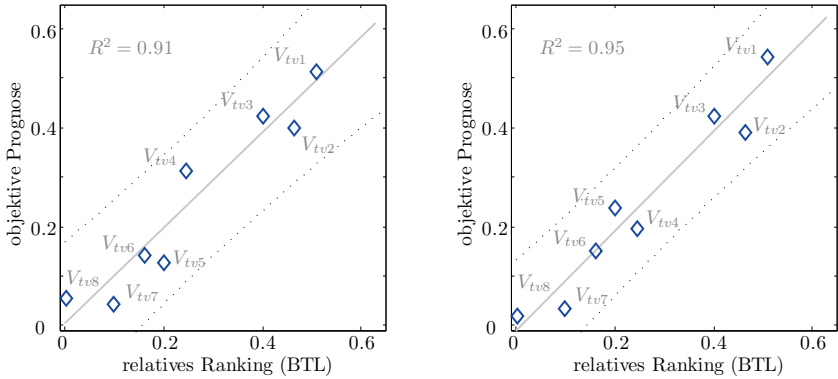


Abbildung 3.8: Regressionsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs mithilfe der objektiven Parameterwerte. Technisch variierte Verriegelungsgeräusche. Links: physikalische Parameter. Rechts: psychoakustische Parameter

zu  $r = 0,90$ . Der Wert liegt geringfügig unterhalb des physikalischen Ansatzes. Analog zu den Geräuschen von Serienfahrzeugen führt die lineare Regression von psychoakustischen Parametern verglichen mit den physikalischen zu höheren Koeffizienten. Weiterhin zeigen die untersuchten Daten eine bessere Vorhersagbarkeit der empfundenen Geräuschqualität anhand der psychoakustischen Modelle.

### 3.3.3 Synthetische Variation

Mittels einer synthetischen Variation werden Signalanteile von realen Verriegelungsgeräuschen gezielt verändert, um deren Wirkung auf die Qualitätswahrnehmung detailliert zu untersuchen. Ausgehend von den bereits gewonnenen Erkenntnissen wurden mehrere Merkmale identifiziert, die einen grundlegenden Einfluss gegenüber der Geräuschqualität aufweisen. Diese Anteile werden im Folgenden synthetisch verändert und anschließend anhand von Hörversuchen qualitativ bewertet. Damit lässt sich ein quantitativer Zusammenhang zwischen dem jeweils variierten Signalmerkmal und der wahrgenommenen Geräuschqualität ableiten.

#### Stimuli und Methode

Synthetisch bearbeitet wurden die vier realen Stimuli  $V_{S2}$ ,  $V_{S5}$ ,  $V_{S10}$  und  $V_{S13}$  aus Kapitel 3.3.1, da sie einen Querschnitt von hochwertigen und minderwertigen Geräuschen beschreiben (siehe Abbildung A.1). Diese Signale werden mithilfe des ADSR-Hüllkurvenmodells gezielt verändert. Gemäß der Untersuchungen zu realen und technisch veränderten Verriegelungsgeräuschen gelten neben der Flankensteigung (*Attack time*) und der Abklingzeit (*Decay time*) auch der zeitliche Abstand zu einem zweiten Impuls

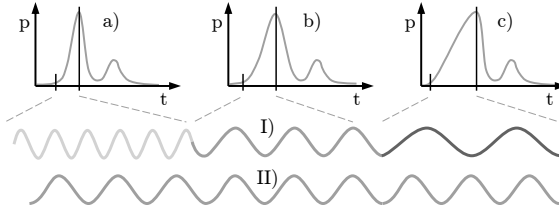


Abbildung 3.9: Schematische Darstellung der gleitenden Tonhöhenänderung. Ein originales Signal b) verglichen mit einem beschleunigt b) und verlangsamt c) abgespielten Geräusch führt zu dem geänderten Frequenzinhalt der Kurven I). Die Kurven II) veranschaulichen die Signalcharakteristik nach der gleitenden Tonhöhenänderung.

als entscheidend<sup>17</sup>. Die qualitative Untersuchung basiert schließlich auf 14 Geräuschen, bei denen zumindest ein genannter Signalanteil verändert wurde [166]. Exemplarisch beschreibt Abbildung A.3 im Anhang vier Varianten eines Geräusches. Aufgeteilt in zwei Gruppen A und B mit jeweils acht Stimuli<sup>18</sup> erfolgt die subjektive Klassifizierung der Geräuschqualität nach der Methode des Paarvergleichs. Die Qualität dieser Daten wird mittels absoluter Bewertung der Geräusche anhand einer siebenstufigen Likertskala hinterfragt. Analog zu den vorangegangenen Experimenten schließen lineare Regressionsanalysen mit physikalischen und psychoakustischen Parametern sowie eine kreuzweise Validierung der Ergebnisse an.

Für die Analyse der Geräusche müssen künstlich entstandene Signaltransienten berücksichtigt werden, da sie zu Knack- oder Klicklauten im Geräusch führen können. Um diese ungewollten Impulse zu vermeiden, sollte der Grenzwert eines Auswahlbereichs im Nulldurchgang des Kurvenverlaufs liegen [166]. Ein weiterer Effekt tritt durch die Methode der Tonhöhenänderung (engl. *pitch shifting*) [50], [83] auf und hängt von der Abspielgeschwindigkeit des Signals ab. Dieser Sachverhalt basiert auf der physikalischen Beziehung zwischen Frequenz und Tonhöhe, wobei tiefen Tönen niedrige und hellen Tönen hohe Frequenzen zugeordnet sind. Wird die Abspielgeschwindigkeit variiert, verändert sich die Frequenzcharakteristik des Geräusches entsprechend. So führt eine verlangsamte Wiedergabe zu einer nachvollziehbar als tiefer empfundenen Tonhöhe. Hierfür stellt Abbildung 3.9 schematisch die Hüllkurve der Hilberttransformation eines originalen Geräusches b) verglichen mit einer schneller a) und einer langsamer c) abgespielten Variante dar. Die darunter abgebildeten Kurven I) zeigen die zugehörigen Frequenzänderungen bezogen auf einen identischen Zeitbereich. Sie wirken sich schließlich auf die wahrgenommene Tonhöhe aus. Weiterhin veranschaulichen die Kurven II) schematisch die angepassten Signaleigenschaften, nachdem die gleitende Tonhöhenänderung ordnungsgemäß umgesetzt wurde.

<sup>17</sup>Da Verriegelungsgeräusche aufgrund ihrer Signalcharakteristik kein ausgeprägtes Plateau (*Sustain time*) aufweisen, liegt die reduzierte Sonderform des ADR- Hüllkurvenmodells vor.

<sup>18</sup>Zwei der Geräusche sind in beiden Gruppen identisch.

## Ergebnis

Analog zur methodischen Vorgehensweise bei den Geräuschen der Serienfahrzeuge werden die insgesamt 14 Stimuli sowohl absolut als auch relativ zueinander bewertet. Von den 42 teilnehmenden Personen zeigten insgesamt sechs ein inkonsistentes Antwortverhalten, weshalb die entsprechenden Datensätze ausgeschlossen wurden ( $\chi^2$ -Test und Pearson-Korrelationskoeffizient).

Das detaillierte Ergebnis der kategorialen Bewertung ist in Abbildung A.4 im Anhang dargestellt. Hierbei muss Geräusch  $V_{S10}$  nach einer statistischen Prüfung als nicht normalverteilt betrachtet werden. Die Daten beider Methoden, absolut und relativ, korrelieren mit Werten von  $r = 0,97$  für Gruppe A<sup>19</sup> und  $r = 0,96$  für Gruppe B, woraus sich auf ein übereinstimmendes und belastbares Urteilsverhalten der Probanden schließen lässt (siehe Anhang, Abbildung A.5). Weiterhin zeigt sich, dass die Geräuschqualität von Verriegelungsgeräuschen sowohl absolut als auch relativ identisch bewertet wird. Somit kann sich der Kunde im Verkaufsraum ein absolutes Qualitätsurteil ohne direkte Referenz von Wettbewerbsfahrzeugen bilden.

### Physikalischer Ansatz

Um die Geräuschqualität der Signale von Gruppe A mittels physikalischer Parameter vorhersagen zu können, wurde das folgende dreiparametrische Modell entwickelt.

$$AW_{phy\ synth} = 0,28 + 0,09 \cdot L_{tfT} - 0,32 \cdot L_{hfT} - 0,07 \cdot L_m \quad (3.7)$$

Die lineare Regression führt zu einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,97$  und zu einem empirischen Wert von  $F_{emp} = 17,6$  gemäß der F-Statistik, dargestellt in Abbildung 3.10 (links). Im Modell entfällt dabei die höchste Gewichtung von  $-0,32$  auf den Mittelwert hochfrequenter Terzbänder  $L_{hfT}$ , auf den Parameter  $L_m$  entfällt ein Wert von  $-0,07$ . Er greift die synthetische Variation der Anstiegsflanke auf und verdeutlicht deren Einfluss auf die empfundene Wertigkeit eines Geräusches. Eine flachere Kurve wird als hochwertiger wahrgenommen.

Die objektive Prognose der intervallskalierten Rangfolge von Gruppe B unter Verwendung der Gleichung 3.7 ermöglicht einen Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,91$ . Eine grafische Darstellung befindet sich im Anhang in Abbildung A.6 (links). Die Daten der Verriegelungsgeräusche der Serienfahrzeuge (Gruppe A) werden mit einem Korrelationswert von  $r = 0,93$  vorhergesagt. Werden die subjektiven Daten der Gruppe A synthetisierter Geräusche nach Gleichung (3.3) prognostiziert, resultiert ein Korrelationskoeffizient von  $r = 0,91$ .

### Psychoakustischer Ansatz

Hierfür wurde das folgende Modell abgeleitet.

$$AW_{psy\ synth} = 0,27 - 0,23 \cdot N_5 - 0,14 \cdot T_S - 0,21 \cdot N_m \quad (3.8)$$

Die Perzentillautheit  $N_5$  und die mittlere Steigung der Lautheit  $N_m$  mit einer Gewichtung von  $-0,23$  und  $-0,21$  beschreiben hierbei die aussagekräftigsten Parameter.

<sup>19</sup>Die Verriegelungsgeräusche von Gruppe A werden als Fast-Fourier-Transformation im Anhang in den Abbildungen A.27 - A.30 dargestellt.

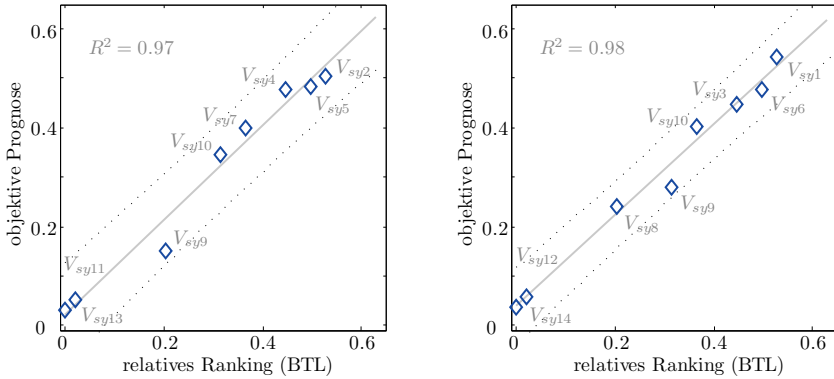


Abbildung 3.10: Regressionsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs mithilfe der objektiven Parameterwerte. Synthetisch veränderte Verriegelungsgeräusche, Gruppe A. Links: physikalische Parameter. Rechts: psychoakustische Parameter

Die Kombination dieser Parameter mit der Dauer der Schärfe  $T_S$  führt zu sehr hohen Regressionskoeffizienten von  $R^2 = 0,98$  und  $R^2_{adj} = 0,97$ . Dabei erreicht  $N_m$  als Äquivalent zum physikalischen Parameter  $L_m$  eine deutlich stärkere, ebenfalls negative Gewichtung. Somit kommt der Flankensteigung (*Attack time*) des Signals ein noch größerer Einfluss auf die Wertigkeit der Geräusche zu. Weiterhin führt das dreiparametrische Modell mit vier Freiheitsgraden zu einem statistisch kritischen t-Wert von  $t_c = 2,78$ . Er wird für jeden Parameterwert  $|t_{N_s} = -6,96|$ ,  $|t_{N_m} = -4,26|$  und  $|t_{T_S} = -9,81|$  überschritten. Folglich gilt der in Gleichung (3.8) hypothetisch postulierte und in Abbildung 3.10 (rechts) dargestellte Zusammenhang als signifikant.

Wird die wahrgenommene Geräuschqualität von Gruppe B anhand der psychoakustischen Parameter gemäß Gleichung (3.8) vorhergesagt, ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von  $r = 0,96$  (siehe Anhang, Abbildung A.6 (rechts)). Eine Prognose der qualitativen Bewertung der Verriegelungsgeräusche von Serienfahrzeugen (Gruppe A) führt zu einem ähnlich hohen Wert von  $r = 0,91$ . Der entsprechende Vergleich der psychoakustischen Berechnung nach Gleichung (3.4) mit den subjektiven Daten der Gruppe A synthetisierter Geräusche korreliert mit einem Wert von  $r = 0,92$ .

### Zusammenfassende Bewertung

Die subjektive Bewertung der Geräuschqualität von Verriegelungsgeräuschen zeigt eine deutliche Korrelation zwischen den Daten, die mit den Methoden der absoluten und relativen Klassifizierung erfasst wurden. Diese Übereinstimmung indiziert ein konsistentes Antwortverhalten der Probanden sowie eine hohe Aussagekraft der intervallskalierten Ergebnisse. Ausgehend davon lassen sich schließlich objektive Parameter zu kombinier-

Tabelle 3.4: Korrelationskoeffizienten der objektiven Modelle zur wahrgenommenen Geräuschqualität von Verriegelungsgeräuschen. Dargestellt sind die Korrelationskoeffizienten des übergreifenden, physikalischen und psychoakustischen Modells.

Ansatz	Signaltypen von Verriegelungsgeräuschen				
	<i>Serie, Gr. A</i>	<i>Serie, Gr. B</i>	<i>tech. var.</i>	<i>synth., Gr. A</i>	<i>synth., Gr. B</i>
physikalisch	0,96	0,91	0,91	0,86	0,83
psychoakustisch	0,95	0,96	0,92	0,90	0,87

ten Metriken zusammenfassen, die die wahrgenommene Geräuschqualität reliabel und valide abbilden können. Bezogen auf die einzelnen Studien ergeben sich sowohl für die physikalischen als auch für die psychoakustischen Parameter hochsignifikante Modelle. Für beide Ansätze wurde eine übergreifende Modellierung durchgeführt. Dabei wurde die Gewichtung der jeweiligen Parameter so optimiert, dass das finale Modell die subjektive Geräuschqualität aller untersuchten Verriegelungsgeräusche bestmöglich beschreiben kann. Für die physikalischen Parameter kristallisierte sich das folgende Modell als ein signifikantes und aussagekräftiges Modell heraus.

$$AW_{phy} = 0,29 + 0,11 \cdot L_{tfT} - 0,33 \cdot L_{hfT} + 0,10 \cdot t_{min} \quad (3.9)$$

Dabei gehen die negativ assoziierten, hochfrequenten Lautstärkewerte  $L_{hfT}$  mit einem Wert von  $-0,33$  in die Modellierung ein, wobei die tieffrequenten Anteile  $L_{tfT}$  und die Dauer des Signals  $t_{min}$  um etwa  $\frac{2}{3}$  geringer gewichtet werden. Somit rufen Geräusche mit ausgeprägten, tieffrequenten Eigenschaften und längerer Dauer ein wertigeres Gefühl hervor. Die entsprechenden Korrelationskoeffizienten sind in Tabelle 3.4 zusammenge stellt.

Für die psychoakustische Abbildung der auditiven Qualitätswahrnehmung ergab sich das folgende Modell.

$$AW_{psy} = 0,28 - 0,22 \cdot N_5 - 0,09 \cdot T_S - 0,12 \cdot N_m^* \quad (3.10)$$

Die Perzentillautheit  $N_5$  mit einem Koeffizienten von  $-0,22$  beeinflusst die akustische Wahrnehmung maßgeblich. Weiterhin stellen die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Parameter  $T_S$  mit  $-0,09$  und  $N_m^*$  mit  $-0,12$  entscheidende Faktoren dar, um die Geräuschqualität von Verriegelungsgeräuschen derartig übereinstimmend prognostizieren zu können. Vor allem der maximale Anstieg der Lautheit  $N_m^*$  kristallisiert sich als ausschlaggebender Parameter heraus. Im Gegensatz zur Lautstärke berücksichtigt die Berechnung der Lautheit die Sensorik des menschlichen Gehörs [33], [41], [210]. Dieser Einfluss spiegelt sich auch im Anstiegsverhalten zum Maximum der Lautheit wider und trägt mit zur hohen Korrelation von  $N_m^*$  bei. Somit führen die psychoakustischen Parameter gemäß Tabelle 3.4 im Vergleich zum physikalischen Modell zu einer signifi- kanteren und besseren Vorhersage der Geräuschqualität von Verriegelungsgeräuschen.

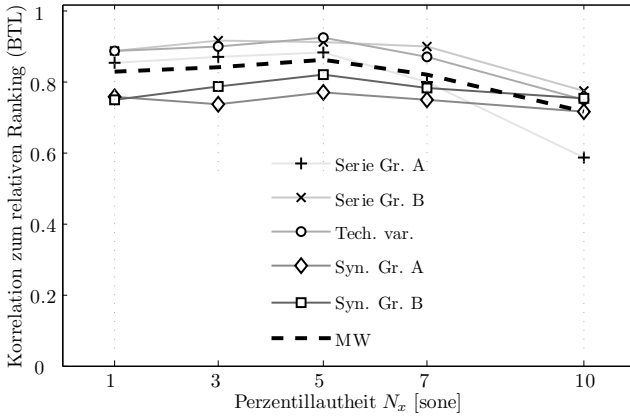


Abbildung 3.11: Korrelationswerte der Lautheit zum relativen Ranking der Geräuschqualität. Jedes Symbol beschreibt den Betrag der Gesamtkorrelation der Lautheit zur wahrgenommenen Geräuschqualität, abhängig vom entsprechenden Perzentil der Lautheit. Die Daten der Verriegelungsgeräusche von Serienfahrzeugen +, x sowie der technisch o und synthetisch □, ◇ veränderten Verriegelungsgeräusche sind dargestellt.

Im Rahmen der durchgeführten Objektivierung traten die Lautheit und die Dauer der Schärfe im psychoakustischen Modell auf. Da die Signifikanz und die Vorhersagekraft beider Parameter auf den entsprechenden Grenzwerten  $N_5$  und  $S = 1 \text{ acum}$  basiert, werden weitere Abstufungen dieser Parameter genauer betrachtet. In Abbildung 3.11 ist das Korrelationsverhalten der Lautheit gegenüber der Geräuschqualität für die durchgeführten Studien dargestellt. Jedes Symbol zeigt die Gesamtkorrelation zwischen der wahrgenommenen Qualität und der Lautheit als Funktion verschiedener Perzentile der Lautheit. Im Allgemeinen steigen die Korrelationswerte von der Perzentillautheit  $N_1$  bis  $N_5$  leicht an. Für die synthetisch veränderten Geräusche der Gruppe A korreliert der Wert bei  $N_3$  allerdings geringfügig schlechter mit der Geräuschqualität als für  $N_1$ . Beim Vergleich aller Perzentile weist die Lautheit  $N_5$  die jeweils höchsten Korrelationskoeffizienten auf. Mit zunehmendem Perzentil ( $N_7$ ,  $N_{10}$ ) nehmen die Werte ab, wobei die Koeffizienten für die Geräusche der Serie und der technischen Variation deutlich stärker abfallen als die der synthetisch veränderten Signale (□, ◇). Verglichen mit den anderen Geräuschen zeigt dieser Signaltyp auch übergreifend ein geringeres Korrelationsverhalten. Hier lag der Fokus der synthetischen Veränderungen primär auf der Variation bereits bekannter, für die Wahrnehmung der Geräuschqualität signifikanter Signalanteile, weshalb sich die sonst maßgebliche Bedeutung der Lautheit leicht abzuschwächen scheint.

Für die Schärfe im Bereich von  $0,5 \text{ acum}$  und  $1,5 \text{ acum}$  veranschaulicht Abbildung 3.12 die Korrelation der Dauer der Schärfe zum relativen Ranking der Geräuschqualität,



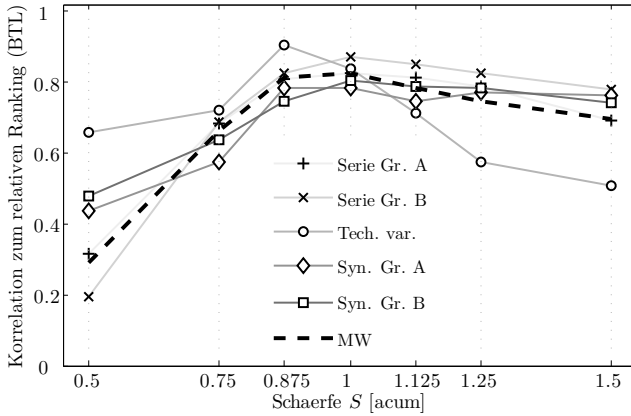


Abbildung 3.12: Korrelationswerte der Dauer der Schärfe zum relativen Ranking der Geräuschqualität. Jedes Symbol beschreibt den Betrag der Gesamtkorrelation der Dauer der Schärfe zur wahrgenommenen Geräuschqualität, abhängig vom entsprechenden Grenzwert der Schärfe. Die Daten der Verriegelungsgeräusche von Serienfahrzeugen +, x sowie der technisch o und synthetisch □, ◇ veränderten Verriegelungsgeräusche sind dargestellt.

ermittelt aus den Experimenten des Paarvergleichs. Dabei zeigt jedes Symbol die Gesamtkorrelation zwischen der wahrgenommenen Qualität und der Dauer der Schärfe für verschiedene Werte der Schärfe. Grundsätzlich nimmt die Korrelation des Parameters  $T_S$  von 0,5 acum bis 1 acum degressiv zu und fällt anschließend bis zum Grenzwert der Schärfe von 1,5 acum gemäßig linear ab. Eine davon abweichende Kurve zeigt das Experiment zur technischen Variation der Geräusche (o). Hier korrelieren die Daten bei einem Schärfewert von 0,875 acum maximal, wobei die Korrelationskoeffizienten vorher und nachher einen steileren Gradienten im Vergleich zu den übrigen Signalen aufweisen. Der Mittelwert (MW) aller Experimente zeigt eine deutliche Tendenz hin zum kritischen Grenzwert von 1 acum, vor allem bei niedrigeren Schärfewerten.

### 3.4 Übertragbarkeit der Modellparameter

Das Ziel des folgenden Abschnitts ist es, die Übertragbarkeit der in Kapitel 3.3 als signifikant beschriebenen Parameter zu untersuchen. Dabei wird der Frage nachgegangen, ob und inwieweit sich die Qualität von singular impulshaften Fahrzeuggeräuschen durch generalisierte Modelle beschreiben lässt. In einem ersten Schritt werden Türzuschlaggeräusche subjektiv anhand der bereits verwendeten Methoden bewertet. Ausgehend von den in Kapitel 3.2 identifizierten Parametern folgt die Ableitung objektiver Modelle, getrennt nach physikalischen und psychoakustischen Parametern. Damit kann eine Be-

ziehung zu den in Kapitel 3.3 beschriebenen Modellen hergestellt und über eine mögliche, generalisierte Abbildung der Geräuschqualität von impulshaften Fahrzeuggeräuschen diskutiert werden. Unabhängig davon finden detaillierte Analysen des Parameters Dauer der Schärfe  $T_S$  statt, um dessen Mehrwert für die psychoakustische Forschung zu verdeutlichen. Methodisch liegen hierfür Signale zugrunde, die durch technische Maßnahmen am Fahrzeug sowie durch synthetische Variationen des Frequenzinhaltes verändert wurden.

### 3.4.1 Türzuschlaggeräusche von Serienfahrzeugen

Die akustische Qualität des Türzuschlags stellt ein entscheidendes Kriterium dar, um den Kunden beim ersten Kontakt mit dem Fahrzeug zu überzeugen. Im ruhigen Verkaufsraum fehlen die maskierenden Effekte eines laufenden Motors sowie die Ablenkung, die während der Fahrt entsteht. Zudem folgt das Geräusch des Türzuschlags auf eine aktive Handlung des Nutzers und transportiert sowohl qualitative als auch funktionale Informationen.

#### Stimuli und Methode

Nach der Methode des paarweisen Vergleichs wurde die Geräuschqualität von insgesamt 24 Türzuschlaggeräuschen von Serienfahrzeugen subjektiv bewertet. Hierfür fanden drei eigenständige Experimente statt (Gruppe A, B, C), wobei jeweils 8 der 24 Stimuli zu einer Gruppe gehörten. Mit Hilfe der intervallskalierten Daten der Gruppe A wurden objektive Modelle für die physikalischen und die psychoakustischen Parameter bestimmt. Weiterhin wurde anhand der Ergebnisse von Gruppe B und C untersucht, wie signifikant die Parametermodelle die Qualität der Signale beschreiben können. Zusätzlich fand eine absolute Bewertung von 13 weiteren Geräuschen des Türzuschlags auf einer neunstufigen Likertskala<sup>20</sup> statt. Damit wurde die Vorhersagekraft der objektiven Modelle unabhängig von der Methode des Hörversuchs untersucht.

#### Ergebnis

Bei den Experimenten des Paarvergleichs wurden die Datensätze von drei Personen für Gruppe A und C und von fünf Personen für Gruppe B ausgeschlossen. Für diese Teilnehmer deutete der  $\chi^2$ -Test auf ein inkonsistentes Antwortverhalten hin. Weiterhin zeigt eine statistische Analyse der kategorialen Bewertung bei vier Probanden eine zu geringe Korrelation beim Vergleich der Test- und Retest-Urteile.

#### Physikalischer Ansatz

Für die intervallskalierte Rangfolge der Geräusche (Gruppe A<sup>21</sup>) liefert die lineare Regressionsanalyse das aus drei Parametern gebildete physikalische Modell.

$$AW_{phy} = 0,22 - 0,48 \cdot L_{tfT} + 0,31 \cdot L_{hfT} - 0,05 \cdot t_{min} \quad (3.11)$$

Neben den frequenzabhängigen Mittelwerten der Lautstärke  $L_{tfT}$  und  $L_{hfT}$  führt die Signaldauer oberhalb eines Pegels von 45 dB  $t_{lim}$  zu  $R^2 = 0,92$  und  $R^2_{adj} = 0,90$  für

<sup>20</sup>Eine neunstufige Skala wurde gewählt, da die Probanden im Anschluss an die vorab durchgeführten Hörversuche des Paarvergleichs um die Möglichkeit einer detaillierteren Abstufung gebeten haben.

<sup>21</sup>Die Türzuschlaggeräusche von Gruppe A werden als Fast-Fourier-Transformation im Anhang in den Abbildungen A.31 - A.34 dargestellt.

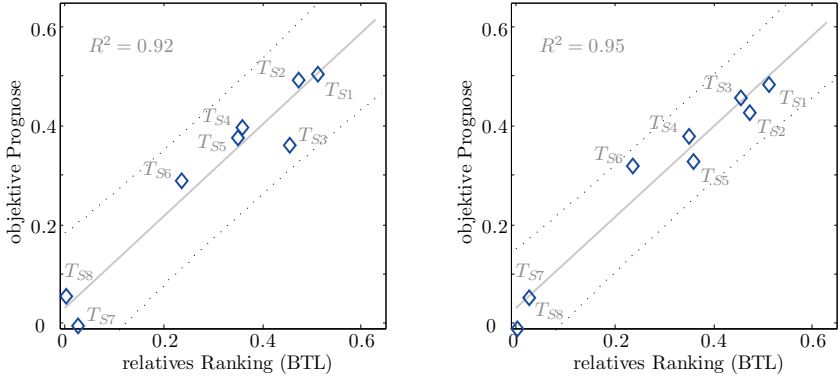


Abbildung 3.13: Regressionsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs mithilfe der objektiven Parameterwerte. Türzuschlaggeräusche, Gruppe A. Links: physikalische Parameter. Rechts: psychoakustische Parameter

das Regressions- und korrigierte Bestimmtheitsmaß. Nach Gleichung (3.11) weisen die tieffrequenten Lautstärkeanteile  $L_{tfT}$  mit  $-0,48$  die größte Gewichtung auf. Mit einem Wert von  $0,31$  kommt der Lautstärke hochfrequenter Bereiche  $L_{hfT}$  eine ebenfalls hohe Gewichtung zu. Bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von  $\alpha = 0,05$  beschreiben die t- und F-Statistik den hypothetisch postulierten Zusammenhang als signifikant. Dieser ist in Abbildung 3.13 (links) dargestellt. Mit Hilfe der klassifizierten Geräusche der Gruppen B und C wurde eine unabhängige Validierung des ermittelten Modells durchgeführt. Dabei korrelieren die Werte der jeweils subjektiv und objektiv mittels Gleichung (3.11) beschriebenen Geräuschqualität zu  $r = 0,92$  für die Gruppe B und zu  $r = 0,86$  für die Gruppe C. Eine grafische Darstellung zeigt Abbildung 3.11 im Anhang.

#### Psychoakustischer Ansatz

Hierfür wurde mittels linearer Regression das folgende zweiparametrische Modell mit den Parametern  $N_5$  und  $T_S$  gewählt.

$$AW_{psy} = 0,28 - 0,09 \cdot N_5 - 0,23 \cdot T_S \quad (3.12)$$

Für Gruppe A ergibt sich ein Regressionskoeffizient von  $R^2 = 0,95$ . Als ausschlaggebender Parameter der objektiven Prognose gilt die Dauer der Schärfe  $T_S$  mit einem Koeffizienten von  $-0,23$ . Im Vergleich dazu wird die Perzentillautheit  $N_5$  gemäß Gleichung (3.12) mit  $-0,09$  gewichtet. Übergreifend führt die statistische Prüfung der beiden Parameter zu t-Werten von  $|t_{N_5}| = 3,27$  und  $|t_{T_S}| = 4,83$ . Sie überschreiten den kritischen Wert von  $t_c = 2,57$  und lassen damit auf ein signifikantes und reliables Modell schließen. Abbildung 3.13 (rechts) stellt den Zusammenhang grafisch dar.

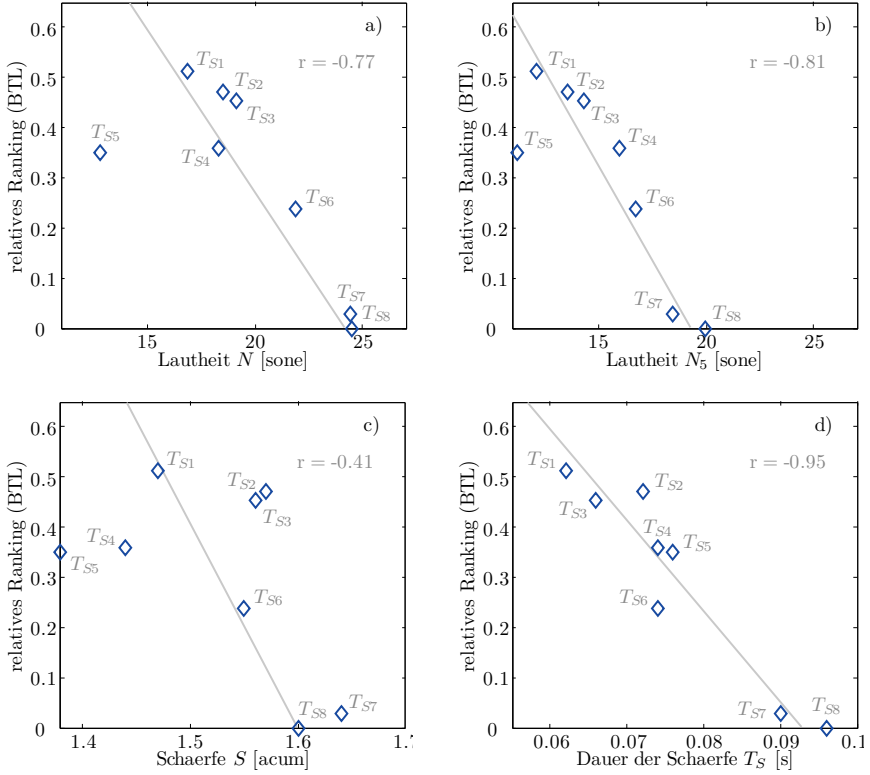


Abbildung 3.14: Korrelationsanalyse der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen:  
a) Lautheit  $N$ , b) Perzentillautheit  $N_5$ , c) Schärfe  $S$ , d) Dauer der Schärfe  $T_S$

Wird die intervallskalierte Rangfolge der in Gruppe B und C subjektiv bewerteten Geräusche mit den nach Gleichung (3.12) berechneten Daten gegenübergestellt, ergeben sich Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,98$  und  $r = 0,94$  (siehe Anhang, Abbildung A.8). Durch diese hohen Werte gilt das psychoakustische Modell als äußerst valide und reliabel. Verglichen mit dem physikalischen Ansatz ermöglicht es eine noch bessere und belastbarere Abbildung der empfundenen Qualität.

Wie bereits in Kapitel 3.3 gezeigt wurde, beschreibt eine Kombination der Perzentillautheit und der Dauer der Schärfe ein großes Potential zur objektiven Beschreibung impulshafter Fahrzeuggeräusche. Hierfür veranschaulicht Abbildung 3.14 die Korrelation der psychoakustischen Parameter  $N$ ,  $N_5$ ,  $S$  und  $T_S$  zur bewerteten Geräuschqualität

der Signale von Gruppe A. Die Lautheit  $N$  und die Perzentillautheit  $N_5$  erreichen mit  $r_N = -0,77$  und  $r_{N_5} = -0,81$  hohe Korrelationskoeffizienten. Weiterhin weist  $T_S$  den im Vergleich höchsten Wert mit  $r_{T_S} = -0,95$  auf. Die Ergebnisse zeigen, dass die Qualität von Türzuschlaggeräuschen durch die Dauer der Schärfe besser beschrieben werden kann als für Verriegelungsgeräusche.

#### *Zusammenfassende Bewertung*

Auch für die Modellierung von Türzuschlaggeräuschen erweisen sich die bereits beim Verriegelungsgeräusch diskutierten Parameter als signifikant. Leitet man für das Türzuschlaggeräusch anhand der Daten aller Gruppen A, B und C ein physikalisches Modell ab, welches die subjektiv ermittelten Werte übergreifend am besten vorhersagen kann, so folgt

$$AW_{phy} = 0,26 - 0,42 \cdot L_{tfT} + 0,29 \cdot L_{hfT} - 0,06 \cdot t_{min} \quad (3.13)$$

Die höchste Bedeutung geht auf die tieffrequenten Lautstärkewerte  $L_{tfT}$  mit einem Koeffizienten von  $-0,42$  zurück. Mit ihnen werden die Signalanteile eines als hohl und minderwertig assoziierten Klanges beschrieben. Demgegenüber veranschaulicht der Wert von  $0,29$  für  $L_{hfT}$  eine positive Wahrnehmung im höherfrequenten Bereich. Zudem gilt ein Geräusch kürzerer Dauer als wertiger. Eine Korrelationsanalyse zwischen der subjektiven Geräuschqualität der Gruppen A, B und C und des übergreifenden Modells nach Gleichung (3.13) führt zu Koeffizienten von  $r = 0,95$ ,  $r = 0,93$  und  $r = 0,88$  (siehe Anhang, Abbildungen A.9, A.10, A.11). Tabelle 3.5 fasst die Ergebnisse zusammen.

Analog dazu fußt der psychoakustische Ansatz, der die Werte aller Gruppen A, B und C möglichst optimal abbildet, auf den Parametern der Lautheit  $N_5$  und der Dauer der Schärfe  $T_S$ .

$$AW_{psy} = 0,28 - 0,11 \cdot N_5 - 0,21 \cdot T_S \quad (3.14)$$

Die Dauer der Schärfe gilt mit einer Gewichtung von  $-0,21$  im Vergleich zur Lautheit mit  $0,11$  als maßgeblich für die Beschreibung der Geräuschqualität. Dieser Ansatz bildet die charakteristischen, akustischen Phänomene der Türzuschlaggeräusche wie tonales Nachklingen oder höherfrequentes Schwirren im Zeitbereich ab. Da diese Merkmale einen unzureichenden Qualitätseindruck hervorrufen, ergibt sich eine negative Gewichtung. Für die Gruppen A, B und C korrelieren die Ergebnisse der objektiven Prognose zu  $r = 0,96$ ,  $r = 0,98$  und  $r = 0,95$  mit der wahrgenommenen Geräuschqualität, dargestellt in Tabelle 3.5 (siehe Anhang, Abbildungen A.9, A.10, A.11).

Die Koeffizienten der hörakustischen Untersuchungen sind höher als die für die physikalischen Modelle. Dieser Aspekt wird abschließend durch die Daten der kategorialen Bewertung von 13 unabhängigen Geräuschen bestätigt. Eine Vorhersage der Geräuschqualität korreliert mit dem physikalischen Ansatz nach Gleichung (3.13) zu  $r = 0,79$ . Im Vergleich dazu erreicht das psychoakustische Modell gemäß Gleichung (3.14) einen höheren Wert von  $r = 0,96$ . Die Daten der Korrelationsanalyse sind in Abbildung A.12 im Anhang dargestellt. Weiterhin wird die absolute Bewertung der Geräusche im Anhang in Abbildung A.13 veranschaulicht. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Geräuschqualität impulshafter Fahrzeuggeräusche durch psychoakustische Parameter besser beschrieben werden kann als durch physikalische Parameter.

Tabelle 3.5: Korrelationskoeffizienten der objektiven Modelle zur wahrgenommenen Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen. Dargestellt sind die Korrelationskoeffizienten des übergreifenden, physikalischen und psychoakustischen Modelles.

Ansatz	Signaltypen von Türzuschlaggeräuschen		
	Gruppe A	Gruppe B	Gruppe C
physikalisch	0,95	0,93	0,88
psychoakustisch	0,96	0,98	0,95

Im Vergleich zu den Verriegelungsgeräuschen nach Kapitel 3.3.1 weisen die psychoakustischen Modelle der Türzuschlaggeräusche lediglich die beiden Parameter  $N_5$  und  $T_S$  auf. Die Auswahl der hier zugrunde liegenden Grenzwerte wird im Folgenden näher untersucht. Das Korrelationsverhalten der Lautheit gegenüber dem relativen Ranking der Geräuschqualität ist in Abbildung 3.15 abhängig vom gewählten Lautheitsperzentil dargestellt. Grundsätzlich nehmen die Korrelationswerte der Perzentillautheit von  $N_1$  bis  $N_5$  zu und fallen anschließend bis  $N_{10}$  wieder ab. Der Parameter  $N_5$  markiert analog zu den Verriegelungsgeräuschen (siehe Abbildung 3.11) den höchsten Wert der Korrelation. Interessant ist der starke Abfall der Koeffizienten von Gruppe A (○) für die Perzentillautheiten  $N_7$  und  $N_{10}$ . Eine mögliche Erklärung dieses Effektes liegt in der Zusammensetzung der acht Signale. Für das Experiment wurde jeweils ein als gut und ein als schlecht befundenes Geräusch von insgesamt vier Fahrzeugen ausgewählt. Da somit ähnliche Charakteristika von zumindest zwei Signalen vorliegen, kann dies zu einem derartigen Kurvenverlauf führen.

Weiterhin beschreibt Abbildung 3.16 die Korrelation der Dauer der Schärfe zum relativen Ranking der Geräuschqualität in Abhängigkeit von der Schärfe. Im Allgemeinen steigt die Korrelation der Ergebnisse bis zu einem Wert von 1 *acum* an, wobei sich die Ausprägungen der Kurven unterscheiden. Während für Gruppe A (○) von 0,5 *acum* bis 1 *acum* ein progressiver Verlauf vorliegt, zeigen die Daten von Gruppe B (◇) einen eher linearen Verlauf. Hier weisen die Korrelationskoeffizienten für alle Grenzwerte der Schärfe von 0,5 *acum* bis 1 *acum* die höchsten Werte auf. Deutlich zu erkennen ist der starke, negative Gradient aller Kurven für die Korrelationsanalysen von 1,125 *acum* bis 1,25 *acum*. Die berechneten Werte für 1,5 *acum* liegen auf einem ähnlichen Niveau wie bei 1,25 *acum*, wobei bei Gruppe C (□) ein leichter Anstieg folgt. Verglichen mit den Korrelationskoeffizienten der Verriegelungsgeräusche nach Abbildung 3.12 kann der Grenzwert der Schärfe von 1 *acum* als bester Wert der Vorhersage bestätigt werden. Bei der Analyse der generellen Kurvenverläufe weisen die Türzuschlaggeräusche zuerst einen eher flacheren Anstieg der Korrelationswerte bis zur Schärfe von 1 *acum* auf und fallen dann stark ab. Demgegenüber zeigen die Kurven der Verriegelungsgeräusche eine in etwa umgekehrte Struktur.

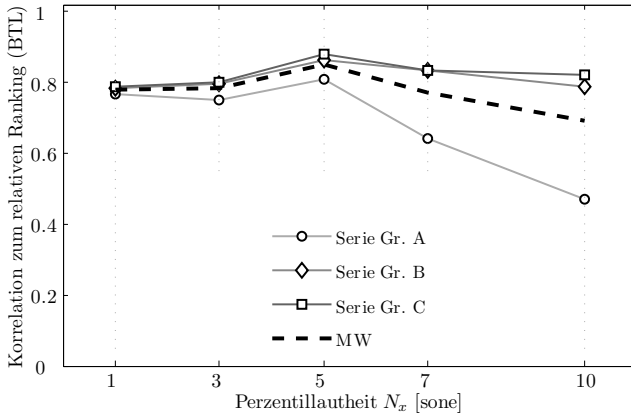


Abbildung 3.15: Korrelationswerte der Lautheit zum relativen Ranking der Geräuschqualität. Jedes Symbol beschreibt den Betrag der Gesamtkorrelation der Lautheit zur wahrgenommenen Geräuschqualität, abhängig vom entsprechenden Perzentil der Lautheit. Die Daten der Türzuschlaggeräusche der drei Gruppen ( $\circ$ ,  $\square$ ,  $\diamond$ ) sind dargestellt.

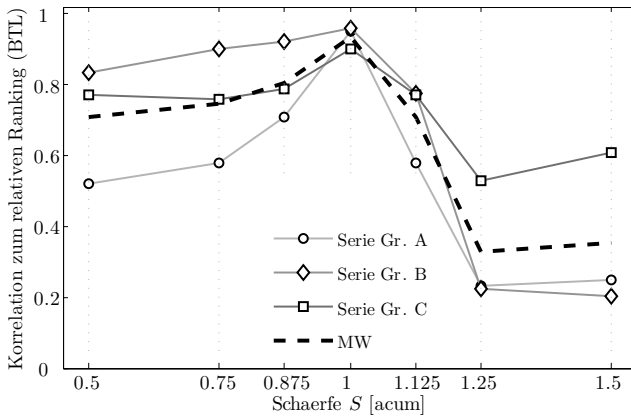


Abbildung 3.16: Korrelationswerte der Dauer der Schärfe zum relativen Ranking der Geräuschqualität. Jedes Symbol beschreibt den Betrag der Gesamtkorrelation der Dauer der Schärfe zur wahrgenommenen Geräuschqualität, abhängig vom entsprechenden Grenzwert der Schärfe. Die Daten der Türzuschlaggeräusche der drei Gruppen ( $\circ$ ,  $\square$ ,  $\diamond$ ) sind dargestellt.

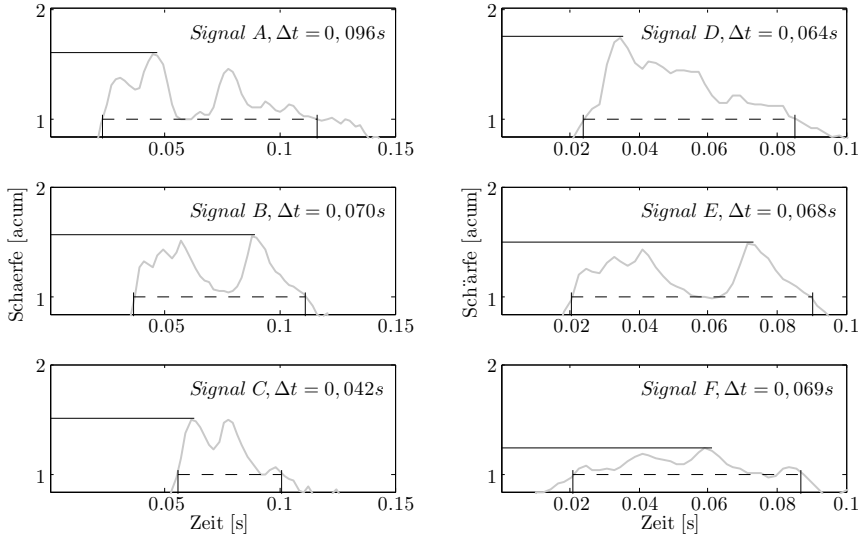


Abbildung 3.17: Schärfe als Funktion der Zeit samt Dauer der Schärfe für Türzuschlaggeräusche. Links: Ähnliches Maximum der Schärfe  $S$  aber unterschiedliche Dauer der Schärfe  $T_S$ . Die Geräuschqualität der drei Fahrzeuge nimmt von A nach C zu. Rechts: Unterschiedliches Maximum der Schärfe  $S$  aber ähnliche Dauer der Schärfe  $T_S$ . Die Geräuschqualität für die drei Fahrzeuge D bis F ist in etwa gleich hoch.

#### 3.4.2 Evaluierung des Parameters $T_S$

Für das Design eines qualitativ überzeugenden Geräusches verlangt ein ganzheitlicher Ansatz die Kenntnis der Wirkung von charakteristischen Signalanteilen auf die Geräuschqualität. In diesem Zusammenhang trägt ein objektiver Maßstab dazu bei, die Erwartungshaltung an ein wertiges Geräusch referenzierbar und unabhängig von individuellen Aspekten zu beschreiben. Gleichzeitig kann damit der quantitative Einfluss von technischen Maßnahmen erfasst und deren qualitativer Effekt auf die menschliche Wahrnehmung beurteilt werden.

Aus den psychoakustischen Modellen der bereits durchgeführten Studien kristallisiert sich die Dauer der Schärfe  $T_S$  als objektiver Parameter heraus. Sie korreliert vor allem für das Türzuschlaggeräusch signifikant mit dem auditiven Qualitätsempfinden (siehe Abbildung 3.16). Diesen großen Einfluss veranschaulicht Abbildung 3.17 exemplarisch anhand der inhärenten Signalcharakteristika. In der linken Hälfte sind drei Türzuschlaggeräusche A-C mit einem steigenden Wertigkeitsurteil dargestellt ( $A = 0,04$ ,  $B = 0,37$ ,  $C = 0,51$ ). Diese Bewertung geht mit einer verkürzten Dauer der Schärfe



einher, wohingegen das Maximum der Schärfe nur marginal variiert. Parallel dazu zeigt die rechte Spalte drei weitere Signale  $D-F$  mit differierenden Werten für das Schärfemaximum. Im Gegensatz dazu weisen die intervallskalierten Daten eine nahezu identische Geräuschqualität mit  $D = 0,30$ ,  $E = 0,28$  und  $F = 0,29$  auf. Dieses Resultat stimmt mit der berechneten Dauer der Schärfe überein.

Um das Potential dieses Parameters besser einschätzen und dessen deskriptive Eigenschaften veranschaulichen zu können, wurden weitere Studien durchgeführt. Sie basieren auf technisch und synthetisch veränderten Türzuschlaggeräuschen von Fahrzeugen. Im ersten Experiment wurden technische Maßnahmen verbaut, die zu einem subjektiv hochwertigeren Eindruck führen sollten<sup>22</sup>. Der hypothetische Ansatz nimmt an, dass mit diesen technischen Veränderungen eine entsprechend kürzere Dauer der Schärfe einhergeht. In einem zweiten Schritt wurden Untersuchungen angeschlossen, die auf einer synthetischen Variation der psychoakustischen Schärfe basieren. Sie sollten zeigen, ob explizite Änderungen der Dauer der Schärfe zu vergleichbaren Änderungen bei der Bewertung der Geräuschqualität führen.

### Stimuli und Methode

Der Fokus der integrierten technischen Maßnahmen lag auf der Reduktion hochfrequenter Signalanteile. Das Ziel dabei war es, Effekte wie tonales Nachklingen oder hochfrequentes Schwirren zu vermeiden. Die Untersuchung basierte auf sechs Fahrzeugen unterschiedlicher Klassen. Zuerst wurden die Türzuschlaggeräusche im unveränderten Zustand der Fahrzeuge aufgenommen. Danach führten Maßnahmen wie eine akustische Dämmung, eine geänderte Dichtung oder die Kapselung des Schließmoduls zu einem höherwertigeren Geräusch. Nach deren Aufnahme wurden die 12 Stimuli<sup>23</sup> anhand der Methode des paarweisen Vergleichs bewertet.

Für die synthetische Variation wurden acht originale Fahrzeuggeräusche mit einem Tiefpass (obere Grenzfrequenz: 3150 Hz, Abfall: -12 dB pro Oktave) in drei äquidistanten Stufen im Zeitbereich gefiltert. So verringerten sich die höherfrequenten Signalanteile und damit auch die jeweils berechnete Dauer der Schärfe. Gemäß der Norm für Schärfe nach DIN 45692 [44] würde dies einen Effekt bei der wahrgenommenen Schärfeamplitude hervorrufen. Insgesamt setzte sich die Studie aus 24 Geräuschen<sup>24</sup> zusammen. Acht von ihnen bildeten die originalen Stimuli. Jeweils acht weitere Stimuli wurden mittels Tiefpass zu einem Drittel ihrer Dauer und vollständig gefiltert<sup>25</sup>. Acht Experten der Funktionsakustik wurden gebeten, die Geräusche anhand deren Qualität in eine Rangfolge zu bringen. Hierfür fanden drei verschiedene Rangfolgetests statt, wobei jedes Experiment aus neun der 24 Stimuli bestand. Damit war es möglich, eine vollständige Rangfolge der Daten abzuleiten.

<sup>22</sup>Die positive Wirkung der integrierten technischen Maßnahmen ist im Unternehmen der BMW AG bekannt und im Entwicklungsprozess etabliert.

<sup>23</sup>Die Türzuschlaggeräusche der technischen Variation werden als Fast-Fourier-Transformation im Anhang in den Abbildungen A.35 - A.40 dargestellt.

<sup>24</sup>Die Türzuschlaggeräusche der synthetischen Variation werden als Fast-Fourier-Transformation im Anhang in den Abbildungen A.41 - A.48 dargestellt.

<sup>25</sup>Wird ein Signal zu  $\frac{2}{3}$  gefiltert unterscheidet sich der resultierende Effekt nicht von einem vollständig gefilterten und wird deshalb nicht berücksichtigt.

#### Ergebnis

Für den technischen Ansatz wurden drei Datensätze der subjektiven Bewertung der Geräuschqualität nicht in die Ergebnisse mit aufgenommen, da die statistische Prüfung auf ein inkonsistentes Antwortverhalten hinwies. Beim synthetischen Ansatz wurde der hypothetische Zusammenhang von subjektiven und objektiven Werten akustischer Qualität mithilfe des U-Tests analysiert. Statistisch betrachtet behielt die Nullhypothese  $H_0$ , die Mittelwerte der beiden Wertefolgen seien gleich, ihre Gültigkeit, da der U-Test bei einem Niveau von  $\alpha = 0,05$  keine signifikanten Unterschiede der Mittelwerte aufzeigte.

#### *Technischer Ansatz*

Die subjektive Bewertung der Geräuschqualität ist in Abbildung 3.18 (links) als Funktion des Parameters  $T_S$  dargestellt. Basierend auf diesen Daten lässt sich die Hypothese weiter stützen, dass ein als qualitativ wertiger empfundenes Türzuschlaggeräusch mit einer kürzeren Dauer der Schärfe einher geht ( $r = -0,93$ ). Zudem charakterisierte ein Vergleich der subjektiven Bewertung von Fahrzeug  $F_3 = 0,19$  (Premium- SUV der Mittelklasse, Prototyp) und Fahrzeug  $F_5 = 0,32$  (Familien- VAN, Vorserie) mit deren Intervall an gesteigerter Qualität ( $F_3 = 0,06$ ;  $F_5 = 0,23$ ) eine Veränderung von  $T_S$ . Dieser Effekt scheint unabhängig von den anfänglichen Fahrzeugeigenschaften zu sein. Weiterhin spiegelten die analysierten Stimuli keinen qualitativen Effekt wider, der auf die gesamte Signaldauer zurückzuführen wäre. So weisen die Türgeräusche ohne und mit Maßnahme einen identischen Zeitverlauf auf, wobei die jeweils differierende Dauer der Schärfe mit der Änderung der Geräuschqualität hoch korreliert.

#### *Synthetischer Ansatz*

Die Daten nach Abbildung 3.18 (rechts) zeigen, dass der objektive Parameter  $T_S$  die wahrnehmbare Qualität der Geräusche selbst auf Basis nur abschnittsweise gefilterter Signale signifikant wiedergibt ( $r = -0,92$ ). Für alle Fahrzeuge ergibt sich eine abnehmende Dauer der Schärfe, je länger das Signal durch den Tiefpass synthetisch gefiltert wird. Entsprechend gegenläufig nimmt die prognostizierte Geräuschqualität zu, wobei dieser Effekt von der ursprünglichen Bewertung abhängt. Exemplarisch hierfür weist Fahrzeug 3 eine berechnete Geräuschqualität von  $F_3 = 0,51$  für das ursprüngliche und eine maximale Steigerung von 0,21 für das vollständig gefilterte Signal auf. Demgegenüber ergibt sich für Fahrzeug 8 eine Qualität von  $F_8 = 0,23$  und ein Anstieg von nur 0,06, wenn das Geräusch vollständig gefiltert wurde. Zur Validierung dieser objektiven Charakteristika führten acht Experten der Funktionsakustik der BMW AG eine Rangordnung der untersuchten Geräusche durch. Diese subjektive Bewertung korreliert zu  $r = 0,89$  mit den berechneten Werten der Dauer der Schärfe, grafisch dargestellt in Abbildung A.14 im Anhang.

#### *Zusammenfassende Bewertung*

Die Ergebnisse der Studien zeigen eine hohe Korrelation des Parameters  $T_S$  mit dem auditiven Qualitätsempfinden von Türzuschlaggeräuschen. Dabei basieren die Daten der berechneten Dauer der Schärfe auf einem definierten Schärfewert von 1 *acum*. Um die Genauigkeit der Vorhersage zu prüfen, wurden mehrere Grenzwerte der Schärfe

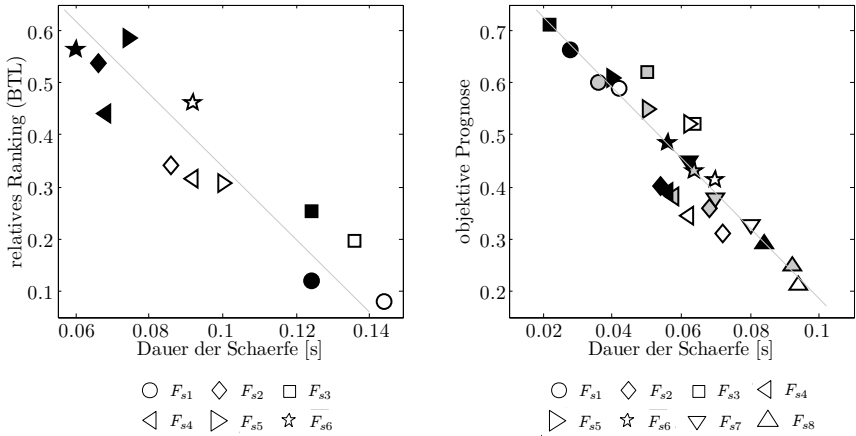


Abbildung 3.18: Geräuschqualität über der Dauer der Schärfe für Türzuschlaggeräusche. Jedes Symbol beschreibt das Geräusch eines Fahrzeugs. Links: Technische Variation der Geräusche. Die Daten von originalen und technisch veränderten Signalen sind durch offene und gefüllte Symbole dargestellt. Rechts: Synthetische Variation der Geräusche. Die Daten von originalen, zu einem Drittel gefilterten und vollständig gefilterten Signalen sind durch offene, graue und gefüllte Symbole dargestellt.

untersucht. Abbildung 3.19 zeigt die Korrelationswerte der Dauer der Schärfe zur empfundenen Geräuschqualität abhängig von der Schärfe. Jedes Symbol beschreibt die Gesamtkorrelation zwischen der wahrgenommenen Qualität und der Dauer der Schärfe als Funktion verschiedener Grenzwerte der Schärfe. Dargestellt sind die Korrelationskoeffizienten der originalen, technisch sowie synthetisch veränderten Türzuschlaggeräusche der durchgeführten Experimente (siehe Abbildung 3.18). Für die acht mit einem + gekennzeichneten Geräusche verändert sich die Genauigkeit der Vorhersage bis zu einem Grenzwert von  $1,125\text{ acum}$  kaum. Daran schließt direkt ein starker Abfall zu größeren Grenzwerten der Schärfe an. Für die synthetisch vollständig gefilterten Signale ( $\diamond$ ) zeigt die Kurve zwei Spitzen bei  $1\text{ acum}$  und bei  $1,25\text{ acum}$ . Alle weiteren Geräusche weisen das Maximum bei  $1\text{ acum}$  auf. Zudem beschreibt der arithmetische Mittelwert aller Kurven einen Schärfewert von  $1\text{ acum}$  als beste Grenze, um die Geräuschqualität impulshafter Türzuschlaggeräusche beschreiben zu können. Somit stellt die Dauer der Schärfe einen möglichen psychoakustischen Parameter dar, mit dem die Geräuschqualität zielführend abgebildet werden kann. Darüber hinaus zeigt der Parameter eine hohe Vorhersagekraft über einen breiten Bereich von empfundener Qualität, selbst wenn die Konsistenz der Probanden leichte Abweichungen aufweist.

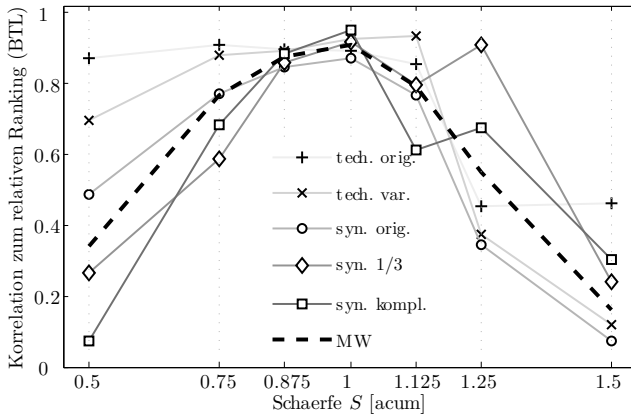


Abbildung 3.19: Korrelationswerte der Dauer der Schärfe zum relativen Ranking der Geräuschqualität. Jedes Symbol beschreibt den Betrag der Gesamtkorrelation der Dauer der Schärfe zur wahrgenommenen Geräuschqualität, abhängig vom entsprechenden Grenzwert der Schärfe. Die Daten der Türzuschlaggeräusche von originalen + und technisch variierten x sowie der ungefilterten o, zu einem Drittel gefilterten □ und vollständig gefilterten ◇ Signale sind dargestellt.

# Kapitel 4

## Übertragbarkeit der Methodik

Die menschliche Empfindung von akustischer Qualität oder die Eignung eines Geräusches als repräsentativer Klang für ein Produkt können nur indirekt geprüft werden [89]. So tragen unterschiedliche Methoden der Hörversuche dazu bei, die qualitative Wahrnehmung anhand von subjektiven Urteilen zu erfassen und zu klassifizieren. Ausgehend davon verfolgt eine Objektivierung das Ziel, diese Bewertung reproduzierbar beschreiben und die Qualität weiterer Signale vorhersagen zu können. Wird eine belastbare und valide Beziehung zwischen der subjektiven Qualitätswahrnehmung und den inhärenten Merkmalen der Geräusche abgeleitet, entsteht eine Rückkopplung zur allgemeinen Erwartung an die Geräuschqualität. Dieser Zusammenhang lässt sich anhand von parametrischen Modellen objektiv abbilden. Sie basieren zunehmend auf psychoakustischen Parametern, die sich als Empfindungsgrößen in Abhängigkeit von der Reizstärke skalieren lassen. Um die Signifikanz dieser Parameter zu untersuchen, bietet die semantische Bewertung eines Geräusches ein hohes Potential [3].

### 4.1 Ganzheitliche Anwendung der Methodik

In den vorangegangenen Kapiteln fanden aufeinander aufbauende Untersuchungen an impulshaften Fahrzeuggeräuschen statt. Dabei wurde eine Methode entwickelt, bei der der klassische Wahrnehmungsraum auf deskriptive Dimensionen reduziert und davon gezielt objektive Parameter für die Beschreibung der Geräuschqualität abgeleitet werden konnten. Dieser hypothetisch angenommene Zusammenhang soll im Folgenden an einem einzelnen Fahrzeuggeräusch betrachtet werden. Weiterhin sollen die bei singulär impulshaften Geräuschen als signifikant und valide geltenden Parameter auf deren Korrelation gegenüber mehrfach impulshaften Signalen untersucht werden.

#### 4.1.1 Dimensionsreduktion

In einem ersten Schritt wird der Wahrnehmungsraum mittels verbaler Attribute auf übergeordnete Dimensionen reduziert (siehe Kapitel 3.2). Der Fokus der folgenden Untersuchungen liegt auf psychoakustischen Parametern, da mit ihnen die Geräuschqualität in den vorangegangenen Studien besser beschrieben und vorhergesagt werden konnte.

Tabelle 4.1: Prozentuale und kumulative Verteilung der Varianzanteile der reduzierten Dimension beim Rückschnappen des Blinkerhebels.

Faktor	Erklärte Gesamtvarianz		
	Summe	% der Varianz	Kumulativ in %
Intensität	4,91	24,02	24,02
Klangfarbe	4,25	19,88	43,90
Wertigkeit	3,60	17,61	61,51
Dynamik	1,70	8,33	69,84

Stimuli und Methode

Insgesamt wurden 14 Geräusche während des Rückschnappens des Blinkerhebels aufgenommen. Zu Beginn eines Experiments spielte der Versuchsleiter die Geräusche einmalig vor. Danach erfolgte die subjektive Bewertung von 17 kontextspezifischen Adjektivpaaren nach der Methode des Semantischen Differentials<sup>1</sup> auf einer siebenstufigen Likertskala, wobei die Geräusche nicht mehr wiederholt wurden. Das Ziel der Untersuchung war die Definition eines als hochwertig empfundenen Geräusches. Hierfür sollten die Teilnehmer ihre individuelle Erwartungshaltung anhand der zugrunde liegenden Adjektivpaare beschreiben. Für eine detaillierte Betrachtung des multidimensionalen Wahrnehmungsraums kamen die opponierenden Begriffe *kräftig* ↔ *schwach*, *hell* ↔ *dunkel* und *kurz* ↔ *lang* ergänzend hinzu (siehe Tabelle 4.2).

Ergebnis

In Relation zu den weiteren Faktoren erreicht die als *Intensität* bezeichnete Dimension mit  $\sigma^2 = 24,02\%$  und einem Eigenwert von  $\lambda = 4,91$  die höchste Varianz. Der zweite Faktor *Klangfarbe* liefert eine Varianz von  $\sigma^2 = 19,88\%$ . Für die *Wertigkeit* ergibt sich ein etwas geringer Anteil mit  $\sigma^2 = 17,61\%$ . Der Begriff *Dynamik*, der als vierte Dimension vergleichsweise geringe Werte mit  $\sigma^2 = 8,33\%$  und  $\lambda = 1,70$  aufweist, trägt zu einer kumulierten Varianz von  $\sigma^2 = 69,84\%$  bei. Das Maß von Kaiser-Meyer-Olkin beschreibt den Datensatz mit einen Wert von  $KMO = 0,71$ , was als *gut geeignet* gilt. Weiterhin wird die Hypothese einer Population alleiniger Nullkorrelation zurückgewiesen, da der Barlett-Test auf Sphärizität eine minimale Signifikanz von  $p_s = 0,00$  ergibt. Hierfür zeigt Tabelle 4.1 die prozentuale und kumulative Verteilung der Varianz explizit für jeden einzelnen Faktor.

Grundsätzlich laden je fünf Begriffspaare auf die ersten drei Faktoren und weitere zwei auf den letzten Faktor. Die Adjektive *schwungvoll* ↔ *schwunglos* sowie *scheppernd* ↔ *solide* konnten keiner Dimension eindeutig zugeordnet werden. Eine mögliche Erklärung für das erstgenannte Paar bietet der neutrale Mittelwert  $MW = 4,06$ . Für die letztgenannten Adjektive liegt eine eindeutige Tendenz für den Begriff *solide* mit

<sup>1</sup>Die Adjektivpaare stammen aus einer Befragung von zwölf Experten der Funktionsakustik und wurden mitunter aus den in Kapitel 1.2 und 3.2 aufgeführten Untersuchungen ausgewählt.

Tabelle 4.2: Rotierte Komponentenmatrix beim Rückschnappen des Blinkerhebels. Darstellung der Faktorladungen auf die reduzierten Dimensionen.

Begriffspaar	Faktor			
	<i>Intensität</i>	<i>Klangfarbe</i>	<i>Wertigkeit</i>	<i>Dynamik</i>
schlaff - kraftvoll	-0,886			
kräftig - schwach	0,851			
prägnant - verwaschen	0,793			
laut - leise	0,792			
hart - weich	0,694			
hell - dunkel		0,792		
klar - undeutlich		0,738		
hochfrequent - tieffrequent		0,709		
dumpf - metallisch		-0,645		
scharf - mild		-0,628		
billig - hochwertig			0,721	
gedämpft - vibrierend			-0,656	
angenehm - lästig			-0,641	
hohl - massiv			0,614	
nicht klickend - klickend			-0,519	
nachschw. - n. nachschw.				-0,782
kurz - lang				0,638
schwungvoll - schwunglos				
scheppernd - solide				

einem Wert von  $MW = 6,47$  vor. Hier ließe sich die fehlende Zuordnung zu einem der Faktoren durch die scheinbar ungeeignete Wahl von *scheppernd* deuten. Da darunter eine Fehlfunktion oder ein technischer Mangel am Bauteil verstanden werden könnte, würde sich der Urteiler zwangsläufig für die gegensätzliche Maximalausprägung entscheiden. Die Bewertung wäre nicht mehr kontextunabhängig und nicht belastbar.

Entsprechend den Ergebnissen nach Tabelle 4.2 zählen *schlaff*  $\leftrightarrow$  *kraftvoll* mit  $r = -0,886$ , *kräftig*  $\leftrightarrow$  *schwach* mit  $r = 0,851$  sowie *prägnant*  $\leftrightarrow$  *verwaschen* mit  $r = 0,793$  zu den bezeichnenden Adjektiven der ersten Dimension *Intensität*. Diese Begriffe greifen das Merkmal der Energie auf, die ein Geräusch mit sich bringt. Im Vergleich dazu charakterisieren die ebenfalls zugehörigen Adjektive *laut*  $\leftrightarrow$  *leise* und *hart*  $\leftrightarrow$  *weich* primär die assoziierte Amplitude. Für den zweiten Faktor *Klangfarbe* liegt eine ähnliche Teilung vor. Während mit *hell*  $\leftrightarrow$  *dunkel* ( $r = 0,792$ ), *klar*  $\leftrightarrow$  *undeutlich* ( $r = 0,792$ ) und *dumpf*  $\leftrightarrow$  *metallisch* ( $r = 0,792$ ) eine direkte Relation zur Wahrnehmung von

Klängen existiert, weisen die frequenzbasierten Adjektive *hochfrequent*  $\leftrightarrow$  *tieffrequent* mit  $r = 0,709$  sowie *scharf*  $\leftrightarrow$  *mild* mit  $r = -0,628$  eher auf die physikalischen Randbedingungen hin. Für den dritten Faktor *Wertigkeit* liegt ein Eigenwert von  $\lambda = 3,60$  vor. Auf ihn laden die Adjektive *hochwertig*, *gedämpft*, *angenehm*, *massiv* und *nicht klickend* positiv und spiegeln die subjektive Erwartung an die Qualität wider. Aus den Begriffen *nachschwingend*  $\leftrightarrow$  *nicht nachschwingend* mit  $r = -0,782$  und *kurz*  $\leftrightarrow$  *lang* mit  $r = 0,638$  setzt sich die vierte Wahrnehmungsdimension zusammen. Sie wird als *Dynamik* bezeichnet, da sie den zeitlichen Aspekt des Rückschnappens beschreibt. Dabei ruft ein kürzeres, nicht nachschwingendes Signal eine wertigere Empfindung hervor.

### *Zusammenfassende Bewertung*

Ein Vergleich zu den in Kapitel 3.2 abgeleiteten Dimensionen zeigt, dass der Faktor *Wertigkeit* für die Geräusche des Blinkerhebels nur den dritthöchsten Varianzanteil aufweist. Darauf laden erneut die Adjektive *billig* und *angenehm* sowie das Begriffspaar *hohl*  $\leftrightarrow$  *massiv*, welches bei den Geräuschen des Türgriffs zur Dimension *Intensität* gehört. Da das Rückschnappen des Türgriffs auch vom Aufbau und der Struktur der Tür abhängt, kann ein massives Rückschnappen sowohl akustisch als auch haptisch mit dem Begriff *intensiv* verbunden werden. Weiterhin laden auf den Faktor *Intensität* neben den kontextspezifisch hinzugekommenen Begriffen wie *kraftvoll* und *kräftig* die Adjektive *laut* und *hart*. Da diese Dimension den höchsten Varianzanteil aufweist, wird die Hypothese aufgestellt, dass der Lautheit eine wesentliche Rolle bei der Objektivierung der Geräuschqualität zukommt.

Der zweite Faktor vereint auch Begriffe, die in Kapitel 3.2 auf die Dimension *Dynamik* laden. Hierzu zählen *scharf*  $\leftrightarrow$  *mild* und *hochfrequent*  $\leftrightarrow$  *tieffrequent*, die nun mit den Adjektiven *hell*, *dumpf* und *klar* gemeinsam assoziiert und unter der Dimension *Klangfarbe* zusammengefasst werden. Diese Beziehung kann anhand der emotionalen Situation während des Fahrens beschrieben werden. Das Geräusch des Rückschnappens wird vom Fahrer dann erwartet, wenn er wieder aus der Kurve ausfährt. Deshalb achtet er explizit auf das Signal als Informationsträger (Dimension *Intensität*) für den Abschluss des Blinkvorganges. Dadurch rücken qualitative Merkmale in den Vordergrund (Dimension *Klangfarbe*). Im Fall des Rückschnappens des Blinkerhebels zählen somit auch inhärente Signalanteile wie die vorhandenen Frequenzen und deren Ausprägungen zu den bedeutenden Klangmerkmalen. Damit wird ein hypothetischer Zusammenhang zu den Parametern der Schärfe angenommen, die ebenfalls als relevant für die objektive Beschreibung der auditiven Qualität gelten.

## 4.1.2 Modellentwicklung

Durch die gezielte Ableitung von Parametern mithilfe vorab identifizierter, qualitativ relevanter Dimensionen wird ein Mehrwert für die Objektivierung der Geräuschqualität vermutet. Ein derartiges methodisches Vorgehen wurde im Rahmen dieser Arbeit bereits erfolgreich erprobt und soll nun am Geräusch des Rückschnappens des Blinkerhebels untersucht werden. Hierfür gelten die psychoakustische Lautheit und die Schärfe gemäß den reduzierten Dimensionen nach Kapitel 4.1.1 als maßgeblich.



## Stimuli und Methode

Für die subjektive und objektive Bewertung der Geräuschqualität liegen jene 14 Signale zugrunde, die bereits zu Beginn der semantischen Abfrage genutzt wurden. Beurteilt werden die Stimuli nach der Methode des Paarvergleichs in zwei unabhängigen Gruppen. Jeweils zwei der acht Geräusche sind identisch. Weiterhin erfolgt eine Klassifizierung derselben 14 Geräusche auf einer neunstufigen Likertskala. Der Test-Retest-Ansatz ermöglicht dabei einen Vergleich der Urteilsstreuung und somit eine Prüfung der Teilnehmer auf konsistentes Antworten.

## Ergebnis

Insgesamt wurden die Datensätze von vier Teilnehmern des paarweisen Vergleichs anhand des  $\chi^2$ -Tests für die weitere Analyse ausgeschlossen. Für die kategoriale Bewertung liegt ein kritischer Korrelationskoeffizient nach Pearson von  $r_{krit} = 0,521$  zugrunde. Die Ergebnisse zweier Teilnehmer erreichten diesen Wert nicht, weshalb ihre Daten nicht berücksichtigt wurden (Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 0,05$ ).

Die absoluten Urteile zur Geräuschqualität des Rückschnappens des Blinkerhebels sind statistisch normalverteilt und in Abbildung A.15 im Anhang dargestellt. Analog zur relativen Skalierung wird das Geräusch  $B_{S14}$  mit einem Mittelwert  $MW = 1,80$  als deutlich minderwertig erachtet. Ebenfalls charakteristisch ist der große Abstand von  $\Delta MW = 2,15$  zum nächstwertigeren Signal  $B_{S13}$ , welches eine um gut 40% geringere Lautheit aufweist. Interessant ist die nahezu identische Bewertung der Stimuli  $B_{S9} - B_{S12}$ , obwohl die empfundene Lautstärke stetig ansteigt. Die qualitative Abstufung dieses physikalischen Phänomens führt beim paarweisen Vergleich zu einer stärker differenzierten Wertigkeit. Mit Ausnahme von  $B_{S3}$  liegt für die als hochwertig klassifizierten Geräusche keine Minimalbewertung von 1 vor, wobei das am besten bewertete Fahrzeug  $B_{S1}$  nur einen Abstand von  $\Delta MW = 0,77$  zum neutralen Urteil 5 aufweist. Weiterhin zeigen die Stimuli  $B_{S3} - B_{S7}$  eine eher geringe Streuung, obwohl die zugehörigen Werte der Lautheit und der Dauer der Schärfe etwas stärker variieren. Eine mögliche Erklärung für die stärkere Differenzierung der Geräusche mittels des Paarvergleichs liegt in der Vorgabe des Wahlzwanges, da eine Entscheidung für einen Stimulus getroffen werden muss. Werden die Ergebnisse der relativen und absoluten Bewertung verglichen, so ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von  $r = 0,97$  für Gruppe A<sup>2</sup> und von  $r = 0,93$  für Gruppe B (siehe Abbildung 4.1). Diese hohen Werte lassen auf eine reproduzierbare Abbildung der Geräuschqualität sowie auf ein belastbares Urteilsverhalten der Probanden schließen.

### Psychoakustischer Ansatz

Nach einer linearen Regressionsanalyse der ersten acht Geräusche für die subjektiven und für die objektiven Daten ergeben sich die Bestimmtheitsmaße  $R^2 = 0,98$  bzw.  $R_{adj}^2 = 0,97$ . Die objektive Modellierung des auditiven Qualitätsempfindens basiert auf den beiden Parametern der Lautheit  $N_5$  und der Dauer der Schärfe  $T_S$ . Dabei ist der Koeffizient von  $N_5$  mit  $-0,19$  um das nahezu Vierfache größer als der bei  $T_S$  mit  $-0,05$ . Statistisch betrachtet überschreiten die t-Werte der Lautheit  $|t_{N_5} = -11,08|$  und der

<sup>2</sup>Die Rückschnappergeräusche des Blinkerhebels von Gruppe A werden als Fast-Fourier-Transformation im Anhang in den Abbildungen A.49 - A.52 dargestellt.

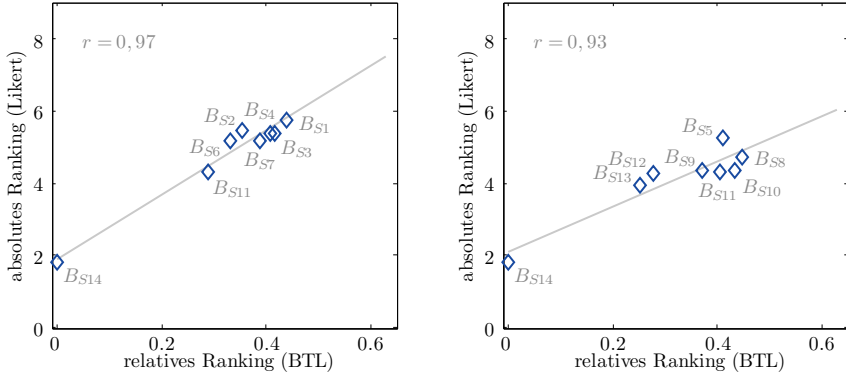


Abbildung 4.1: Korrelationsanalyse der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs und des absoluten Rankings anhand einer neunstufigen Likertskala. Geräuschqualität vom Rückschnappen des Blinkerhebels. Links: Gruppe A. Rechts: Gruppe B

Dauer der Schärfe  $|t_{T_S} = -3,07|$  den für fünf Freiheitsgrade kritischen Referenzwert von  $t_c = 2,57$ . Der Kennwert von  $F_{emp} = 57,1$  weist auf ein hochsignifikantes Prognosemodell hin, dessen Datensatz in Abbildung 4.2 (links) dargestellt ist. Wird das für Gruppe A abgeleitete Modell dazu verwendet, die Geräuschqualität der Signale von Gruppe B objektiv vorherzusagen, so resultiert ein Korrelationskoeffizient von  $r = 0,97$ . Abbildung 4.2 (rechts) zeigt die Werte der linearen Korrelation grafisch.

### Zusammenfassende Bewertung

Die hohe Korrelation der Daten weist auf die Entwicklung eines signifikanten und belastbaren Modells hin.

$$AW_{psy} = 0,25 - 0,21 \cdot N_5 - 0,06 \cdot T_S \quad (4.1)$$

Hierbei stimmt die hohe Varianz der Dimension *Intensität* aus der semantischen Abfrage mit der ebenfalls hohen Gewichtung der Lautheit überein. Zudem bildet der Parameter der Dauer der Schärfe die qualitativen Effekte im Signal ab, die durch die frequenzabhängigen Begriffe im zweiten und die zeitliche Dynamik im vierten Faktor beschrieben wurden. So korrelieren die nach Gleichung (4.1) prognostizierten Werte mit der subjektiven Qualitätswahrnehmung zu  $r = 0,98$  (Gruppe A) und zu  $r = 0,97$  (Gruppe B). Im Anhang ist dieser Zusammenhang in Abbildung A.16 dargestellt. Diese valide, objektive Qualitätsprognose basiert maßgeblich auf dem Parameter der Lautheit und dabei auf der Perzentillautheit  $N_5$ . Wie Abbildung 4.3 für die Blinkerhebel der Gruppen A (+) und B (x) zeigt, nimmt die Gesamtkorrelation der Perzentillautheit zur subjektiv empfundenen Geräuschqualität von  $N_1$  bis  $N_5$  um etwa 20% zu. Daran

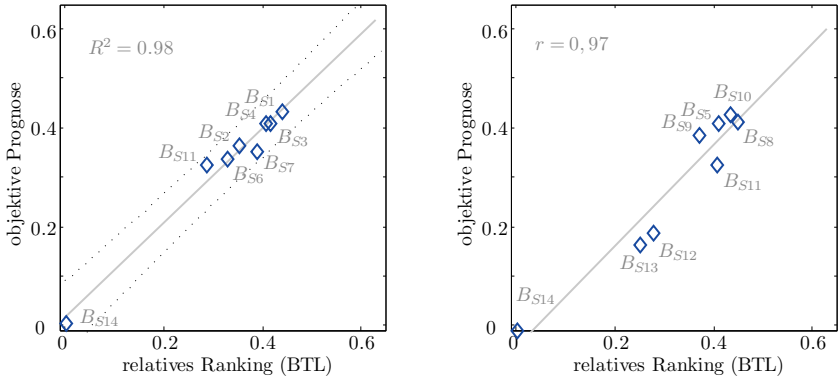


Abbildung 4.2: Regressions- und Korrelationsanalyse von Geräuschen des Rückschnappens von Blinkerhebeln. Links: Regressionsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs mithilfe der objektiven Parameterwerte, Gruppe A. Rechts: Korrelationsanalyse der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs von Gruppe B und der objektiven Prognose anhand des Modells von Gruppe A.

schließt sich ein starker Abfall der Korrelationskoeffizienten an. Sie liegen für  $N_7$  bereits unterhalb des Niveaus von  $N_1$  und erreichen bei  $N_{10}$  ihre jeweiligen Minimalwerte.

Für den zweiten Parameter  $T_S$  wird erneut 1 *acum* als Grenzwert für die Berechnung der Dauer der Schärfe gewählt. Wie Abbildung 4.4 verdeutlicht, liegt hier für beide Gruppen die höchste Gesamtkorrelation mit  $r = 0,64$  zur subjektiven Bewertung der Geräuschqualität vor. Jedes Symbol beschreibt dabei die Korrelation der für einen bestimmten Grenzwert der Schärfe berechneten Dauer zum subjektiven Ranking des paarweisen Vergleichs. Allerdings korrelieren die weiteren Koeffizienten für die Schärfe-werte von 0,5 *acum* bis 1,25 *acum* nur unwesentlich schlechter. Erst bei einer Grenze von 1,5 *acum* weichen die Korrelationswerte mit 19% (Gruppe A) und 9% (Gruppe B) deutlicher vom Maximalwert ab.

Anhand der Abbildung 4.3 wird deutlich, dass die Geräuschqualität von Blinkerhebeln mittels der Perzentillautheit  $N_5$  bereits gut beschrieben werden kann. Durch die Kombination der Parameter  $N_5$  und  $T_S$  innerhalb eines Modelles steigt die Vorhersagekraft auf ein noch höheres Niveau an. Zusätzlich zur Lautheit und der damit verbundenen Dimension *Intensität* greift die Dauer der Schärfe die negativ bewerteten Klangmerkmale wie das zu lange und hochfrequente Nachschwingen des Hebels auf. Diese Charakteristika stehen in direktem Bezug zu den Dimensionen *Klangfarbe* und *Dynamik* mit den darauf ladenden Begriffen *tiefrequent* und *nicht nachschwingend*. Somit wird durch die objektiven Parameter der Lautheit und der Dauer der Schärfe eine direkte Rückkopplung zur semantisch beschriebenen Erwartungshaltung an den Klang eines Blinkerhebels

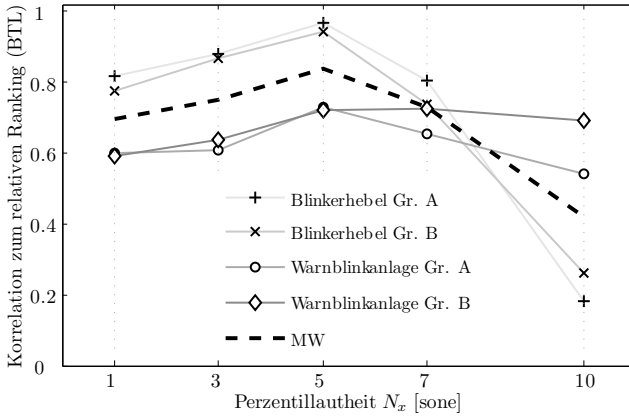


Abbildung 4.3: Korrelationswerte der Lautheit zum relativen Ranking der Geräuschqualität. Jedes Symbol beschreibt den Betrag der Gesamtkorrelation der Lautheit zur wahrgenommenen Geräuschqualität, abhängig vom entsprechenden Perzentil der Lautheit. Die Daten des Rückschnappens der Blinkerhebel von Serienfahrzeugen für Gruppe A + und Gruppe B x sowie die Daten der Geräusche der Warblinkanlage der Gruppe A o und Gruppe B ◊ sind dargestellt.

erreicht. Dieser hypothetisch angenommene Zusammenhang weist einen Mehrwert für die Objektivierung der Geräuschqualität auf, da die durchgeführten Untersuchungen erneut zu einem validen und signifikanten Ergebnis führen.

### 4.1.3 Mehrfach impulshafte Geräusche

Aufgrund der kurzen Dauer, dem breiten Frequenzspektrum und dem steil ansteigenden Gradienten des Schalldrucks reagiert die menschliche Wahrnehmung besonders sensibel auf impulshafte Signale. Folgen mehrere identische Impulse etwa gleich schnell aufeinander, so passen sich die Gehörmechanismen und der nachgelagerte kognitive Prozess mit zunehmender Dauer an [20], [174]. Je nach Signalcharakter spielen auch zeitliche und spektrale Verdeckungseffekte eine wesentliche Rolle. Im Folgenden soll deshalb an mehrfach impulshaften Geräuschen untersucht werden, inwiefern deren Geräuschqualität objektiv beschrieben werden kann. Der Fokus liegt dabei auf den psychoakustischen Parametern, die im Rahmen dieser Arbeit bereits zu belastbaren Ergebnissen bei singulären Geräuschen geführt haben. Das Ziel ist es, die Vorhersagekraft dieser Parameter innerhalb der übergeordneten Signalgruppe der impulshaften Geräusche zu hinterfragen und zu diskutieren.

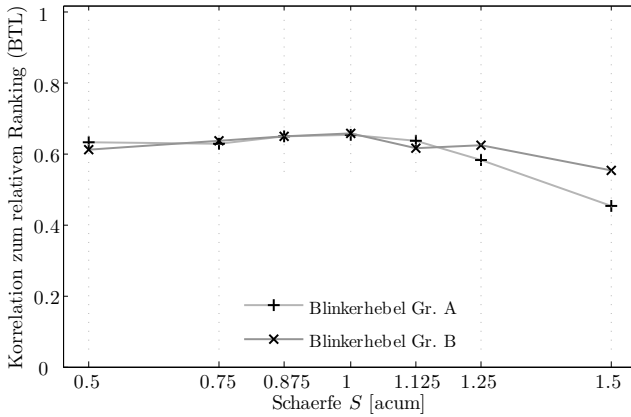


Abbildung 4.4: Korrelationswerte der Dauer der Schärfe zum relativen Ranking der Geräuschqualität. Jedes Symbol beschreibt den Betrag der Gesamtkorrelation der Dauer der Schärfe zur wahrgenommenen Geräuschqualität, abhängig vom entsprechenden Grenzwert der Schärfe. Die Daten des Rückschnappens der Blinkerhebel von Serienfahrzeugen für Gruppe A + und Gruppe B x sind dargestellt.

### Stimuli und Methode

Mittels des Paarvergleichs und der kategorialen Bewertung wurden 14 Signale der Warnblinkanlage subjektiv anhand der Geräuschqualität klassifiziert. Die Durchführung der Hörversuche sowie die Prüfung der Probanden auf konsistentes Antworten entspricht dem methodischen Vorgehen, das auch in Kapitel 4.1.2 benutzt wurde.

### Ergebnis

Auf einer siebenstufigen Likertskala erreicht das schlechteste Geräusch  $W_{S14}$  im Mittel einen Wert von  $MW = 2,09$ , das beste  $W_{S1}$  einen Wert von  $MW = 5,00$ . Auffällig ist die nahezu identisch empfundene Geräuschqualität der Stimuli  $W_{S10} - W_{S12}$ . Hier liegen sowohl beim Median als auch bei den Quartilen übereinstimmende Werte zugrunde ( $\Delta MW = 0,07$ ). Eine ähnlich geringe Differenz der Mittelwerte von  $\Delta MW = 0,06$  zeigen die Geräusche  $W_{S3} - W_{S8}$ , die sich in der Zusammensetzung der Urteile aber deutlicher unterscheiden. So besteht die Bewertung von Geräusch  $W_{S8}$  ( $MW = 3,64$ ) aus einem Median von 3,5 und einem symmetrischen Quartilsabstand von 1,5. Bei einem identischen Median von ebenfalls 3,5 teilen sich die Quartile für Signal  $W_{S6}$  allerdings stark unterschiedlich auf. Weiterhin muss für Geräusch  $W_{S2}$  die Annahme einer Normalverteilung nach einer statistischen Prüfung verworfen werden. Die Ergebnisse der absoluten Bewertung sind in Abbildung A.17 im Anhang dargestellt.

Die absolute Bewertung der Geräuschqualität findet statt, um die intervallskalierte Rangfolge des relativen Vergleichs zu hinterfragen. Abbildung 4.5 veranschaulicht diese Beziehung entsprechend der zwei Geräuschgruppen. Anhand der statistischen Analysen

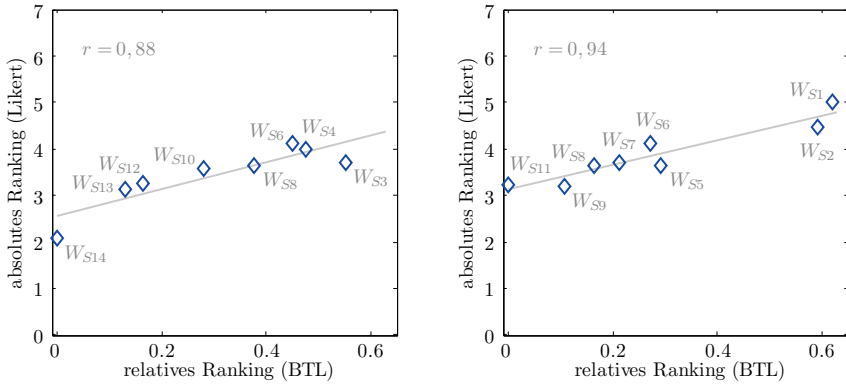


Abbildung 4.5: Korrelationsanalyse der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs und des absoluten Rankings anhand einer siebenstufigen Likertskala. Geräuschqualität von mehrfach impulshaften Signalen der Warnblinkanlage. Links: Gruppe A. Rechts: Gruppe B

mussten fünf Datensätze wegen inkonsistenter Antworten ausgeschlossen werden. Die Experimente zeigen eine hohe Übereinstimmung mit Werten von  $r = 0,88$  für Gruppe A<sup>3</sup> und mit  $r = 0,94$  für Gruppe B. Es ist interessant, dass sich die scheinbar geringen Qualitätsunterschiede der Geräusche durch beide Bewertungsmethoden sehr gut abbilden lassen. Somit kann eine valide Skalierung der Geräuschqualität sowie ein belastbares Antwortverhalten der Teilnehmer angenommen werden.

### Psychoakustischer Ansatz

Entsprechend der intervallskalierten Rangfolge der Daten von Gruppe A führt die Regressionsanalyse zu einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,90$  und zu  $R_{adj}^2 = 0,87$  für den korrigierten Wert (siehe Abbildung 4.6, links). Das entwickelte Modell besteht aus den Parametern der Lautheit  $N_5$  und der Dauer der Schärfe  $T_S$ . Diese beiden Parameter gehen auch in die psychoakustischen Modelle des Türzuschlags gemäß Kapitel 3.4.1 und des Rückschnappens des Blinkerhebels nach Kapitel 4.1.2 ein. Dabei unterscheiden sich die Ansätze maßgeblich durch die Gewichtungsfaktoren. Für die mehrfach impulshaften Geräusche der Warnblinkanlage nach Gruppe A liegen Werte von 0,14 für  $N_5$  und  $-0,17$  für  $T_S$  zugrunde. Da sich die t-Werte der Lautheit mit  $|t_{N_5} = 3,685|$  und der Dauer der Schärfe mit  $|t_{T_S} = -4,280|$  oberhalb der kritischen Referenz von  $t_c = 2,571$  befinden und ein empirischer F-Wert von  $F_{emp} = 22,3$  vorliegt, gilt der modellierte Zusammenhang als signifikant. Weiterhin zeigt Abbildung 4.6 (rechts) die subjektiv empfundene Geräuschqualität von Gruppe B und deren objektive Prognose mittels des

<sup>3</sup>Die Geräusche der Warnblinkanlage von Gruppe A werden als Fast-Fourier-Transformation im Anhang in den Abbildungen A.53 - A.56 dargestellt.

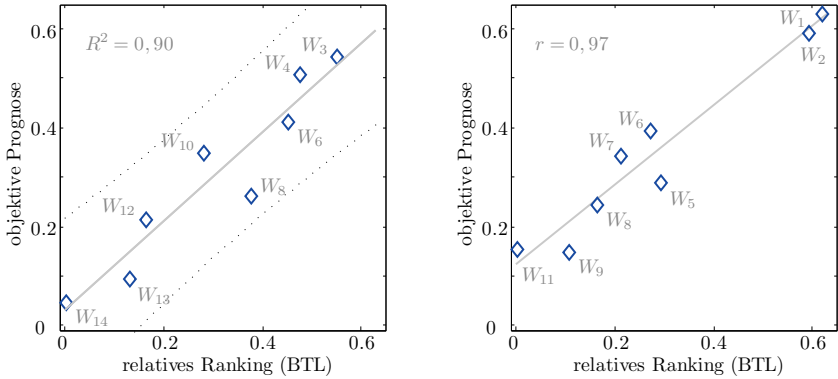


Abbildung 4.6: Regressions- und Korrelationsanalyse von Geräuschen der Warnblinkanlage. Links: Regressionsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs mithilfe der objektiven Parameterwerte, Gruppe A. Rechts: Korrelationsanalyse der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs von Gruppe B und der objektiven Prognose anhand des Modells von Gruppe A.

beschriebenen Modells nach Gruppe A. Aus der Korrelationsanalyse beider Datensätze geht ein sehr hoher Wert von  $r = 0,97$  hervor. Damit wird der psychoakustische Ansatz von Gruppe A als valide und als reliabel gegenüber unabhängigen Daten beschrieben.

#### *Zusammenfassende Bewertung*

Für das Geräusch der Warnblinkanlage korrelieren die relative und absolute Bewertung der akustischen Qualität hoch (siehe Abbildung 4.5). Dieser methodenübergreifende Zusammenhang deutet auf ein belastbares und reproduzierbares Verständnis der Teilnehmer hin, wenn die Geräuschqualität subjektiv beurteilt werden soll. Werden die psychoakustischen Parameter der Perzentillautheit  $N_5$  und der Dauer der Schärfe  $T_S$  für eine objektive Prognose genutzt, resultiert folgendes Modell.

$$AW_{psy} = 0,20 + 0,19 \cdot N_5 - 0,20 \cdot T_S \quad (4.2)$$

Entgegen der Modelle von singular impulshaften Fahrzeuggeräuschen geht die Lautheit mit einem positiven Koeffizienten in die Gleichung ein. Da das Geräusch der Warnblinkanlage primär mit Gefahrensituationen oder erhöhter Aufmerksamkeit assoziiert wird, kann ein lauterer Signal als positiv und hochwertig empfunden werden. Wird die wahrgenommene Qualität der Geräusche der Warnblinkanlage anhand von Gleichung (4.2) vorhergesagt, korrelieren die objektiven Daten mit der subjektiven Bewertung zu  $r = 0,95$  und  $r = 0,97$  für die Gruppen A und B. Eine detaillierte Darstellung dieser übereinstimmenden Ergebnisse ist in Abbildung A.18 im Anhang dargestellt.

Die Untersuchung der Grenzwerte der Parameter  $N_5$  und  $T_S$  für die bestmögliche Vorhersage der Geräuschqualität nach Gleichung (4.2) zeigt Abbildung 4.3. Hier weist die Perzentillautheit  $N_5$  mit  $r = 0,70$  für Gruppe A und  $r = 0,69$  für Gruppe B die höchste Korrelation auf, wobei sich die Werte nur für Gruppe A zu niedrigeren und höheren Perzentilen hin verringern (19% für  $N_{10}$ ). Bei Gruppe B steigen die Werte für  $N_1$  und  $N_3$  analog zu Gruppe A bis  $N_5$  an. Allerdings korrelieren die weiteren Koeffizienten für  $N_7$  zu  $r_{Gr.B} = 0,69$  und für  $N_{10}$  zu  $r_{Gr.B} = 0,68$  auf einem ähnlich hohen Niveau.

Weiterhin zeigt Abbildung 4.7 die Gesamtkorrelation der Dauer der Schärfe gegenüber dem relativen Ranking, abhängig von definierten Grenzwerten der Schärfe. Der Kurvenverlauf von Gruppe A erreicht sein Maximum von  $r = 0,80$  bei einem Schärfewert von  $1,5\text{ acum}$  und fällt danach etwa linear auf einen Wert von  $r = 0,61$  bei  $2,5\text{ acum}$  ab. Die Korrelationskoeffizienten bei den Grenzwerten von  $0,5\text{ acum}$  und  $1\text{ acum}$  sind identisch und liegen leicht unterhalb des Maximums auf ähnlich hohem Niveau. Eine derartige Übereinstimmung ( $r = 0,72$ ) gilt auch für die Gruppe B. Im weiteren Verlauf der Kurve korreliert das relative Ranking mit der Dauer der Schärfe bei einem Schärfewert von  $1,5\text{ acum}$  mit  $r = 0,71$  ähnlich hoch und fällt dann deutlich ab. Grundsätzlich kann für diesen Signaltyp festgestellt werden, dass die Gesamtkorrelation des Parameters  $T_S$  mit der subjektiven Bewertung für die Grenzwerte der Schärfe von  $0,5\text{ acum}$ ,  $1\text{ acum}$  und  $1,5\text{ acum}$  annähernd identisch ist. Einen weiteren Effekt beschreiben die zusätzlich in Abbildung 4.7 aufgezeigten Korrelationskoeffizienten  $MW$ . Hier wird die Dauer der Schärfe anhand des arithmetischen Mittelwertes der Schärfe berechnet. Diese Werte korrelieren auf einem ähnlich hohen Niveau wie die Werte, die sich für die definierten Grenzwerte der Schärfe von  $0,5\text{ acum}$ ,  $1\text{ acum}$  und  $1,5\text{ acum}$  ergeben. Abhängig von der jeweiligen Gruppe übersteigen sie diese sogar leicht.

Die Geräuschqualität von impulshaften Fahrzeuggeräuschen kann mithilfe der Parameter der Perzentillautheit  $N_5$  und der Dauer der Schärfe  $T_S$  (Schärfewert  $1\text{ acum}$ ) annähernd beschrieben werden. Die gewählten Grenzwerte führen jeweils zur höchsten Gesamtkorrelation mit dem Qualitätsempfinden. Im Speziellen stellen die beiden Parameter die objektiven und validen Referenzgrößen dar. Mit ihnen kann die Qualität unabhängig vom Signaltyp singular impulshafter Geräusche und sogar übergreifend für mehrfach impulshafte Geräusche zuverlässig vorhergesagt werden. Einen wesentlichen Einfluss hat allerdings die Gewichtung der Parameter, die für jeden Geräuschtyp angepasst werden muss.

## 4.2 Interkulturelle Übertragbarkeit der Modelle

Das Wissen über und das Verständnis für kulturelle Unterschiede im Bereich der subjektiven Wahrnehmung führt zu einem wertvollen Fundament, um einen Mehrwert sowohl für soziale Aspekte als auch für wirtschaftliche Interessen zu erlangen. Dadurch können beispielsweise gustatorische Reize in der Nahrung, aber auch physikalische Reize an Fahrzeugen, zielführend abgestimmt werden. In diesem Zusammenhang stellen kulturell geprägte Merkmale wichtige Kriterien dar, anhand derer die Geräuschqualität eines Produktes für internationale Märkte entwickelt werden kann [90]. Die kulturellen Unterschiede der subjektiven Wahrnehmung gewinnen im Bereich der Automobilin-



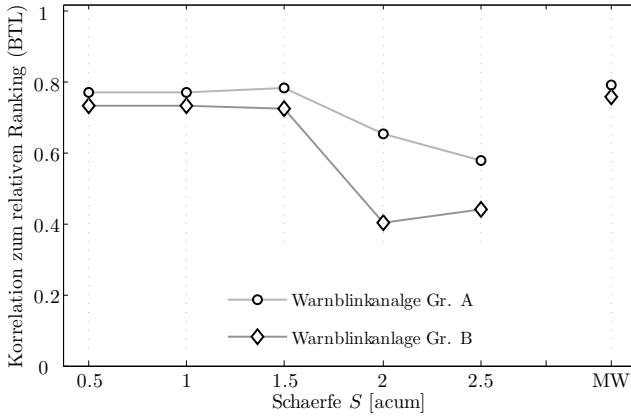


Abbildung 4.7: Korrelationswerte der Dauer der Schärfe zum relativen Ranking der Geräuschqualität. Jedes Symbol beschreibt den Betrag der Gesamtkorrelation der Dauer der Schärfe zur wahrgenommenen Geräuschqualität, abhängig vom entsprechenden Grenzwert der Schärfe. Die Daten der Geräusche der Warnblinkanlage für Gruppe A  $\square$  und Gruppe B  $\diamond$  sind dargestellt.

dustrie zunehmend an Bedeutung. Einerseits werden weltweit Fahrzeuge des gleichen Typs verkauft, andererseits bewusst eigenständige Derivate für ausgewählte Märkte entwickelt. Deshalb ist eine detaillierte Kenntnis der kulturspezifischen Anforderungen an den Klang eines Fahrzeugs notwendig, um die individuellen Erwartungen an die Geräuschqualität zu erfüllen.

Dazu wurden im Rahmen dieser Arbeit Studien durchgeführt, um zu erkennen, wie die Geräuschqualität mithilfe der bereits entwickelten Parametermodelle (Referenz) beschrieben und vorhergesagt werden kann. Die Ergebnisse der Studien wurden mit den prognostizierten Daten eines Modells verglichen, welches auf den gleichen Parametern basiert. Allerdings wurde für die Parameter eine optimale Gewichtung anhand des auditiven Qualitätsempfindens der Probanden des jeweiligen Kulturkreises ermittelt. Für die subjektive Bewertung der Geräuschqualität wurden Teilnehmer aus Europa, aus China und aus den USA ausgewählt [171].

### Stimuli und Methode

Den Experimenten lagen jeweils acht Geräusche des Türzuschlags und des Rückschnappens des Blinkerhebels zugrunde. Diese Signaltypen wurden ausgewählt, da die objektiven Modelle jeweils auf den psychoakustischen Parametern der Perzentillautheit  $N_5$  und der Dauer der Schärfe  $T_S$  basieren und deren Gewichte zwischen den Modellen der vorangegangenen Studien (siehe Kapitel 3.4 und Kapitel 4.1) differierten. Interessant ist dabei auch der Quotient aus den Gewichtungen der Lautheit und der Dauer der Schärfe. Dieser ergibt sich für das Türzuschlaggeräusch zu  $\frac{N_5}{T_S} = 0,52$ , wohingegen

der Wert für das Geräusch des Blinkerhebels  $\frac{N_s}{T_s} = 3,50$  erreicht. Als Referenzmodell wird die Gleichung (3.14) für die Geräusche des Türzuschlags verwendet. Für die Signale des Blinkerhebels wird die Gleichung (4.1) genutzt. In einem ersten Schritt wurde die Geräuschqualität von Personen aus Europa, China und den USA mittels der Hörversuchsmethoden des paarweisen Vergleichs und der kategorialen Bewertung (siebenstufige Likertskala) klassifiziert. Ausgehend hiervon wurde untersucht, ob die Geräuschqualität anhand der Referenzmodelle beschrieben werden kann. Hierfür fanden Korrelationsanalysen zwischen der subjektiven Bewertung der drei Kulturen und den prognostizierten Daten des Referenzmodells statt. Das Ziel war es zudem, die Vorhersagekraft der Referenzmodelle in Relation zu den Ergebnissen von Modellen zu betrachten, die auf Basis identischer Parameter das akustische Qualitätsempfinden der jeweiligen Kultur optimal prognostizieren können.

### Probanden

Die Teilnehmer der Experimente stammten aus dem näheren Umfeld der Fahrzeugentwicklung und Fahrzeugproduktion der BMW AG. Die Probanden aus den Ländern der Volksrepublik China und den USA wurden an dort liegenden Standorten rekrutiert. Entsprechend ihrer Herkunft waren ihre Empfindungen und ihre Erwartungen an die Qualität von Fahrzeuggeräuschen durch die länderspezifische Kultur geprägt. Bei keinem der Probanden lag ein dokumentierter Hörschaden vor; sie galten deshalb als normalhörend. Alle Experimente wurden gemäß der in Kapitel 3.1 beschriebenen Herangehensweise durchgeführt und fanden im selben Raum unter identischen Bedingungen statt. Für die Hörversuche mit den Teilnehmern aus der Volksrepublik China und den USA wurden jeweils staatlich zertifizierte Übersetzer hinzugezogen. Sie unterstützten den Versuchsleiter bei der Übersetzung des Qualitätsbegriffes, der Durchführung und der Beantwortung offener Fragen. Die Teilnehmergruppen werden nachfolgend genauer charakterisiert:

- *Europa*

Aus Europa, vorrangig aus Deutschland, nahmen sechs Frauen im Alter von 21 bis 28 Jahren sowie 28 Männer im Alter von 21 bis 54 Jahren an den Experimenten teil. Das Durchschnittsalter betrug 30,4 Jahre. Unter den Teilnehmern befanden sich sechs Experten auf dem Fachgebiet der Akustik.

- *China*

Die Gesamtzahl der chinesischen Teilnehmer lag bei 44 Personen, wobei 40 davon als Laien auf dem Gebiet der Fahrzeugakustik galten. Insgesamt waren 13 Frauen zwischen 24 und 31 Jahren sowie 31 Männer zwischen 22 und 35 Jahren beteiligt. Der Altersdurchschnitt betrug 28,1 Jahre.

- *USA*

An den Hörversuchen nahmen insgesamt 34 Personen aus den USA teil. Neben 10 Frauen im Alter von 21 bis 38 Jahren wirkten 24 Männern im Alter von 24 bis 57 Jahren mit. Im Durchschnitt war ein Proband 33,1 Jahre alt. Zum Zeitpunkt der Experimente arbeiteten fünf Teilnehmer auf dem Fachgebiet der Akustik.

## Geräusch des Türzuschlags

Für das kumulierte Ergebnis der subjektiven Geräuschbewertung werden allein die Datensätze von konsistent antwortenden Teilnehmern zugelassen. Anhand des  $\chi^2$ -Tests sind für den Paarvergleich je zwei Teilnehmer aus Europa und den USA sowie neun Teilnehmer aus China aus. Zudem wurden die Datensätze von je zwei Versuchspersonen aus Europa und den USA sowie vier chinesischen Probanden aufgrund des Korrelationskoeffizienten nach Pearson nicht mit in das Ergebnis der kategorialen Bewertung aufgenommen.

Gemäß der Korrelationsanalysen zwischen den intervallskalierten und absoluten Daten der Geräuschqualität ergab sich für die Europäer ein Wert von  $r = 0,92$ , für die Chinesen ein Wert von  $r = 0,95$  und für die Teilnehmer aus den USA ein Koeffizient von  $r = 0,98$ . Somit kann eine hohe Urteilkraft der Probanden und ein übereinstimmendes Verständnis für die akustische Qualität von Türzuschlaggeräuschen angenommen werden. Wie der direkte Vergleich zeigt, korrelieren die Ergebnisse der subjektiven Bewertung der Geräuschqualität bei den Teilnehmern aus den USA am höchsten, die der europäischen Probanden am niedrigsten. Die entsprechenden Darstellungen hierfür befinden sich im Anhang in den Abbildungen A.19 und A.20.

### *Psychoakustischer Ansatz*

Um die Geräuschqualität anhand der Ergebnisse der europäischen Teilnehmer optimal vorhersagen zu können, ergibt sich für den Parameter  $N_5$  ein Gewicht von  $-0,10$  und für  $T_S$  ein Gewicht von  $-0,19$ . Diese Werte sind, ebenso wie die jeweiligen Quotienten der Vorfaktoren  $\frac{N_5}{N_5+T_S} = 0,34$ , ähnlich zur Gewichtung der Parameter des Referenzmodells (siehe Tabelle 4.3). Das Modell zeigt sich erwartungsgemäß als valide und übertragbar, da die Probanden der Referenzstudie ebenfalls zu einem Großteil aus Europa stammten (siehe Kapitel 3.1). Weiterhin stellt Abbildung 4.8 einen Vergleich der prognostizierten Geräuschqualität dar, wobei die Ergebnisse des Referenzmodells links und die Daten des Modells mit einer optimalen Gewichtung der Parameter für europäische Probanden rechts dargestellt sind. Es ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von  $r = 0,93$  für das Referenzmodell und von  $r = 0,94$  für das Modell der Teilnehmer aus Europa. Diese Werte zeigen die übereinstimmende Berechnung der Geräuschqualität, die nur bei den Signalen  $T_{C3}$  und  $T_{C6}$  leicht differiert.

Aus der Studie mit chinesischen Probanden resultiert, dass die akustische Qualität von Türzuschlaggeräuschen am besten vorhergesagt werden, wenn die Perzentillautheit  $N_5$  mit  $-0,07$  und die Dauer der Schärfe  $T_S$  mit  $-0,22$  gewichtet werden. Die Bedeutung der Lautheit nimmt in der auditiven Empfindung der Chinesen gegenüber dem Referenzmodell ab, wohingegen die Dauer der Schärfe ein ähnliches Niveau beibehält. Entsprechend dieser Gewichtung führt die Korrelationsanalyse der subjektiven und objektiven Daten zu einem Wert von  $r = 0,96$  (siehe Abbildung 4.9 rechts). Das Referenzmodell sagt die Geräuschqualität mit einem Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,94$  vorher. Obwohl beide Modelle zu einer hohen Korrelation führen, variieren die berechneten Werte der Signale  $T_{C3} - T_{C6}$  deutlich. Dieser Effekt basiert auf der unterschiedlichen Gewichtung der Perzentillautheit, da beispielsweise die Werte der Geräusche  $T_{C4}$  und  $T_{C5}$  für  $N_5$  um etwa 23 % voneinander abweichen.

Tabelle 4.3: Interkulturelle Bewertung der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen. Gewichtung der Perzentillautheit  $N_5$  und der Dauer der Schärfe  $T_S$  bei einem Grenzwert von 1 *acum* in einem linearen Parametermodell zur objektiven Prognose der Geräuschqualität. Dargestellt sind die Gewichtungen der Parameter des Referenzmodells nach Gleichung (3.14), die entsprechenden Parametermodelle der Europäer, der Chinesen und der Teilnehmer aus den USA sowie der Quotient der Gewichtungen  $\frac{N_5}{N_5+T_S}$ .

Teilnehmer entsprechend der Kultur				
Parameter	Referenz	Europa	China	USA
Perzentillautheit $N_5$	-0,11	-0,10	-0,07	-0,05
Dauer der Schärfe $T_S$	-0,21	-0,19	-0,22	-0,24
Gew.- Quotient $\frac{N_5}{N_5+T_S}$	0,34	0,34	0,24	0,17

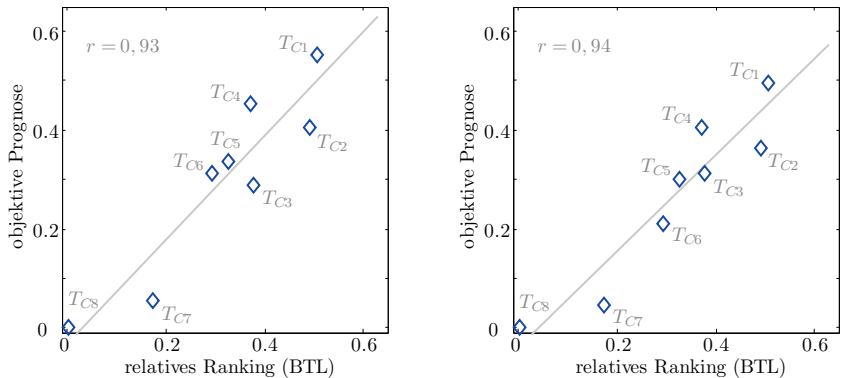


Abbildung 4.8: Untersuchung der objektiven Prognose der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen mit europäischen Probanden. Korrelationsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs. Links: Psychoakustisches Referenzmodell gemäß Gleichung (3.14) nach Kapitel 3.4.1. Rechts: Psychoakustisches Modell auf Basis einer optimalen Gewichtung der Parameter nach Tabelle 4.3.

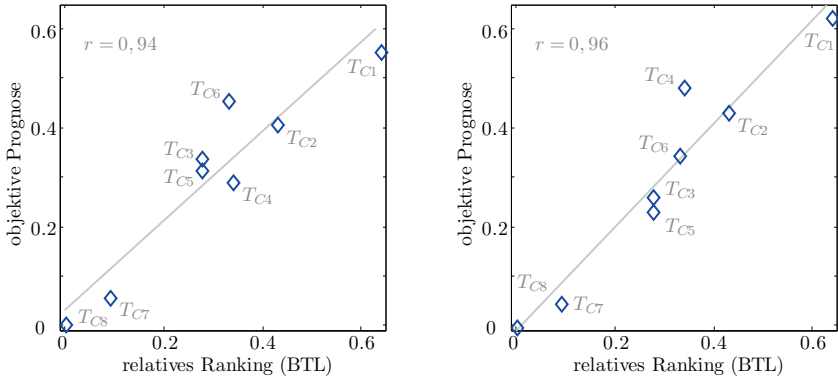


Abbildung 4.9: Untersuchung der objektiven Prognose der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen mit chinesischen Probanden. Korrelationsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs. Links: Psychoakustisches Referenzmodell gemäß Gleichung (3.14) nach Kapitel 3.4.1. Rechts: Psychoakustisches Modell auf Basis einer optimalen Gewichtung der Parameter nach Tabelle 4.3.

Soll die subjektive Bewertung der Geräuschqualität für Teilnehmer aus den USA optimal beschrieben werden, muss die Perzentillautheit mit  $-0,05$  und die Dauer der Schärfe mit  $-0,24$  gewichtet werden (siehe Tabelle 4.3). Im Vergleich zu den Modellen auf Basis der europäischen und chinesischen Wahrnehmung fällt der Einfluss der Lautheit weiter ab, wohingegen die Bedeutung der Dauer der Schärfe zunimmt. Dieser Aspekt wird durch den Vergleich der Quotienten der Gewichtungen  $\frac{N_5}{N_5+T_S}$  mit Werten von  $0,34$  für Europa,  $0,24$  für China und  $0,17$  für das spezifische Modell der USA verdeutlicht. Damit scheinen die Versuchspersonen aus den USA beim Geräusch des Türzuschlags sehr sensibel auf qualitätsmindernde Effekte wie ein tonales Nachklingen oder ein hochfrequentes Schwirren zu reagieren. Für eine hohe Qualität ist somit der satte Klang einer Tür wichtiger als dessen wahrgenommene Lautstärke. Im Folgenden wird deshalb die Vorhersagekraft der Geräuschqualität anhand des Referenzmodells bewertet und mit der Prognose des spezifischen Modells verglichen. Dabei korreliert die subjektive Bewertung der Teilnehmer aus den USA zu  $r = 0,91$  mit den Daten des psychoakustischen Referenzmodells. Die optimal gewichteten Parameter führen zu einem Koeffizienten von  $r = 0,95$  (siehe Abbildung 4.10). Aufgrund der unterschiedlichen Gewichtung der beiden Parameter  $N_5$  und  $T_S$  weist das Referenzmodell für die USA die geringste Korrelation im Vergleich der drei Kulturen auf. Beim optimierten Modell liegt eine niedrige Gewichtung der Lautheit gegenüber der Dauer der Schärfe (etwa  $\frac{1}{5}$ ) vor. Deshalb verringert sich der direkte Einfluss der bezüglich der Lautheit stärker variierenden Geräusche  $T_{C3} - T_{C6}$ , wenn die Qualität objektiv beschrieben werden soll.

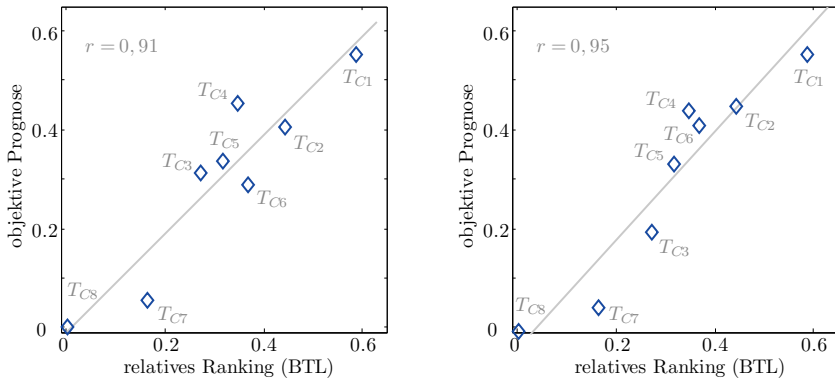


Abbildung 4.10: Untersuchung der objektiven Prognose der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen mit Probanden aus den USA. Korrelationsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs. Links: Psychoakustisches Referenzmodell gemäß Gleichung (3.14) nach Kapitel 3.4.1. Rechts: Psychoakustisches Modell auf Basis einer optimalen Gewichtung der Parameter nach Tabelle 4.3.

### Geräusch des Blinkerhebels

Aufgrund der Ergebnisse des  $\chi^2$ -Tests mussten zwei Teilnehmer aus Europa und drei aus den USA beim Paarvergleich ausgeschlossen werden. Im Vergleich zum Türzuschlag zeigte sich, dass nur eine chinesische Person (beim Türzuschlag waren es neun) ein inkonsistentes Verhalten aufwies. Weiterhin zeigte die Analyse der Test- und Retest-Urteile der kategorialen Bewertung bei zwei europäischen, vier chinesischen und drei Probanden aus den USA eine zu geringe Übereinstimmung.

Werden die jeweiligen Rangfolgen der relativ und absolut bewerteten Geräusche von Blinkerhebeln mittels Korrelationsanalysen verglichen, weisen die Ergebnisse der Europäer den höchsten Koeffizienten von  $r = 0,98$  auf. Weiterhin ergeben sich Werte von  $r = 0,91$  und  $r = 0,92$  für die Teilnehmer aus der Volksrepublik China und den USA (siehe Abbildung A.21 und A.22 im Anhang). Es zeigt sich, dass die Geräuschqualität vom Rückschnappen des Blinkerhebels über alle Kulturen hinweg sowohl absolut als auch relativ annähernd identisch bewertet wird.

### Psychoakustischer Ansatz

Analog zum methodischen Vorgehen beim Geräusch des Türzuschlags wird auch für das Rückschnappen des Blinkerhebels das psychoakustische Modell nach Gleichung (4.1) genutzt. Dieses Modell setzt sich aus den Parametern der Perzentillautheit und der Dauer der Schärfe zusammen und hat sich als valide und reliabel für die objektive Abbildung der akustischen Qualität beim Hebelrückschnappen gezeigt. Hierbei wurde

Tabelle 4.4: Interkulturelle Bewertung der Geräuschqualität vom Rückschnappen der Blinkerhebel. Gewichtung der Perzentillautheit  $N_5$  und der Dauer der Schärfe  $T_S$  bei einem Grenzwert von 1 *acum* in einem linearen Parametermodell zur objektiven Prognose der Geräuschqualität. Dargestellt sind die Gewichtungen der Parameter des Referenzmodells nach Gleichung (4.1), die entsprechenden Parametermodelle der Europäer, der Chinesen und der Teilnehmer aus den USA sowie der Quotient der Gewichtungen  $\frac{N_5}{N_5+T_S}$ .

Parameter	Teilnehmer entsprechend der Kultur				
	Referenz	Europa	China	USA	
Perzentillautheit $N_5$	-0,21	-0,21	-0,18	-0,18	
Dauer der Schärfe $T_S$	-0,06	-0,09	-0,13	-0,10	
Gew.- Quotient $\frac{N_5}{N_5+T_S}$	0,78	0,70	0,58	0,64	

$N_5$  mit einem Wert von  $-0,21$  und  $T_S$  mit einem Wert von  $-0,06$  gewichtet. Damit ergibt sich ein hoher Wert von  $\frac{N_5}{T_S} = 3,50$  für den Quotienten der Gewichtungen der Perzentillautheit und der Dauer der Schärfe. Im Folgenden wird die Geräuschqualität durch Probanden aus Europa, China und den USA bewertet und anschließend objektiv beschrieben. Hierfür findet ein Vergleich zwischen dem Referenzmodell und einem kulturspezifischen Modell statt, bei dem die Parameter der Perzentillautheit  $N_5$  und der Dauer der Schärfe  $T_S$  jeweils optimal gewichtet sind. Tabelle 4.4 gibt die ermittelten Werte wider.

In Abbildung 4.11 ist die Korrelationsanalyse zwischen der subjektiv von Europäern bewerteten und der objektiv berechneten Geräuschqualität für das Referenzmodell (links) und das Modell auf der Basis optimal gewichteter Parameter (rechts) dargestellt. Die Korrelationskoeffizienten beider Modelle erreichen einen Wert von  $r = 0,92$ , wobei die Gewichtung der Dauer der Schärfe beim spezifischen Modell zu einem Drittel höher liegt. Dies führt zu einem Wert von  $\frac{N_5}{N_5+T_S} = 0,70$  für den Quotienten der Gewichtungen der Perzentillautheit und der Parameter des Modells. Da das Referenzmodell mit  $\frac{N_5}{N_5+T_S} = 0,78$  vorwiegend auf den subjektiven Urteilen von europäischen Probanden basiert, wird dessen Güte und Vorhersagekraft gegenüber unabhängigen Daten der Geräuschqualität nochmals verdeutlicht. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass europäische Probanden zu einer übereinstimmenden Bewertung der akustischen Qualität von Blinkerhebeln kommen.

Das psychoakustische Modell, welches anhand dem Qualitätsempfinden von chinesischen Probanden optimiert wurde, führt zu einer Gewichtung von  $-0,18$  für die Perzentillautheit und von  $-0,13$  für die Dauer der Schärfe ( $\frac{N_5}{N_5+T_S} = 0,58$ ). Im Vergleich zum Referenzmodell wird  $N_5$  um  $\frac{1}{7}$  geringer und  $T_S$  um mehr als das Doppelte gewichtet. Diese Unterschiede werden auch von den Korrelationsanalysen der beiden Modelle zur Prognose der wahrgenommenen Geräuschqualität widerspiegelt (siehe Abbildung 4.12). Während das spezifische Modell einen Wert von  $r = 0,94$  erreicht, korreliert das

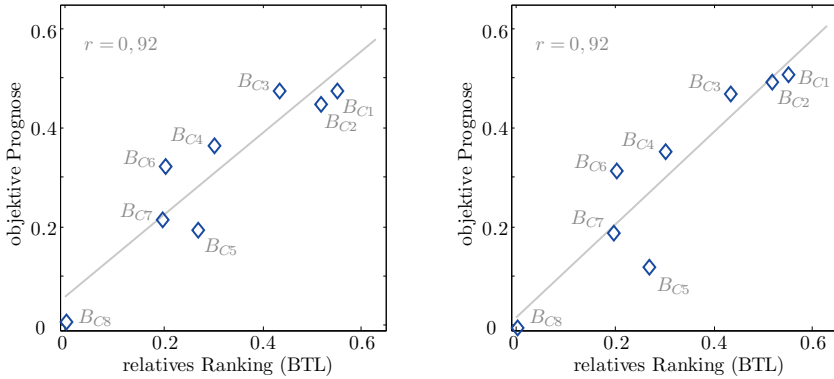


Abbildung 4.11: Untersuchung der objektiven Prognose der Geräuschqualität von Blinkerhebeln mit europäischen Probanden. Korrelationsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs. Links: Psychoakustisches Referenzmodell gemäß Gleichung (4.1) nach Kapitel 4.1.2. Rechts: Psychoakustisches Modell auf Basis einer optimalen Gewichtung der Parameter nach Tabelle 4.4.

Referenzmodell mit  $r = 0,89$ . Vor allem die Geräuschqualität der Signale  $B_{C4}$  und  $B_{C7}$ , die sich primär hinsichtlich der Lautheit (27 %) und weniger bei der Dauer der Schärfe (6 %) unterscheiden, kann durch das spezifische Modell besser abgebildet werden. Damit liegt der Fokus der chinesischen Erwartungshaltung verstärkt auf klanglichen und dynamischen Aspekten, repräsentiert durch ein möglichst geringes Nachschwingen und einen eher dumpfen, tieffrequenten Klang (siehe Kapitel 4.1.1).

Die durch die Teilnehmer aus den USA bewertete Geräuschqualität kann anhand des spezifischen Modells mit einem Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,95$  nach Abbildung 4.13 (rechts) beschrieben werden. Zugrunde liegt eine Gewichtung von  $-0,18$  für die Perzentillautheit und von  $-0,10$  für die Dauer der Schärfe. Dabei stimmt der Wert für  $N_5$  mit dem des chinesischen Modells überein, wohingegen der Wert für  $T_5$  in etwa der Gewichtung des spezifischen Modells der Europäer ( $-0,09$ ) entspricht. Im direkten Vergleich korrelieren die objektiven Daten des Referenzmodells mit der subjektiven Rangfolge der Geräuschqualität zu  $r = 0,92$  (siehe Abbildung 4.13 links). Damit liegt der Korrelationskoeffizient auf demselben Niveau, den das Referenzmodell auch für die Vorhersage der akustischen Qualität bei den europäischen Teilnehmern erreicht. Weiterhin führt die berechnete Geräuschqualität zwischen dem Referenzmodell und dem spezifischen Modell der USA bei den Signalen  $B_{C4}$  und  $B_{C7}$  zu stärker abweichenden Werten. Allerdings fallen die Unterschiede im Vergleich zur chinesischen Studie (Abbildung 4.12) geringer aus, da der Einfluss der Dauer der Schärfe weniger stark ausgeprägt ist.



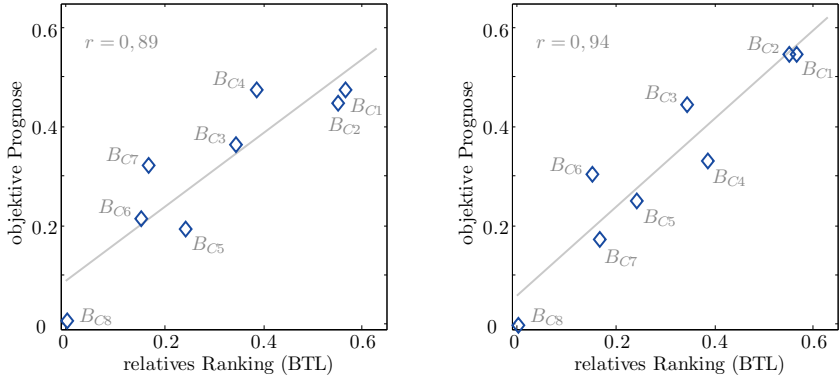


Abbildung 4.12: Untersuchung der objektiven Prognose der Geräuschqualität von Blinkerhebeln mit chinesischen Probanden. Korrelationsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs. Links: Psychoakustisches Referenzmodell gemäß Gleichung (4.1) nach Kapitel 4.1.2. Rechts: Psychoakustisches Modell auf Basis einer optimalen Gewichtung der Parameter nach Tabelle 4.4.

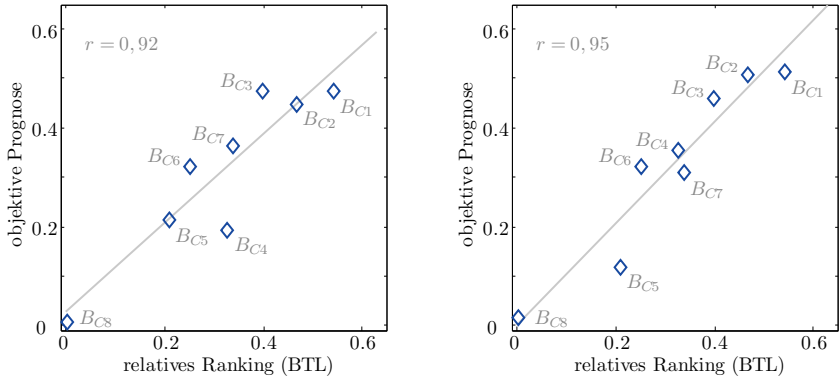


Abbildung 4.13: Untersuchung der objektiven Prognose der Geräuschqualität von Blinkerhebeln mit Probanden aus den USA. Korrelationsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs. Links: Psychoakustisches Referenzmodell gemäß Gleichung (4.1) nach Kapitel 4.1.2. Rechts: Psychoakustisches Modell auf Basis einer optimalen Gewichtung der Parameter nach Tabelle 4.4.

### Zusammenfassende Bewertung

Die akustische Qualität von Geräuschen des Türzuschlags und des Rückschnappens des Blinkerhebels wurde von Teilnehmern aus Europa, China und den USA subjektiv klassifiziert. Kulturübergreifend zeigt sich eine signifikante Korrelation zwischen den Ergebnissen der relativen und absoluten Bewertung. Damit stellen die intervallskalierten Daten eine verlässliche und nachvollziehbare Grundlage der objektiven Prognosen dar. Weiterhin veranschaulichen die Urteile der drei Probandengruppen ein hohes Verständnis gegenüber der Qualität von Fahrzeuggeräuschen. Das Ziel der Experimente, die Validität und Übertragbarkeit der Referenzmodelle im Hinblick auf eine kulturübergreifende Abbildung des akustischen Qualitätsempfindens zu belegen, wurde erreicht. Dazu wurden die Prognosen der Referenzmodelle mit den Vorhersagen von spezifischen Modellen, die auf einer optimalen Gewichtung der Parameter  $N_5$  und  $T_S$  für die jeweilige Kultur basieren, verglichen.

Im Allgemeinen nimmt die Bedeutung der Lautheit für das interkulturelle Qualitätsempfinden des Geräusches des Türzuschlags und des Blinkerhebels im Vergleich zum Referenzmodell ab, wohingegen der Einfluss der Dauer der Schärfe tendenziell zunimmt. Dieser Effekt ist unabhängig davon, ob die Gewichtung des jeweiligen Parameters einen hohen oder niedrigen Wert beim Referenzmodell aufweist. Zusammenfassend veranschaulichen die Korrelationskoeffizienten für alle Kulturen, dass die Geräuschqualität bereits mithilfe des Referenzmodells gut beschrieben werden kann. Damit wird die Übertragbarkeit und Validität des Modells zur objektiven Abbildung der interkulturellen Wahrnehmung von Geräuschqualität angenommen. Weiterhin zeigen die jeweils für eine Kultur optimierten Modelle eine noch bessere Prognose der Geräuschqualität gegenüber dem Referenzmodell.

# Kapitel 5

## Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Das qualitative Gesamtbild eines Automobils hängt maßgeblich von den individuellen Ansprüchen an die Produktqualität ab. Um die kundenspezifische Erwartungshaltung zu erfüllen oder gar zu übertreffen, stellen vor allem die erlebbaren und informativen Eigenschaften des Fahrzeuges wesentliche Aspekte dar. Zu ihnen zählen auch die akustischen Merkmale von impulshaften Funktionsgeräuschen. Diese Geräusche folgen auf eine aktive Handlung des Kunden [204] und haben somit eine besondere Bedeutung bei der auditorischen Wahrnehmung. Zudem weisen sie einen steilen Gradienten des Schalldrucks auf, weshalb das menschliche Gehör sehr empfindlich auf derartige Signale reagiert [210]. Aufgrund der genannten Kriterien ist für die Automobilhersteller ein umfassendes und tiefgreifendes Verständnis der wahrnehmbaren Geräuschqualität von hoher Bedeutung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, mit der das auditive Qualitätsempfinden von impulshaften Fahrzeuggeräuschen reproduzierbar und objektiv abgebildet werden kann. Die vorangegangenen Kapitel beschreiben spezifische Experimente auf der Basis semantischer und psychoakustischer Untersuchungen und stellen deren Ergebnisse detailliert dar. Im Folgenden werden die gewonnenen Erkenntnisse diskutiert und Rückschlüsse aufgezeigt, um das künftige Sounddesign von impulshaften Geräuschen zu verbessern.

Zum qualitativen Gesamtbild des Fahrzeugs tragen sowohl ästhetische als auch emotionale Signalmerkmale bei [107]. Eine hohe Kundenzufriedenheit verlangt allerdings, dass diese wahrnehmbaren Kriterien mit der individuellen Erwartungshaltung an das Gesamtprodukt übereinstimmen [17], [92]. Zu Beginn der Versuchsreihe wurde deshalb der mehrdimensionale Wahrnehmungsraum von singular impulshaften Fahrzeuggeräuschen reduziert. Dabei bildeten vier Faktoren die bevorzugte Empfindung des Kunden ab. Die Varianzanteile zeigten, dass der Faktor *Wertigkeit* die qualitative Erwartung gegenüber dem Geräusch des Türgriffschnappens maßgeblich beschreibt. Es folgten die Dimensionen *Intensität*, *Dynamik* und *Klangfarbe*. Die empfundene Qualität stellt folglich eine komplexe Messgröße dar, die nicht durch eine einzelne Einflussgröße greifbar wird [3], [96], [210]. Auf die Dimensionen *Intensität* und *Dynamik* laden vor allem Adjektive, die einen Bezug zur Lautstärke und zur Frequenzcharakteristik der Signale aufweisen. Deshalb lag in dieser Arbeit der Fokus auf den psychoakustischen Parametern der Lautheit und der Schärfe, um die Geräuschqualität vorherzusagen [95].

Im ersten Schritt eines Experiments wurde jeweils das Antwortverhalten der Teilnehmer untersucht. Hierfür fanden Hörversuche der relativen und absoluten Klassifizierung nach den Methoden des paarweisen Vergleichs und der kategorialen Bewertung statt. Im Allgemeinen führte eine Gegenüberstellung dieser unabhängigen, experimentellen Paradigmen zu einem hohen Korrelationskoeffizienten. Ein identisches Resultat zeigte sich auch kulturübergreifend für Teilnehmer aus Europa, der Volksrepublik China und den USA. Somit werden die erhobenen Daten als Nachweis für eine reproduzierbare und belastbare Referenz der Geräuschqualität von Fahrzeuggeräuschen interpretiert. Der Mehrwert eines solch quantitativen Vergleichs wird allerdings in der Fachliteratur noch kontrovers diskutiert [70], [113], [169]. Gleichwohl kann das jeweilige Skalenniveau beider Datensätze dazu verwendet werden, um die Güte der Parameter und der Parametermodelle für die Vorhersage des auditiven Qualitätsempfindens zu überprüfen. Die Korrelationsanalysen der Objektivierung basieren auf den transformierten, intervallskalierten Daten des Paarvergleichs. Dennoch wird anhand der ordinalskalierten Ergebnisse der kategorialen Bewertung eine ähnlich gute Korrelation erreicht.

Anhand der durchgeführten Studien zum Qualitätsempfinden von Verriegelungsgeräuschen wurde ein signifikantes Modell auf der Basis physikalischer Parameter entwickelt. Als ausschlaggebend gelten die hochfrequenten Lautstärkewerte  $L_{hfT}$ , wobei die tieffrequenten Anteile  $L_{tfT}$  und die Dauer des Signals  $t_{min}$  um etwa  $\frac{2}{3}$  geringer, aber positiv gewichtet werden (siehe Gleichung (3.9)). Bodden und Heinrichs [23] sowie Zwicker und Fastl [210] diskutierten ein entsprechendes Phänomen, indem sie höhere Frequenzanteile gegenüber tieferen als lästiger beschreiben. Gemäß Altinsoy [2] gelten Signale als wertiger, die sich vorrangig aus tieffrequenten und nicht aus hochfrequenten Anteilen zusammensetzen. Der psychoakustische Objektivierungsansatz führt zu einer linearen Kombination der Perzentillautheit  $N_5$  mit den im Rahmen dieser Arbeit neuartig betrachteten Parametern der Dauer der Schärfe  $T_S$  und der maximalen Steigung der Lautheit  $N_m^*$  (siehe Gleichung (3.10)) [93], [94], [95]. Wie die Untersuchungen an technisch und synthetisch veränderten Geräuschen ergeben haben, wird ein flacherer Anstieg der Lautheit als hochwertiger empfunden. Für impulshafte Geräusche von 100 – 200 ms beschreiben vorangegangene Studien einen Effekt, wonach sich die Lautheit mit kürzerer Dauer des Signals progressiv verringert [53], [58], [85]. Bei länger andauernden Signalen wie Verriegelungsgeräuschen (bis zu 500 ms) würde ein flacherer Anstieg des Pegels zu einer im Vergleich geringeren Lautheit führen. Hierzu zeigen Sottke et al. [173], [175], dass der Eindruck der Impulshaltigkeit bei kleineren Flankensteigungen und ab einer bestimmten Impulsbreite abnimmt. Im Allgemeinen nimmt die Wertigkeit mit einer verringerten Lautheit zu [11], [89], [94], [122]. Durch die Dauer der Schärfe werden wertigkeitsmindernde Signalanteile erfasst, die auf das Nachklingen von unerwünschten, hochfrequenten Impulsen zurückzuführen sind. Altinsoy et al. [1], [2] zeigen für impulshafte Klopfgeräusche, dass die Lautheit, die Schärfe und insbesondere das Nachklingverhalten einen wesentlichen Einfluss auf die wahrgenommene Geräuschqualität aufweisen.

Insgesamt werden die qualitativ relevanten Geräuschaspekte und das auditive Qualitätsempfinden mithilfe der psychoakustischen Größen präziser und treffender abgebildet als mit den physikalischen Parametern [60], [94], [96]. Dieser Aspekt wird durch die

durchgeführten Untersuchungen zum Geräusch des Türzuschlags unabhängig bestätigt. Die von den reduzierten Wahrnehmungsdimensionen abgeleiteten Parameter sind auf ein weiteres, singulär impulshaftes Geräusch übertragbar. Sie führen zu signifikanten Ergebnissen bei der Vorhersage der Geräuschqualität. Das physikalische Modell basiert erneut auf den tieffrequenten  $L_{tfT}$  und hochfrequenten Lautstärkewerten  $L_{hfT}$  sowie der Dauer des Signals  $t_{min}$ . Im psychoakustischen Modell werden allein die Parameter der Perzentillautheit  $N_5$  und der Dauer der Schärfe  $T_S$  genutzt. Für die objektive Prognose der Geräuschqualität von Verriegelungs- und von Türzuschlaggeräuschen veranschaulichen die durchgeführten Experimente drei wesentliche Aspekte. Übereinstimmend mit bereits publizierten Ergebnissen führt eine lineare Kombination von mehreren Parametern zu einer höheren Vorhersagekraft der Geräuschqualität verglichen mit nur einem Parameter [94], [95]. Miteinbezogen werden hierbei der mehrdimensionale Wahrnehmungsraum und die kognitive Verarbeitung von impulshaften Geräuschen. Zweitens unterscheidet sich der relative Einfluss der jeweiligen Parameter auf die wahrgenommene Geräuschqualität für beide Signaltypen (siehe Abbildungen 3.7 und 3.14). Abschließend führen die Korrelationsanalysen zwischen dem Qualitätsempfinden und den objektiven Daten der psychoakustischen Modelle eher zu höheren Werten verglichen mit physikalischen Parametermodellen. Dieses Ergebnis stimmt mit den Erkenntnissen weiterer Publikationen überein [74], [89], [110], [201].

Wie vorangegangene Studien zeigen, korrelieren die lautheitsbasierten Parameter hoch mit der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen [20], [67], [68], [148]. Die hierzu durchgeführten Untersuchungen veranschaulichen ebenfalls eine hohe Korrelation der Parameter der maximalen Lautheit und der Perzentillautheit  $N_5$  mit dem subjektiven Qualitätsurteil zu Verriegelungs- und Türzuschlaggeräuschen. Die Analyse der Schärfe weist ein davon abweichendes Ergebnis auf. Einerseits kann gezeigt werden, dass das Maximum der Schärfe nur schwach mit dem Qualitätsempfinden beider Signaltypen korreliert. Andererseits führen die berechneten Daten der Dauer der Schärfe  $T_S$  zu einer hohen Korrelation [94], [95]. Für das Geräusch des Türzuschlags korreliert die Dauer der Schärfe höher im Vergleich zu den lautheitsbasierten Parametern. Somit scheint die Dauer der Schärfe entscheidend zum Qualitätsempfinden von Türzuschlaggeräuschen beizutragen (siehe Abbildungen 3.16 und 3.17).

Als qualitatives Kriterium für impulshafte Fahrzeuggeräusche beschreiben Genuit [71] und van der Auweraer et al. [9] einen soliden und gemäßigten lauten Klang verbunden mit einem prägnanten Signalende als entscheidend. Anders ausgedrückt würde eine ansteigende Lautheit speziell im hochfrequenten Bereich sowie ein nicht ordnungsgemäß ausklingendes Signal zu einem negativen Qualitätsurteil führen. Beide Aspekte weisen einen Einfluss auf die Dauer der Schärfe auf, da die spezifische Lautheit in der Norm (DIN 45692, [44]) zur Bestimmung der Schärfe verwendet wird. Weiterhin analysierten Parizet et al. [141] den Wahrnehmungsraum von Türzuschlaggeräuschen. Für die Eigenschaften der Klangfarbe haben sie einen Zusammenhang zum zeitlichen Verlauf der Lautheitskurve, nicht aber zum Maximum der Lautheit aufgezeigt. Kuwano und Namba [116] deuteten an, dass die Qualität von der Dauer beeinflusst wird, auch wenn die physikalischen Randbedingungen gleich bleiben. Daher kann der Parameter  $T_S$  als maßgeblicher Deskriptor der Geräuschqualität angesehen werden.

Die dargestellten Ergebnisse scheinen im Konflikt mit vorangegangenen Studien zur Qualität von Türzuschlaggeräuschen zu stehen [20], [67], [68], [148]. Diese haben gezeigt, dass die Lautheit den bedeutendsten Faktor für die Geräuschqualität des Türzuschlags darstellt. Da sich diese Untersuchungen auf Türen von Gebäuden konzentrierten, könnten die Abweichungen durch Unterschiede des Signalursprungs verursacht worden sein. Anders als die Türen von Automobilen weisen die Türen von Gebäuden kaum metallisches Material und zumeist keinen abstrahlenden Hohlraum auf. Vermutlich fehlen diesen Geräuschen die hochfrequenten Signalanteile - verbunden mit einem hohen Dämpfungseffekt der Raumwände. Deshalb war die Schärfe aller betrachteten Geräusche wahrscheinlich zu gering. Dieser Aspekt könnte erklären, warum die Autoren einen Parameter der Schärfedauer, ähnlich dem hier vorgeschlagenen Parameter, nicht für die Bewertung der Geräuschqualität von Türen in Betracht gezogen haben. Der Vergleich zu diesen bereits durchgeführten Studien lässt darauf schließen, dass die Korrelation der Dauer der Schärfe mit der Geräuschqualität von der Art der Signale abhängt. Die Analyse des zeitlichen Verlaufs der Schärfe scheint für Experimente im Bereich von realen Fahrzeuggeräuschen einen signifikanten Einfluss auf das auditive Qualitätsempfinden aufzuweisen, der sogar oberhalb dem der Lautheit liegt [95] (siehe Abbildungen 3.14, 3.15 und 3.16).

Mithilfe der Methode des Semantischen Differentials kann untersucht werden, durch welche Effekte das Qualitätsempfinden beeinflusst wird und welche Signaleigenschaften dafür ausschlaggebend sind. Interessant ist dabei, wie die subjektive Bewertung einzelner Begriffspaare oder Faktoren mit den berechneten Daten von objektiven Parametern zusammenhängt [2], [103], [143]. Im Fokus stehen jene Assoziationen, die den Parameter der Dauer der Schärfe betreffen. Bisherige Studien zeigen, dass allgemein Geräusche [90], [210] und impulshafte Signale [158], [201] mit einer hohen Schärfe als lästig empfunden werden. Die Dauer der Schärfe basiert auf der Frequenzcharakteristik der Geräusche und dem Klang als Funktion der Zeit. Gemäß der hier durchgeführten, semantischen Analysen zählen die Adjektive *hochfrequent*, *metallisch*, *klapprig* und *nachschwingend* zu den auslösenden Begriffen. Mit ihnen wird ein gewisser Anspruch an die Dynamik und die Klangfarbe des Geräusches verbunden. Somit veranschaulichen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, dass objektive Parameter gezielt anhand der reduzierten Dimensionen des Wahrnehmungsraums abgeleitet werden können [95].

Die Übertragbarkeit dieses ganzheitlichen Ansatzes wurde am Geräusch des Rückschnappens des Blinkerhebels gezeigt. Zugrunde lag die entwickelte Methodik beginnend mit der semantischen Analyse bis hin zur Objektivierung der Geräuschqualität. Der Wahrnehmungsraum ließ sich erneut auf vier Faktoren reduzieren. Gemäß der prozentualen Verteilung der Varianz trägt die erste Dimension *Intensität* wesentlich zur allgemeinen Erwartungshaltung an die Geräuschqualität bei. Es schließen die Faktoren *Klangfarbe*, *Wertigkeit* und *Dynamik* an. Analog zum Geräusch des Türzuschlags beinhaltet das psychoakustische Modell zur objektiven Abbildung der Geräuschqualität (siehe Gleichung (4.1)) die Parameter der Perzentillautheit und der Dauer der Schärfe. Entsprechend der höchsten Varianz der Dimension *Intensität* und dem davon abgeleiteten Parameter der Lautheit wird  $N_5$  (-0,21) in Relation zu  $T_S$  (-0,06) höher gewichtet. Die Dauer der Schärfe basiert primär auf dem Faktor *Dynamik*, der die geringste prozentuale

Varianz aufweist. Somit liegt ein direkter Zusammenhang zwischen der Gewichtung der abgeleiteten Parameter und der Varianzverteilung der reduzierten Dimensionen vor [95]. Übereinstimmend mit vorangegangenen Studien zeigt sich erneut der scheinbar maßgebliche Einfluss der psychoakustischen Parameter der Perzentillautheit und der Dauer der Schärfe bei der objektiven Abbildung des Qualitätsempfindens von Fahrzeuggeräuschen [103], [141], [143]. Weiterhin verdeutlichen die Experimente an Geräuschen der Warnblinkanlage, dass die beiden Parameter zur Prognose der Geräuschqualität auf mehrfach impulsive Signale übertragen werden können. Unabhängig davon wurde das deskriptive Potential des Parameters der Dauer der Schärfe an periodischen, synthetischen Motorsignalen nachgewiesen. Duvigneau et al. [48], [49] und Liefold et al. [123] entwickelten einen ganzheitlichen Ansatz, der die auditive Wertigkeit von numerisch berechneten, periodischen Verbrennungsgeräuschen abbilden kann. Dabei trägt die Dauer der Schärfe als Teil einer kombinierten Metrik mit zur Vorhersage des Qualitätsempfindens bei.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden objektive Parametermodelle für die wahrgenommene Qualität der Geräusche des Türzuschlags, des Blinkerhebels und der Warnblinkanlage entwickelt. Zwei wesentliche Effekte liegen diesen Signaltypen zugrunde. Einerseits kann die Geräuschqualität jeweils anhand der linearen Kombination der beiden Parameter  $N_5$  und  $T_S$  vorhergesagt werden. Andererseits unterscheidet sich die relative Gewichtung der Parameter abhängig vom Geräusch. Da sowohl die Lautheit (95 %-Perzentil) als auch die Dauer der Schärfe (1 *acum*) bei einem definierten Grenzwert berechnet werden, muss die Vorhersagekraft mittels verschiedener Grenzwerte überprüft werden. Grundsätzlich korrelieren die Werte der Perzentillautheit  $N_5$  am höchsten mit dem subjektiven Qualitätsempfinden [94], [95]. Für die Geräusche des Türzuschlags und der Warnblinkanlage liegt ein flacher, eher progressiver Anstieg der Korrelationswerte von  $N_1$  bis  $N_5$  vor. Im selben Perzentilbereich nimmt die Vorhersagekraft bei den Blinkerhebeln annähernd linear und etwas steiler zu. Infolge der weiteren Abstufung von  $N_7$  und  $N_{10}$  zeigen die Geräusche des Türzuschlags und der Warnblinkanlage abfallende Korrelationswerte. Der Gradient entspricht in etwa der jeweiligen Steigung zwischen den Perzentillautheiten  $N_1$  bis  $N_5$ . Dem gegenüber korrelieren die objektiven Daten des Blinkerhebels bei  $N_{10}$  nur noch zu etwa  $r \approx 0,23$ , was einer Verringerung von  $\approx 77\%$  im Vergleich zu  $N_5$  entspricht. Analog hierzu korreliert die Perzentillautheit  $N_5$  für die Verriegelungsgeräusche ebenfalls am höchsten.

Eine explizite Evaluierung des Parameters der Dauer der Schärfe fand anhand von technisch und synthetisch veränderten Geräuschen des Türzuschlags statt. Bei den in Abbildung 3.19 veranschaulichten Ergebnissen kennzeichnet jedes Symbol die Gesamtkorrelation zwischen der Geräuschqualität und der Dauer der Schärfe, aufgetragen als Funktion des Grenzwertes der Schärfe. Die Abbildung beinhaltet die Korrelationskoeffizienten der originalen, technisch veränderten und synthetisch gefilterten Signale. Für die acht mit einem x markierten Geräusche verändert sich die Vorhersagekraft bis zu einem Schärfewert von 1,125 *acum* kaum. Danach schließt ein steiler Abfall der Korrelationskoeffizienten für die höheren Grenzwerte an. Der Kurvenverlauf bei den vollständig gefilterten Signalen ( $\diamond$ ) weist zwei Maxima auf. Diese befinden sich bei 1 *acum* und bei 1,25 *acum*. Für alle anderen Signale liegt das Maximum bei

1 *acum*. Ein derartiger Zusammenhang gilt im Allgemeinen auch für die realen Geräusche des Türzuschlags, der Verriegelungsgeräusche sowie für das Rückschnappen des Blinkerhebels und die mehrfach impulshaften Signale der Warnblinkanlage. Die Vorhersagekraft bei den Verriegelungsgeräuschen nimmt von 0,5 *acum* bis 1 *acum* deutlich und eher degressiv zu. Im Vergleich dazu liegt bei den realen Geräuschen des Türzuschlags ein vorrangig progressiver Anstieg vor. Hier fallen die Korrelationswerte bis zu einer Grenze von 1,25 *acum* stark ab und bleiben bis 1,5 *acum* etwa auf dem gleichen Niveau. Im Gegensatz dazu korrelieren die Werte der Verriegelungsgeräusche mit zunehmenden Schärfewerten ab 1 *acum* bis 1,25 *acum* stetig geringer, der Abfall ist aber sehr flach. Bei den Geräuschen der Blinkerhebel liegt die Vorhersagekraft von 0,5 *acum* bis 1,25 *acum* nur marginal unter dem Maximum bei 1 *acum*. Für die Signale der Warnblinkanlage befinden sich die Korrelationswerte auf einem Niveau im Bereich von 0,5 *acum* bis 1,5 *acum*. Danach fällt die Korrelation deutlicher ab. Interessant ist, dass die Mittelwerte der Schärfe als variable Grenzwerte für die Berechnung der Dauer bei diesem Signaltyp geringfügig besser korrelieren als der Wert bei 1 *acum*. Anhand der übergreifenden Analyse der Dauer der Schärfe wird deutlich, dass der Grenzwert der Schärfe von 1 *acum* die beste Wahl für die Dauer der Schärfe darstellt.

Die Perzentillautheit  $N_5$  und die hier vorgestellte Dauer der Schärfe  $T_S$  tragen wesentlich zur Beschreibung der Qualität von impulshaften Fahrzeuggeräuschen bei. Als Parameter in kombinierten Metriken wurde die Perzentillautheit  $N_5$  bereits erfolgreich für die Prognose der empfundenen Lästigkeit von Zwicker und Fastl [210] angewandt. Ähnliches gilt für die Vorhersage des subjektiven Lästigkeitsmaßes von transienten Geräuschen [79], [201] sowie Störgeräuschen in Fahrgastzellen [158]. In ihren Forschungen untersuchten Widmann [198], [199] und Davies [79], [128] den Einfluss der Schärfe auf die Lästigkeit unterschiedlicher Signaltypen. Der Grad an Lästigkeit und die wahrnehmbare Qualität eines Geräusches korrelieren hoch zueinander, weshalb ein ähnliches Ergebnis für qualitative Messgrößen erwartet wird. Die durchgeführten Experimente zeigen, dass eine hohe Vorhersagekraft der Geräuschqualität durch die psychoakustischen Parameter erreicht werden kann.

Für die Prognose des Qualitätsempfindens von Verriegelungsgeräuschen muss, zusätzlich zu den Parametern  $N_5$  und  $T_S$ , der maximale Anstieg der Lautheit als dritter Parameter hinzugenommen werden. Nur damit können valide und belastbare Ergebnisse mithilfe eines psychoakustischen Modells erreicht werden. Dieser Parameter trägt nach den Experimenten von Duvigneau et al. [48], [49] und Liefold et al. [123] ebenfalls zur Abbildung der Geräuschqualität von numerisch berechneten, periodischen Motorsignalen bei. Eine Messgröße, die vergleichbar mit dem maximalen Anstieg der Lautheit ist, stellt die Lautheits-Zeit-Funktion nach Sottek et al. [175] dar. Sie wird für die Vorhersage der Impulshaftigkeit von Dieselgeräuschen verwendet. Dabei führt ein steilerer Gradient des Impulsanstiegs zu einem impulshafteren Eindruck.

Das Sounddesign von hochwertigen Produkten für den internationalen Markt verlangt eine konsequente Integration interkultureller Wahrnehmungskriterien. Anhand der Geräusche des Türzuschlags und des Rückschnappens des Blinkerhebels wurden auf der Basis der Urteile von Probanden aus Europa, China und den USA zwei wesentliche Faktoren erarbeitet. Einerseits führt ein Vergleich der relativ und absolut bewerteten



Geräuschqualität kulturübergreifend zu hohen Korrelationskoeffizienten. Damit stellen die erhobenen Daten eine reliable und verlässliche Grundlage für die weiterführenden Untersuchungen dar. Zudem wurde gezeigt, dass die untersuchten Nationen ein hohes Urteilsvermögen gegenüber der Geräuschqualität von impulshaften Fahrzeuggeräuschen besitzen. Der zweite Aspekt verdeutlicht die interkulturelle Übertragbarkeit der unabhängig entwickelten Modelle des Türzuschlags (Gleichung (3.14)) und des Blinkerhebels (Gleichung (4.1)) zur Prognose der Geräuschqualität. Beide Modelle basieren auf den psychoakustischen Parametern  $N_5$  und  $T_5$ . Mit diesen Referenzmodellen kann das Qualitätsempfinden von Personen aus Europa, China und den USA objektiv bereits gut vorhergesagt werden. Bei Modellen, die auf den gleichen Parametern basieren, diese aber eine optimale Gewichtung für das auditive Qualitätsempfinden der jeweiligen Kultur aufweisen, wird eine noch höhere Korrelation zur subjektiven Bewertung erreicht. Weiterhin stellt sich der quantitative Einfluss der beiden Parameter als kulturabhängig heraus. So wird die Lautheit bei europäischen Probanden am höchsten gewichtet. In Relation dazu nimmt die Bedeutung der Lautheit für Personen aus China und noch mehr für Teilnehmer aus den USA ab. Gegensätzlich dazu verhält sich die Gewichtung der Dauer der Schärfe. Sie erreicht bei Nichteuropäern einen höheren Wert als bei Europäern. Einen direkten Zusammenhang zwischen der Lautheit und der Gefälligkeit eines Geräusches (*pleasantness*) zeigen Hansen und Weber [90] bei der interkulturellen Untersuchung von tonalen Komponenten in synthetischen Geräuschen. Nach Kuwano et al. [117] tendieren Deutsche im Vergleich zu japanischen Probanden dazu, Geräusche anhand der maximalen Lautstärke zu bewerten. Dieser Effekt stimmt mit der hohen Gewichtung der Lautheit durch die Teilnehmer aus Europa (vorrangig Deutschland) überein. Gemäß der Untersuchungen von Namba et al. [134] finden es Personen aus den USA einfacher, sich an lästige Geräusche in der Nachbarschaft zu gewöhnen. Da die Lästigkeit von Geräuschen durch die Lautheit beeinflusst wird [79], [128], [210], liegt ein entsprechender Einfluss der Lautheit auf die wahrgenommene Geräuschqualität vor [2], [11], [89], [122], [199]. Diese Aussage entspricht den hier gewonnenen Erkenntnissen. Für die Teilnehmer aus den USA weisen die spezifischen Parametermodelle des Türzuschlags und des Blinkerhebels die geringste Gewichtung der Perzentillautheit  $N_5$  im Vergleich zu den weiteren Nationen auf.

Im Hinblick auf den hier entwickelten ganzheitlichen Ansatz zur objektiven Abbildung der Geräuschqualität sei auf einschränkende Kriterien hingewiesen. Nicht alle Aspekte der Lautstärkeempfindung sind in den aktuellen Lautheitsmodellen und den entsprechenden Parametern enthalten. Somit fehlen diese Merkmale auch in den Normen der Lautheit und der Schärfe [41], [44], [210]. Studien zu instationären, singulären Geräuschen zeigen, dass das Maximum der Lautheit und das Maximum der *long-term loudness* nach Glasberg und Moore [80] als sinnvoll für die Prognose der Gesamtlautheit [128] oder der Lästigkeit [79] erachtet werden könnten. Dennoch scheint dieser Ansatz ungeeignet für breitbandige Geräusche zu sein, die sich nichtlinear ausbreiten und deren Wellenform eng aufeinanderfolgende Impulse beinhaltet [183]. Für die hier durchgeführten Experimente wirken Messgrößen zielführender, die auf der instationären Lautheit basieren. Darüber hinaus können einige Effekte des zeitlich-spektralen Lautheitsverlaufs nicht durch die gegenwärtig verfügbaren Lautheitsmodelle nachgebildet werden. Kuwano

et al. [120] haben gezeigt, dass die zeitliche Struktur des Signals keinen signifikanten Einfluss auf die wahrgenommene Lautstärke aufweist. Dieser Aspekt wurde mithilfe von Lautstärkeimpulsen untersucht, die innerhalb des Zeitverlaufs des Signals variieren. Im Gegensatz dazu konnte für den Beginn des Impulses eine Überhöhung der wahrgenommenen Lautstärke festgestellt werden, wohingegen die Lautstärke für den Gleichanteil des Impulses auf einem ähnlichen Niveau verbleibt [135]. Ein derartiger Effekt ist explizit (*DLM* [33]) oder implizit (*TVL* [5]) in den dynamischen Lautheitsmodellen enthalten. Allerdings ist noch unklar, wie realistisch dieser Effekt abgebildet wird [170]. Auch scheint ein bestimmtes zeitlich-spektrales Fenster notwendig, um die nicht-simultane spektrale Lautheitssummation vorhersagen zu können [97]. Weiterführende Studien zeigen einen Einfluss der Signaldauer auf die spektrale Lautheitssummation [6], [191]. Dabei scheint die Lautheitssummation bei kurzen Signalen höhere Werte zu erreichen als bei längeren Signalen. Diese Erkenntnis ist in einer erweiterten Form des *DLM* modelliert [152], wurde aber noch nicht in ein standardisiertes Lautheitsmodell integriert. Wie die Studien veranschaulichen, scheint die Lautheit transienter Geräusche noch nicht vollständig verstanden zu sein. Folglich können lauthheitsbasierte Parameter wohl auch in unterschiedlicher Weise zur Geräuschqualität von transienten Fahrzeuggeräuschen beitragen. Dieser Aspekt wurde im Rahmen dieser Arbeit bedacht.

Die positive Wirkung von hochwertiger Geräuschqualität wird gezielt für das Design von Produkten eingesetzt. Dagegen beeinträchtigt ein andauernder Lärm durch Arbeit und Umwelt das menschliche Hörvermögen [31], [210]. So wirkt sich der von Windturbinen abgestrahlte Lärm nachteilig auf die menschliche Gesundheit aus. Im Vergleich zu anderen Umweltgeräuschen wie Straße, Schiene oder Luftverkehr wird der Lärm von Windturbinen bereits bei niedrigeren Belastungspegeln als lästig empfunden [145], [146]. Studien von Waye und Öhrström [147] zeigten, dass die Lästigkeit dieser Geräusche nicht allein durch einen der klassischen psychoakustischen Parameter beschrieben werden kann. Dieses Resultat stimmt mit den hier gewonnenen Erkenntnissen überein, wonach kombinierte Metriken zu einer höheren Vorhersagekraft verglichen mit einem einzelnen Parameter führen [95]. Ein ähnlicher Aspekt, in dem der Grad der Lärmbelästigung immer wichtiger wird, bezieht sich auf die Attraktivität von innerstädtischen Lebensräumen. Aufgrund der Geräuschvielfalt beschrieben mehrere Studien die physikalischen Parameter als begrenzt geeignet, um den subjektiven Eindruck ordnungsgemäß abzubilden [132], [165]. Weitere Publikationen zum menschlichen Lebensraum zeigten, dass die störenden und lästigen Effekte von Lärm von Zügen durch eine Kombination psychoakustischer Parameter (vorrangig Lautheit und Schärfe) signifikant beschrieben werden können [102], [167]. Der A-bewertete Schalldruckpegel reicht dafür nicht aus. Einen ähnlichen Zusammenhang diskutierten Marshall und Davies [128] für die Abbildung der Lästigkeit von Fluglärm und kommen dabei zu identischen Ergebnissen wie in der vorliegenden Arbeit. Auch hier führten die psychoakustischen Parameter im Vergleich zu den physikalischen zu einer höheren Korrelation gegenüber dem Qualitätsempfinden. Im Allgemeinen scheint eine Kombination der psychoakustischen Parameter der Perzentillautheit  $N_5$  und der Dauer der Schärfe  $T_5$  die Geräuschqualität für ein breites Feld an impulshaften Fahrzeuggeräuschen vorhersagen zu können.

# Kapitel 6

## Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, mit der die wahrnehmbare Qualität von impulshaften Fahrzeuggeräuschen beschrieben werden kann. Es war das Ziel, das auditive Qualitätsempfinden anhand objektiver Parameter vorhersagen zu können. Dazu wurde der subjektive Wahrnehmungsraum auf charakteristische Dimensionen reduziert und davon physikalische sowie psychoakustische Parameter abgeleitet. An verschiedenen Signaltypen wurde die Signifikanz der Parameter und die Übertragbarkeit kombinierter Parametermodelle untersucht. Die entwickelte Methodik wurde anhand zahlreicher Experimente validiert. Abschließend wurde geprüft, inwiefern auch das interkulturelle Qualitätsempfinden von impulshaften Fahrzeuggeräuschen mittels der bestehenden Parametermodelle vorhergesagt werden kann.

### 6.1 Zusammenfassung

Das Sounddesign von Fahrzeugen stellt ein wesentliches Kriterium für die qualitative Wahrnehmung des gesamten Produktes dar. Vor allem impulshafte, singuläre Geräusche werden vom Kunden kaufentscheidend mit der Wertigkeit des Gesamtfahrzeuges verbunden. Dabei setzt sich die empfundene Qualität meist aus unterschiedlichen Dimensionen zusammen, die zwangsweise für die Entwicklung eines hochwertigen Geräusches bekannt sein müssen. Nur dann kann die individuelle Erwartungshaltung an das Gesamtprodukt erfüllt oder übertroffen werden.

In einem ersten Experiment wurde der Wahrnehmungsraum singulär impulshafter Geräusche analysiert und auf vier charakteristische Dimensionen reduziert. Anhand dieser Faktoren wurden gezielt physikalische und psychoakustische Parameter abgeleitet, die mit der Lautstärke und dem Frequenzverhalten der Geräusche in Verbindung stehen. Diese Parameter bildeten die Basis, um das auditive Qualitätsempfinden von Verriegelungsgeräuschen mittels linearer Parametermodelle zu beschreiben. Hierbei erwirkten die physikalischen Ansätze prinzipiell eine aussagekräftige Vorhersage. Für die psychoakustischen Parameter ergab sich allerdings ein Mehrwert, der sich ebenso bei Studien zum Geräusch des Türzuschlags zeigte. Dabei korrelierten die Perzentillautheit  $N_5$  und die Dauer der Schärfe  $T_S$  hoch mit dem Qualitätsempfinden der Verriegelungs- und der Türzuschlaggeräusche. Somit scheinen die beiden Parameter einen wesentlichen Faktor für die objektive Abbildung der Geräuschqualität von derartigen Signalen darzustellen. Diese Annahme wurde mittels weiterer Experimente am Geräusch des Türzuschlags speziell für die Dauer der Schärfe  $T_S$  untersucht und bestätigt.

Im Folgenden wurde das Potential der entwickelten Methode für einen einzelnen Signaltyp, hier das Rückschnappen des Blinkerhebels, weiter untersucht. Auch dafür ließ sich der Wahrnehmungsraum durch vier Dimensionen beschreiben. Weiterhin korrelierten die Perzentillautheit  $N_5$  und die Dauer der Schärfe  $T_S$  erneut am höchsten mit der Geräuschqualität; ebenso für die mehrfach impulshaften Geräusche der Warnblinkanlage. Zusammenfassend kann die wahrgenommene Qualität von impulshaften Fahrzeuggeräuschen mittels der linearen Kombination der Perzentillautheit und der Dauer der Schärfe beschrieben werden. Für jeden Signaltyp ist aber eine explizite Gewichtung der beiden Parameter notwendig. Zudem erreicht die Vorhersagekraft der Geräuschqualität bei den definierten Grenzwerten des 95 %-Perzils für die Lautheit und des Schärfe-wertes von 1 *acum* für die Dauer der Schärfe die höchsten Werte.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen fanden abschließend Experimente zum auditiven Qualitätsempfinden verschiedener Kulturen statt. Die subjektive Bewertung wurde von Personen aus Europa, der Volksrepublik China und den USA durchgeführt. Prinzipiell konnte die Geräuschqualität kulturübergreifend anhand der existierenden Parametermodelle auf der Basis der Perzentillautheit  $N_5$  und der Dauer der Schärfe  $T_S$  gut beschrieben werden. Im Vergleich dazu ermöglichten kulturspezifische Modelle, bei denen die beiden Parameter jeweils optimal gewichtet wurden, eine noch bessere Prognose der Geräuschqualität.

Mithilfe der vorgestellten Methodik kann die wahrgenommene Geräuschqualität von impulshaften Fahrzeuggeräuschen kulturübergreifend beschrieben und prognostiziert werden. Das Sounddesign von Fahrzeugen kann somit zielführend entsprechend der kundenspezifischen Erwartungshaltung definiert und entwickelt werden. Schließlich führt die subjektive Wahrnehmung des gesamten Produktes zur individuellen Empfindung einer hohen Wertigkeit und Qualität.

## 6.2 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das subjektive Qualitätsempfinden anhand objektiver Parameter abgebildet. Die Ableitung der psychoakustischen Parameter erfolgte gezielt anhand der Dimensionen des reduzierten Wahrnehmungsraums. Dieses methodische Vorgehen zeigte ein großes Potential für eine signifikante und valide Prognose der wahrgenommenen Geräuschqualität. Die Arbeit konzentrierte sich zunächst nur auf singulär impulshafte Fahrzeuggeräusche. Mithilfe weiterer Studien an zusätzlichen Geräuschklassen, z.B. an Verbrennungsgeräuschen von Motoren, könnte diese Methode detaillierter untersucht und ein tiefgreifendes Verständnis für die perzeptiven Zusammenhänge erarbeitet werden. Erste Untersuchungen an synthetischen Motorgeräuschen wurden bereits erfolgreich durchgeführt.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit könnten akustische Zielwerte für das Sounddesign von Fahrzeugen abgeleitet und eigene Maßstäbe für einzelne Fahrzeugklassen definiert werden. Diese Maßstäbe würden explizit die Erwartungshaltung der betreffenden Käuferschicht aufgreifen. Um die notwendige Geräuschqualität für das Fahrzeug einer bestimmten Klasse abzubilden, könnten gezielt technische Maßnahmen integriert und deren qualitativer Mehrwert relativ zueinander bewertet werden. Im

Hinblick auf eine abschließende Qualitätssicherung der Fahrzeuge wäre eine systematische Prüfung der Funktionsgeräusche denkbar. So könnte exemplarisch das Geräusch des Türzuschlags mithilfe zyklischer oder sequentieller Analysen anhand eines End-of-Line-Tests untersucht werden. Dabei würde das tatsächliche Geräusch des produzierten Fahrzeugs mit dem entsprechenden akustischen Zielwert verglichen [63]. Zudem könnten länderspezifische Anforderungen an das jeweilige Geräusch überprüft werden. Hierzu beschreibt eine im Rahmen dieser Arbeit eingereichte Patentanmeldung [93] die systematische Prüfung von psychoakustischen Fahrzeugzielen im Anschluss an den Produktionsprozess.

Unabhängig von der Fahrzeugindustrie könnte die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zur allgemeinen Qualitätssicherung von Konsumgütern herangezogen werden. Da die eigentliche Funktion beim Kauf oft nicht direkt erlebbar ist, kann das akustische Klangbild entscheidend zur Zufriedenheit des Kunden beitragen. Dies gilt beispielsweise für das Mahlgeräusch eines Kaffeevollautomaten, den Klang von Golfschlägern [154] oder die Emissionen von Haushaltsgeräten [1], [2]. Ein hochwertiger Klang würde die subjektive Wahrnehmung angenehm beeinflussen. Erste Untersuchungen zum impulshaften Klickgeräusch von Steckverschlüssen bei Rucksäcken zeigten großes Potential, die akustische Wirkung mithilfe der entwickelten Methodik zu optimieren. Unabhängig durchgeführte Experimente bestätigten die positive Wirkung auf das akustische Qualitätsempfinden.

# Anhang A

## Anhang

Tabelle A.1: Kumulierte Ergebnisse der subjektiven Bewertung der Geräuschqualität von Verriegelungsgeräuschen nach der Methode des paarweisen Vergleichs. Dargestellt sind die Daten der 37 konsistent antwortenden Probanden der Bewertung der Verriegelungsgeräusche von Serienfahrzeugen (Gruppe B) nach Kapitel 3.3.1. Je höher die Zahl in der Spalte ist, umso häufiger wurde das Geräusch im direkten Vergleich als hochwertiger bewertet.

	Geräusche							
	$V_{S5}$	$V_{S2}$	$V_{S4}$	$V_{S3}$	$V_{S7}$	$V_{S8}$	$V_{S1}$	$V_{S6}$
$V_{S5}$		25	19	26	14	1	27	18
$V_{S2}$	12		11	19	4	1	27	14
$V_{S4}$	18	26		24	9	1	26	16
$V_{S3}$	11	18	13		7	2	20	10
$V_{S7}$	23	33	28	30		5	35	19
$V_{S8}$	36	36	36	35	32		35	33
$V_{S1}$	10	10	11	17	2	2		4
$V_{S6}$	19	23	21	27	18	4	33	

Tabelle A.2: Distanzmatrix der subjektiven Bewertung der Geräuschqualität von Verriegelungsgeräuschen von Serienfahrzeugen (Gruppe B), berechnet nach dem Ansatz von Bradley, Terry und Luce. Dargestellt sind die Berechnungsergebnisse des natürlichen Logarithmus für den Quotienten eines jeden Paares aus Tabelle A.1. Nachfolgend wird die Spaltensumme (*Sm.*) für jedes der Geräusche berechnet. Um die intervallskalierte Rangfolge (*Rf.*) der Geräusche zu erhalten, werden die Summenwerte durch die Anzahl der Geräusche (hier: acht) geteilt und linear verschoben, sodass das Geräusch mit dem geringsten Wert auf null gesetzt werden kann. Um schließlich die in dieser Arbeit verwendete, normierte Intervallskala (*Is.*) zu erhalten, werden die Werte der Rangfolge durch die Wurzel ihrer Quadratsumme geteilt.

	Geräusche							
	$V_{S5}$	$V_{S2}$	$V_{S4}$	$V_{S3}$	$V_{S7}$	$V_{S8}$	$V_{S1}$	$V_{S6}$
$V_{S5}$		0,73	0,05	0,86	-0,50	-3,58	0,99	-0,05
$V_{S2}$	-0,73		-0,86	0,05	-2,11	-3,58	0,99	-0,50
$V_{S4}$	-0,05	0,86		0,61	-1,13	-3,58	0,86	-0,27
$V_{S3}$	-0,86	-0,05	-0,61		-1,46	-2,86	0,16	-0,99
$V_{S7}$	0,50	2,11	1,13	1,46		-1,86	2,86	0,05
$V_{S8}$	3,58	3,58	3,58	2,86	1,86		2,86	2,11
$V_{S1}$	-0,99	1-0,99	-0,86	-0,16	-2,86	-2,86		-2,11
$V_{S6}$	0,05	0,50	0,27	0,99	-0,05	-2,11	2,11	
<i>Sm.</i>	1,49	6,74	2,71	6,68	-6,26	-20,44	10,84	-1,76
<i>Rf.</i>	2,74	3,40	2,89	3,39	1,77	0	3,91	2,33
<i>Is.</i>	0,35	0,43	0,37	0,43	0,22	0	0,49	0,29

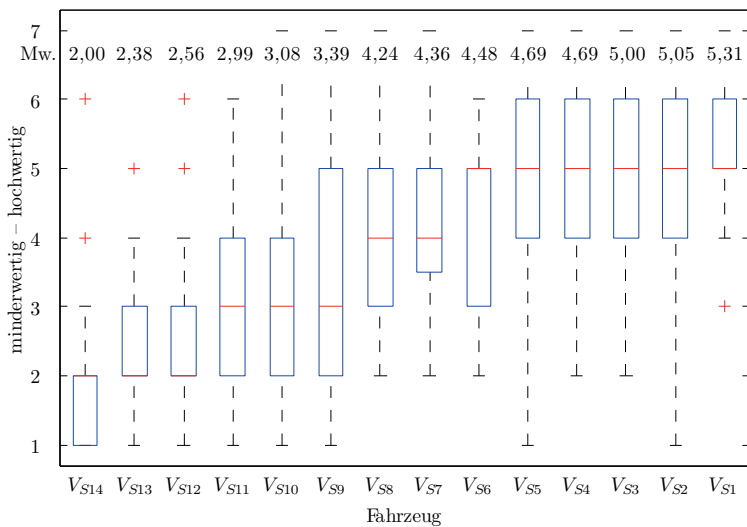


Abbildung A.1: Absolute Bewertung der Verriegelungsgeräusche von Serienfahrzeugen anhand einer siebenstufigen Likertskala nach Kapitel 3.3.1.



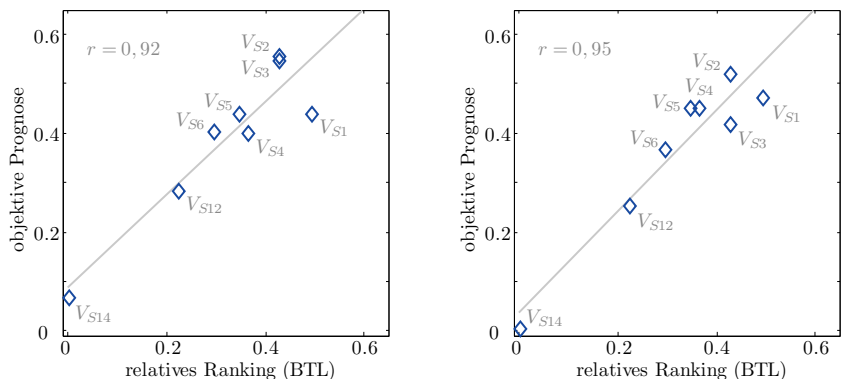


Abbildung A.2: Korrelationsanalyse zur Validierung der objektiven Prognose der Geräuschqualität von Verriegelungsgeräuschen von Serienfahrzeugen nach Kapitel 3.3.1. Korrelationsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs von Gruppe B mithilfe des objektiven Parametermodells von Gruppe A. Links: Physikalisches Modell gemäß Gleichung (3.3). Rechts: Psychoakustisches Modell gemäß Gleichung (3.4)

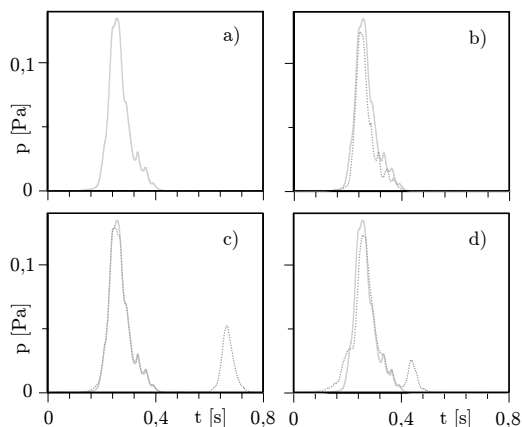


Abbildung A.3: Hüllkurven des Schalldruckpegels für synthetisch veränderte Verriegelungsgeräusche (hellgrau) im Vergleich zum Originalsignal (dunkelgrau) nach Kapitel 3.3.3  
a) Original; b) Abfallzeit länger; c) Abfallzeit kürzer + 2. Impuls; d) variierter 2. Impuls.

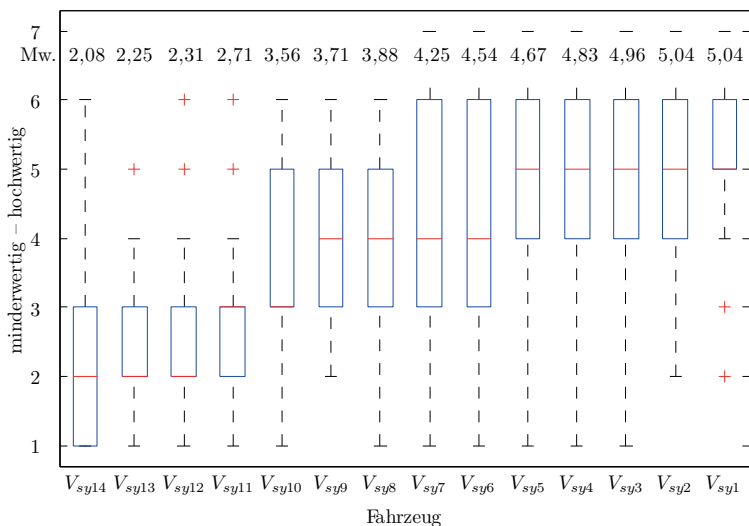


Abbildung A.4: Absolute Bewertung der synthetisch veränderten Verriegelungsgeräusche von Serienfahrzeugen anhand einer siebenstufigen Likertskala nach Kapitel 3.3.3.

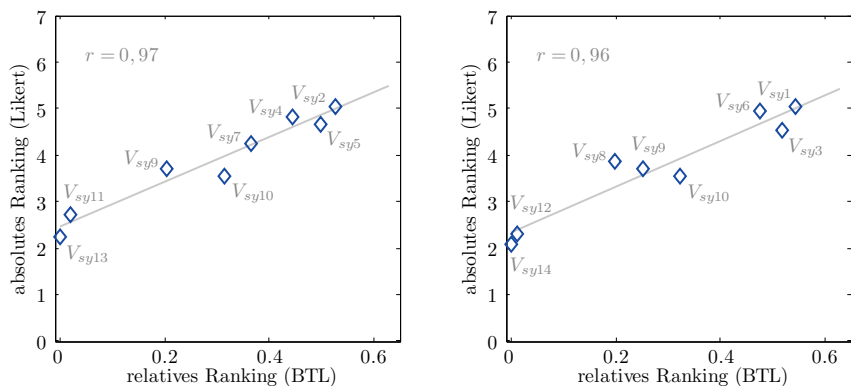


Abbildung A.5: Korrelationsanalyse der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs und des absoluten Rankings anhand einer siebenstufigen Likertskala. Geräuschqualität von synthetisch veränderten Verriegelungsgeräuschen nach Kapitel 3.3.3. Links: Gruppe A. Rechts: Gruppe B

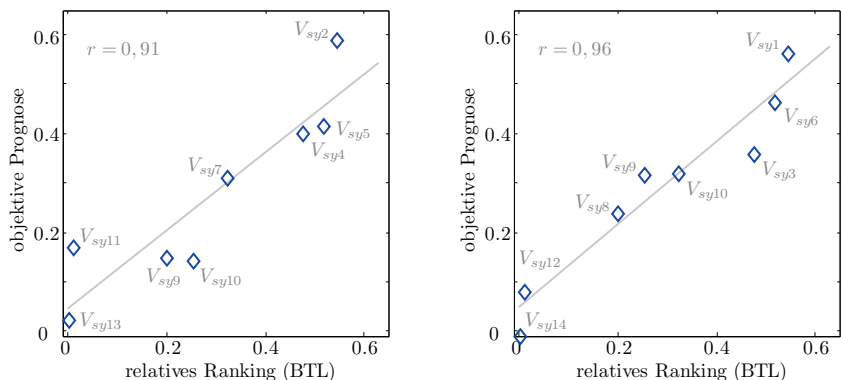


Abbildung A.6: Validierung der objektiven Prognose der Geräuschqualität von synthetisch veränderten Verriegelungsgeräuschen nach Kapitel 3.3.3. Korrelationsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs von Gruppe B mithilfe des objektiven Parametermodells von Gruppe A. Links: Physikalisches Modell gemäß Gleichung (3.7). Rechts: Psychoakustisches Modell gemäß Gleichung (3.8)

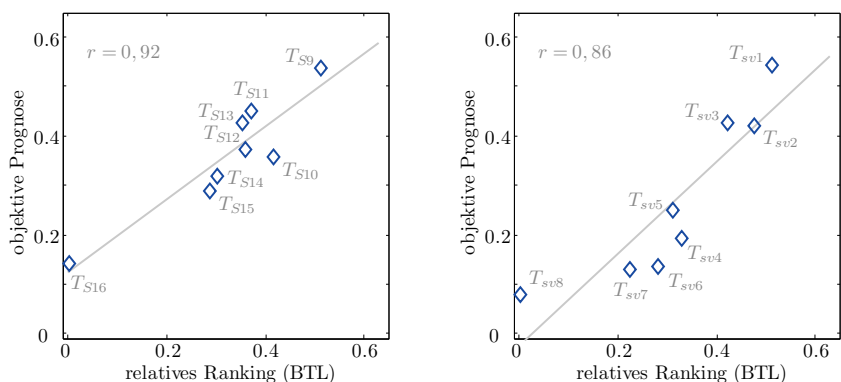


Abbildung A.7: Validierung der objektiven, physikalischen Prognose der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.1. Korrelationsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs von Gruppe B und Gruppe C mithilfe des objektiven, physikalischen Parametermodells von Gruppe A nach Gleichung (3.11). Links: Gruppe B. Rechts: Gruppe C.

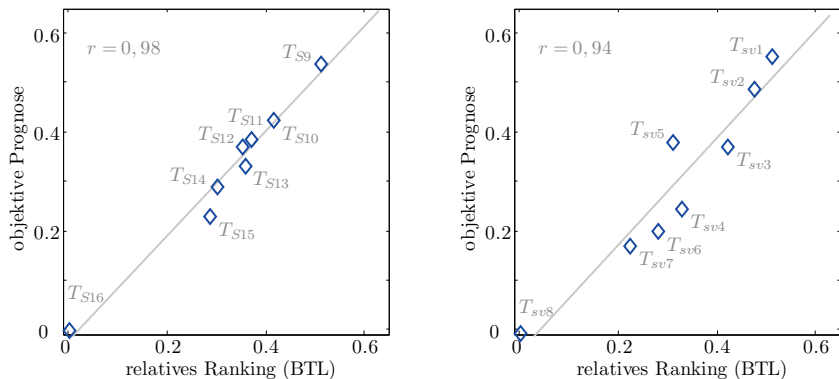


Abbildung A.8: Validierung der objektiven, psychoakustischen Prognose der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.1. Korrelationsanalyse zur Prognose der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs von Gruppe B und Gruppe C mithilfe des objektiven, psychoakustischen Parametermodells von Gruppe A nach Gleichung (3.12)). Links: Gruppe B. Rechts: Gruppe C.

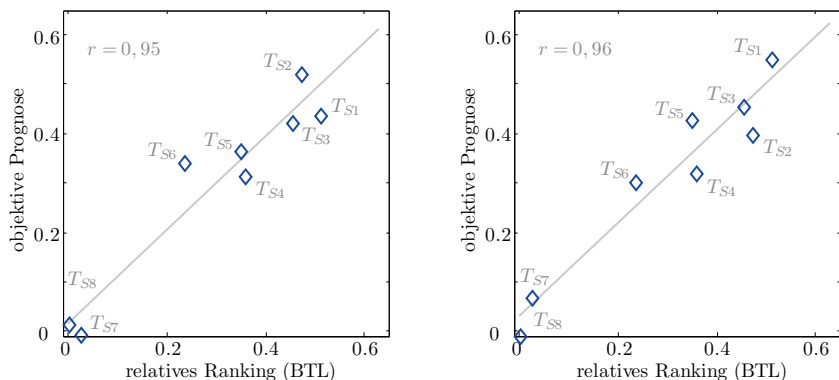


Abbildung A.9: Korrelationsanalyse der allgemeinen, objektiven Prognose der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen der Gruppe A nach Kapitel 3.4.1. Links: Physikalisches Modell gemäß Gleichung (3.13). Rechts: Psychoakustisches Modell gemäß Gleichung (3.14).

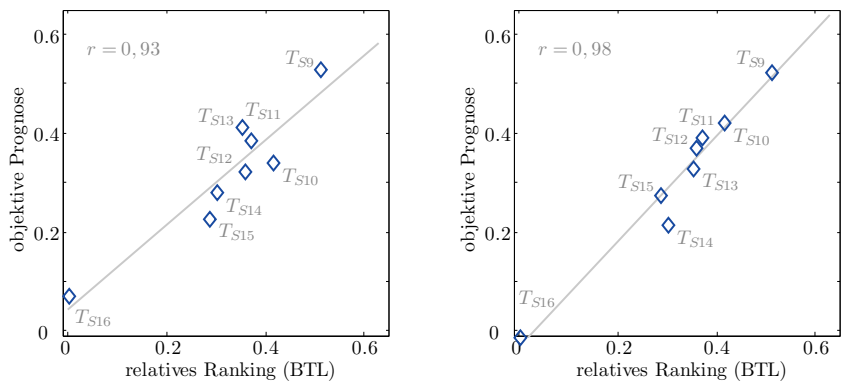


Abbildung A.10: Korrelationsanalyse der allgemeinen, objektiven Prognose der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen der Gruppe B nach Kapitel 3.4.1. Links: Physikalisches Modell gemäß Gleichung (3.13). Rechts: Psychoakustisches Modell gemäß Gleichung (3.14).

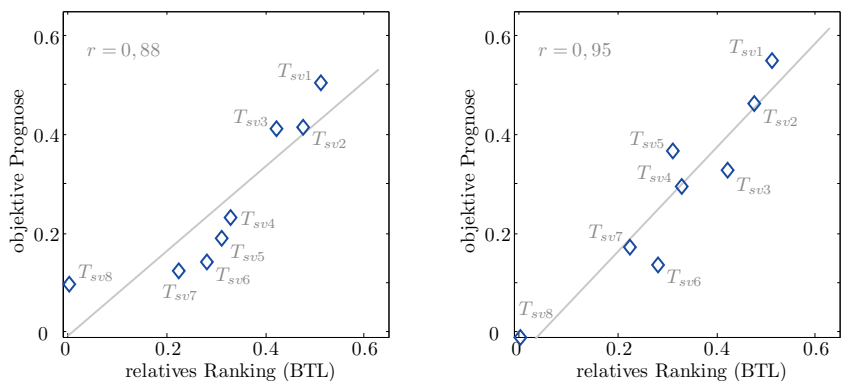


Abbildung A.11: Korrelationsanalyse der allgemeinen, objektiven Prognose der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen der Gruppe C nach Kapitel 3.4.1. Links: Physikalisches Modell gemäß Gleichung (3.13). Rechts: Psychoakustisches Modell gemäß Gleichung (3.14).

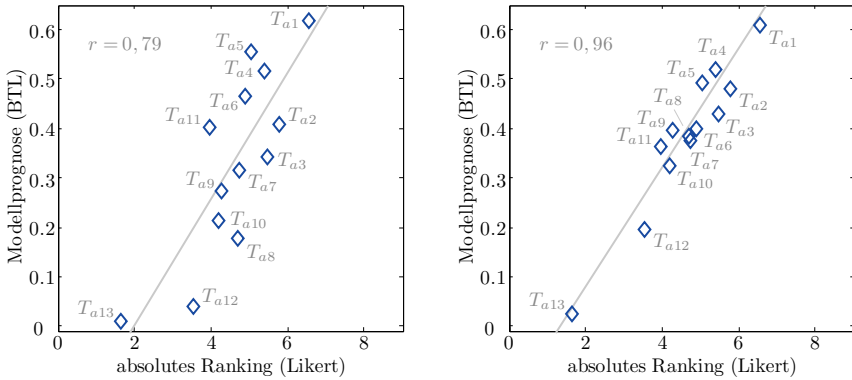


Abbildung A.12: Validierung des objektiven Prognosemodells der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen. Korrelationsanalyse der ordinalskalierten Ergebnisse der absoluten Bewertung und der Daten der objektiven Modellprognose. Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.1. Links: Physikalisches Modell gemäß Gleichung (3.13). Rechts: Psychoakustisches Modell gemäß Gleichung (3.14).

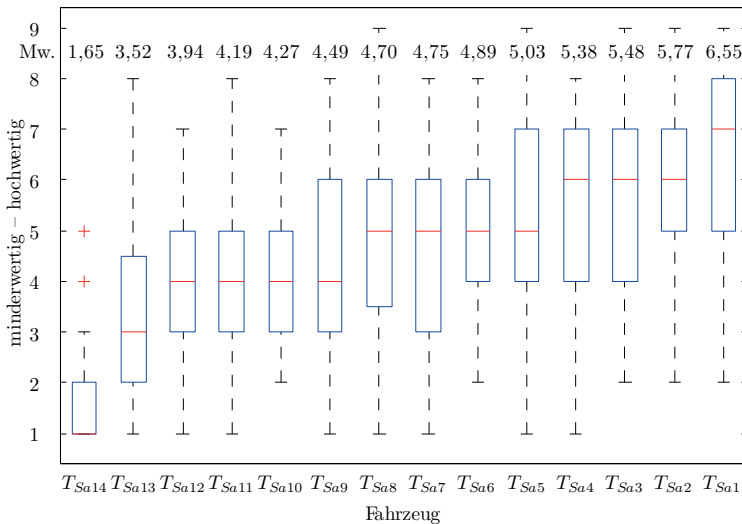


Abbildung A.13: Absolute Bewertung der Türzuschlaggeräusche von Serienfahrzeugen anhand einer neunstufigen Likertskala nach Kapitel 3.4.1.

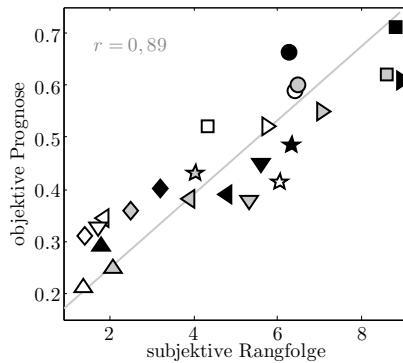


Abbildung A.14: Korrelationsanalyse der Ergebnisse der per Rangfolgetest bewerteten Geräuschqualität von synthetisch veränderten Türzuschlaggeräuschen und der Daten der objektiven Modellprognose nach Kapitel 3.4.2. Psychoakustisches Modell gemäß Gleichung (3.14).

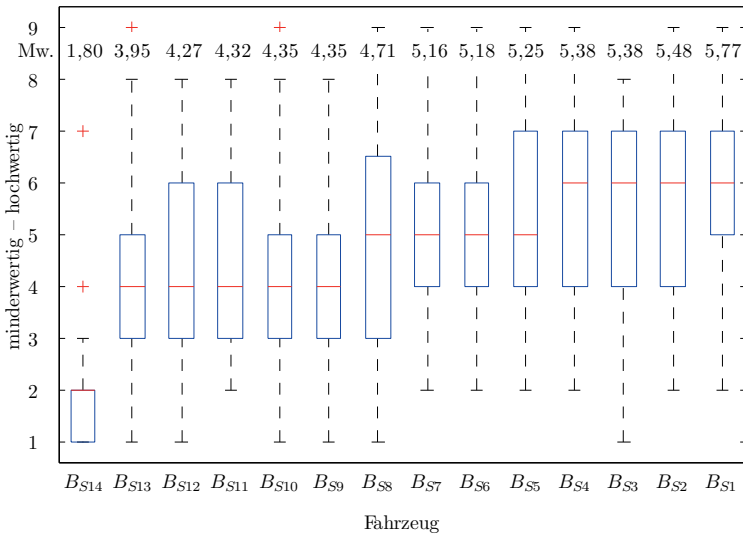


Abbildung A.15: Absolute Bewertung des Rückschnappens der Blinkerhebel von Serienfahrzeugen anhand einer siebenstufigen Likertskala nach Kapitel 4.1.2.

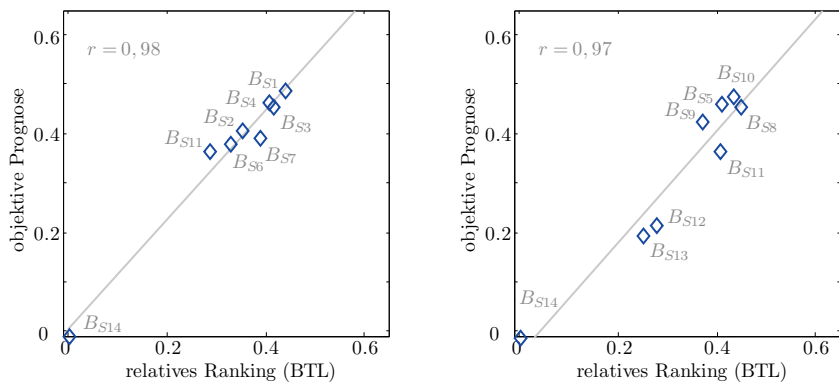


Abbildung A.16: Korrelationsanalyse der allgemeinen, psychoakustischen Prognose der Geräuschqualität des Rückschnappens der Blinkerhebel gemäß Gleichung(4.1) nach Kapitel 4.1.2. Links: Gruppe A. Rechts: Gruppe B.

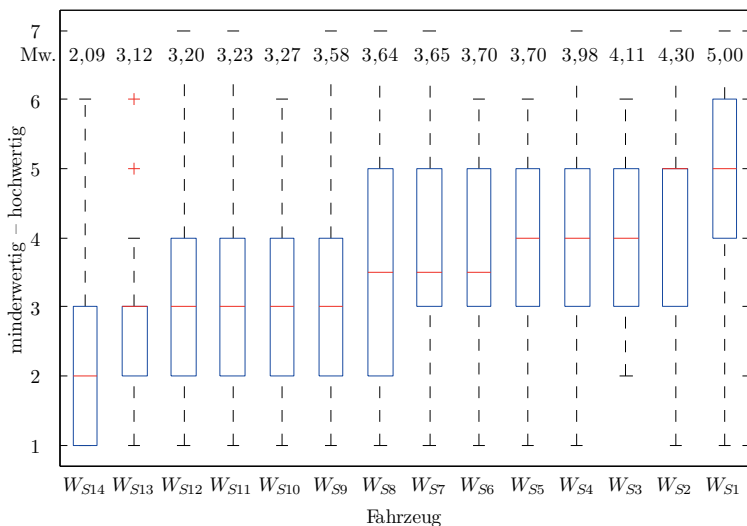


Abbildung A.17: Absolute Bewertung der mehrfach impulshaften Geräusche der Warnblinkanlage von Serienfahrzeugen anhand einer siebenstufigen Likertskala nach Kapitel 4.1.3.



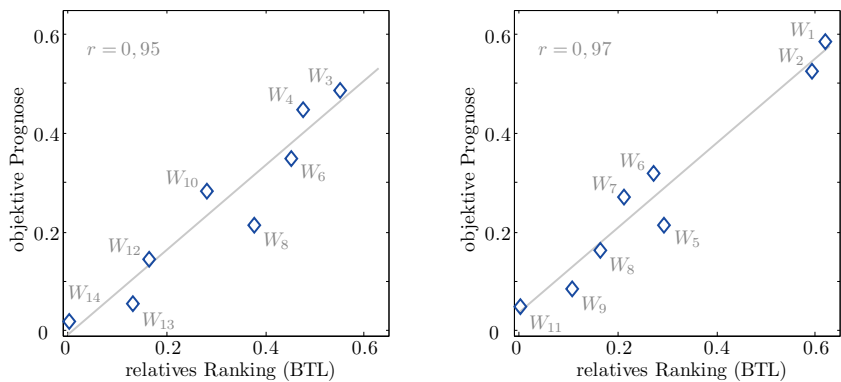


Abbildung A.18: Korrelationsanalyse der allgemeinen, psychoakustischen Prognose der Geräuschqualität der Warnblinkanlage gemäß Gleichung(4.2) nach Kapitel 4.1.3. Links: Gruppe A. Rechts: Gruppe B.

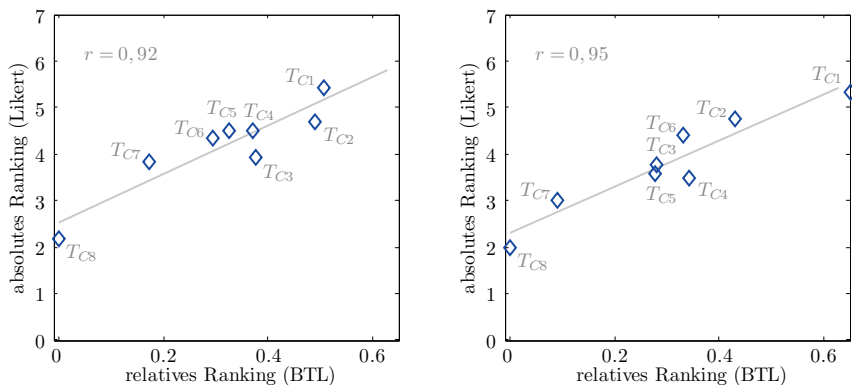


Abbildung A.19: Interkulturelle, subjektive Bewertung der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen. Korrelationsanalyse der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs und des absoluten Rankings anhand einer siebenstufigen Likertskala nach Kapitel 4.2. Links: Europäische Teilnehmer. Rechts: Chinesische Teilnehmer.

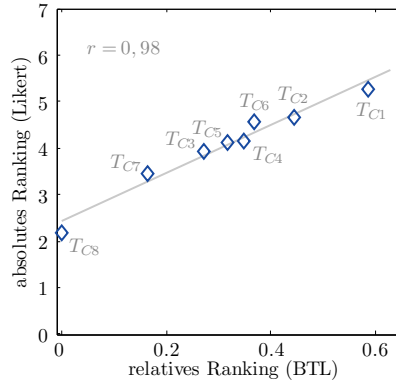


Abbildung A.20: Interkulturelle, subjektive Bewertung der Geräuschqualität von Tür-zuschlaggeräuschen. Korrelationsanalyse der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs und des absoluten Rankings anhand einer siebenstufigen Likertskala nach Kapitel 4.2. Teilnehmer der Vereinigten Staaten von Amerika.

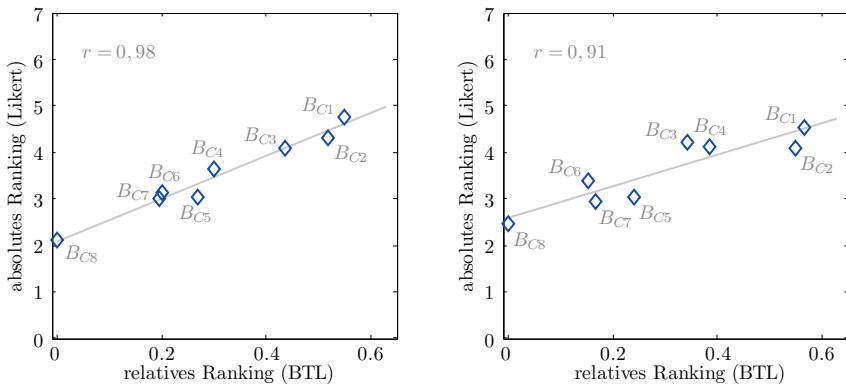


Abbildung A.21: Interkulturelle, subjektive Bewertung der Geräuschqualität von Tür-zuschlaggeräuschen. Korrelationsanalyse der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs und des absoluten Rankings anhand einer siebenstufigen Likertskala nach Kapitel 4.2. Links: Europäische Teilnehmer. Rechts: Chinesische Teilnehmer.

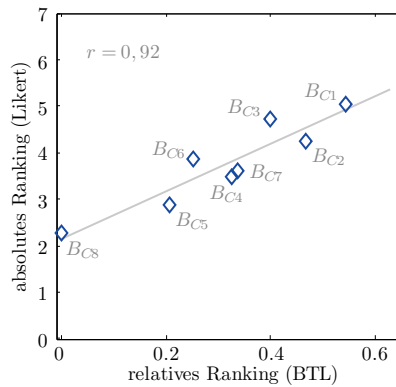


Abbildung A.22: Interkulturelle, subjektive Bewertung der Geräuschqualität von Türzuschlaggeräuschen. Korrelationsanalyse der intervallskalierten Ergebnisse des Paarvergleichs und des absoluten Rankings anhand einer siebenstufigen Likertskala nach Kapitel 4.2. Teilnehmer der Vereinigten Staaten von Amerika.

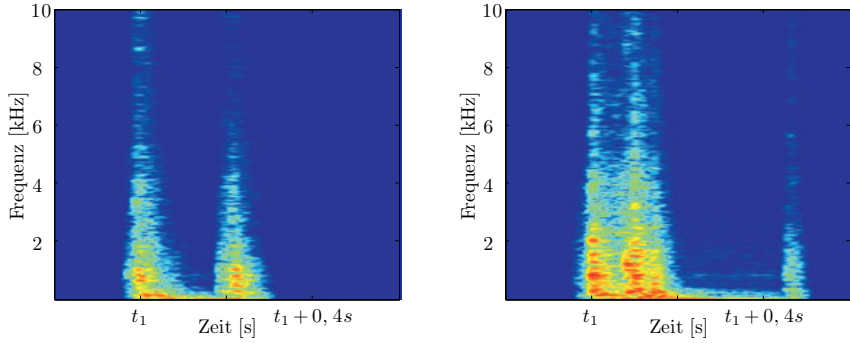


Abbildung A.23: Fast-Fourier-Transformation von Verriegelungsgeräuschen von Serienfahrzeugen nach Kapitel 3.3.1. Gruppe A. Links:  $V_{S7}$ . Rechts:  $V_{S8}$ .

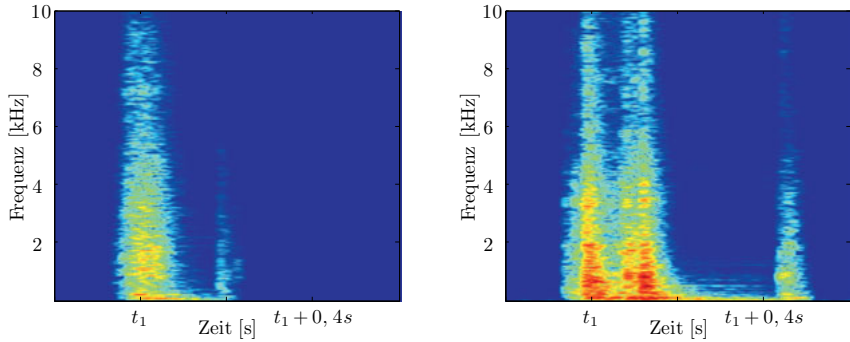


Abbildung A.24: Fast-Fourier-Transformation von Verriegelungsgeräuschen von Serienfahrzeugen nach Kapitel 3.3.1. Gruppe A. Links:  $V_{S9}$ . Rechts:  $V_{S10}$ .

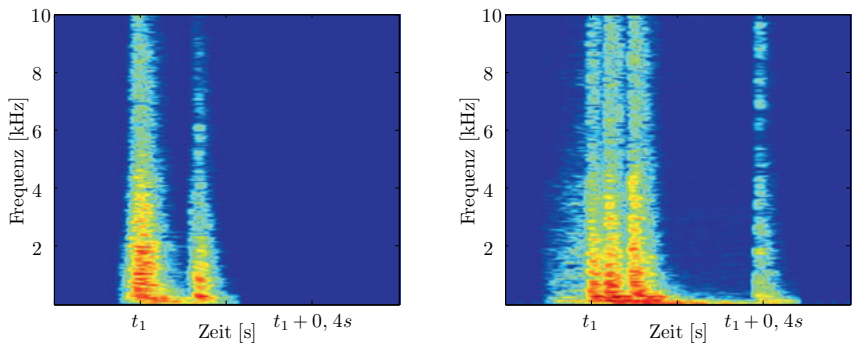


Abbildung A.25: Fast-Fourier-Transformation von Verriegelungsgeräuschen von Serienfahrzeugen nach Kapitel 3.3.1. Gruppe A. Links:  $V_{S11}$ . Rechts:  $V_{S12}$ .

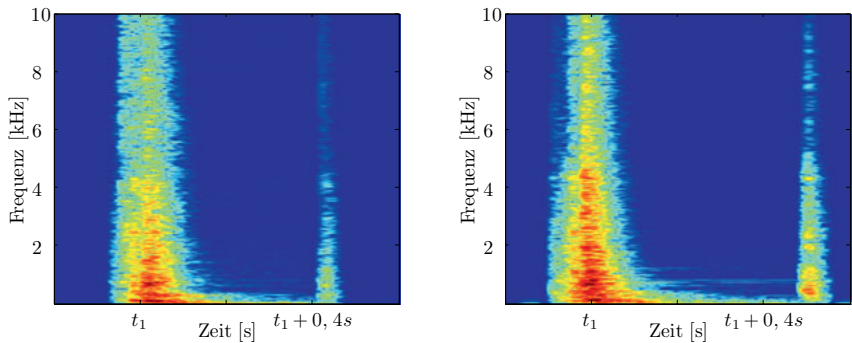


Abbildung A.26: Fast-Fourier-Transformation von Verriegelungsgeräuschen von Serienfahrzeugen nach Kapitel 3.3.1. Gruppe A. Links:  $V_{S13}$ . Rechts:  $V_{S14}$ .

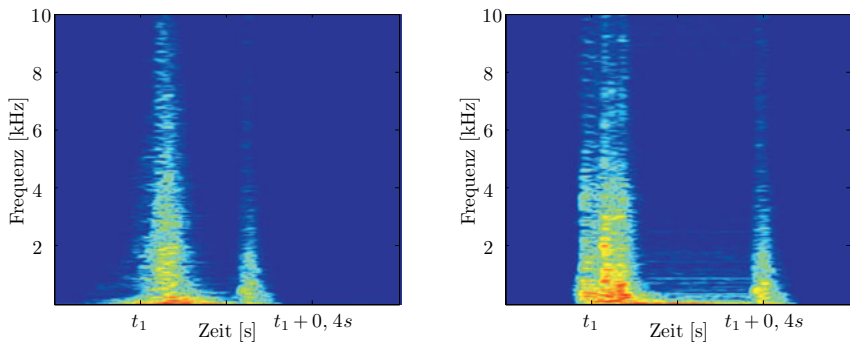


Abbildung A.27: Fast-Fourier-Transformation von synthetisch veränderten Verriegelungsgeräuschen nach Kapitel 3.3.3. Gruppe A. Links:  $V_{Sy2}$ . Rechts:  $V_{Sy4}$ .

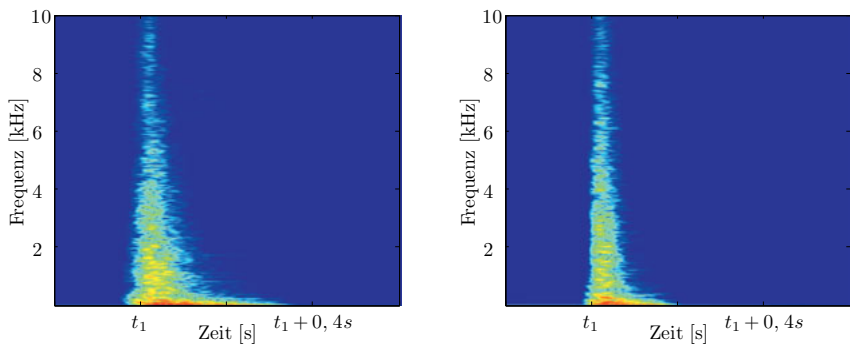


Abbildung A.28: Fast-Fourier-Transformation von synthetisch veränderten Verriegelungsgeräuschen nach Kapitel 3.3.3. Gruppe A. Links:  $V_{Sy5}$ . Rechts:  $V_{Sy6}$ .

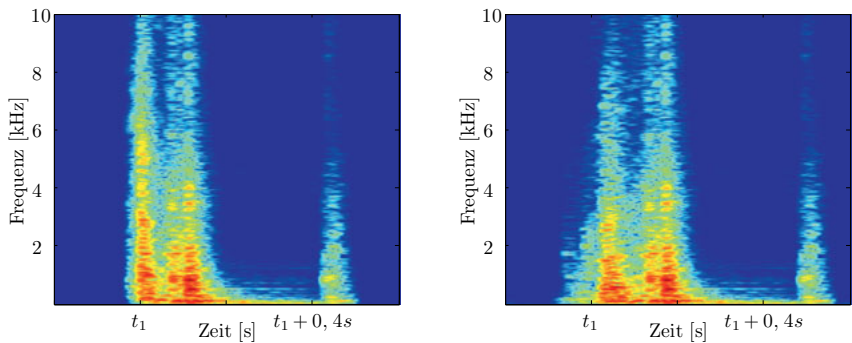


Abbildung A.29: Fast-Fourier-Transformation von synthetisch veränderten Verriegelungsgeräuschen nach Kapitel 3.3.3. Gruppe A. Links:  $V_{Sy9}$ . Rechts:  $V_{Sy10}$ .

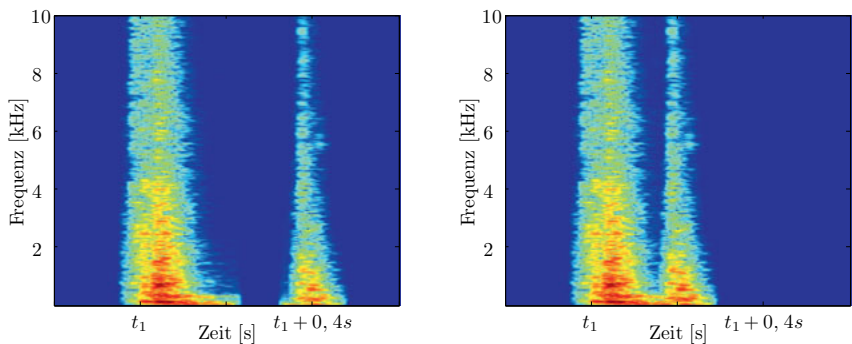


Abbildung A.30: Fast-Fourier-Transformation von synthetisch veränderten Verriegelungsgeräuschen nach Kapitel 3.3.3. Gruppe A. Links:  $V_{Sy11}$ . Rechts:  $V_{Sy13}$ .

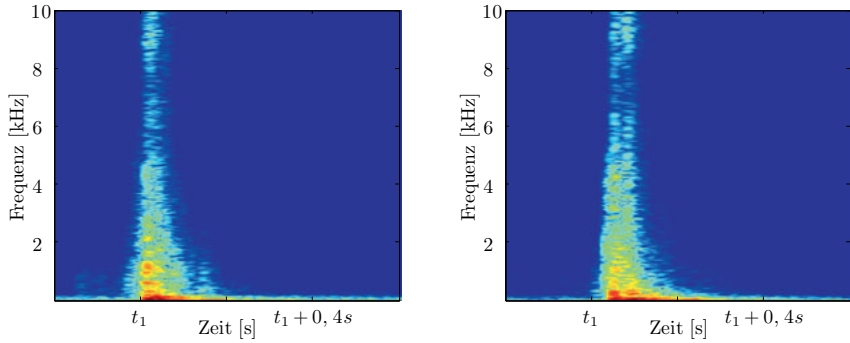


Abbildung A.31: Fast-Fourier-Transformation von Türzuschlaggeräuschen von Serienfahrzeugen nach Kapitel 3.4.1. Gruppe A. Links:  $T_{S1}$ . Rechts:  $T_{S2}$ .

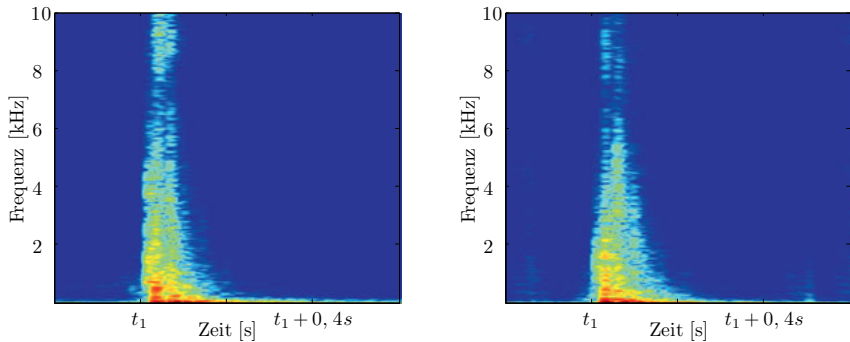


Abbildung A.32: Fast-Fourier-Transformation von Türzuschlaggeräuschen von Serienfahrzeugen nach Kapitel 3.4.1. Gruppe A. Links:  $T_{S3}$ . Rechts:  $T_{S4}$ .



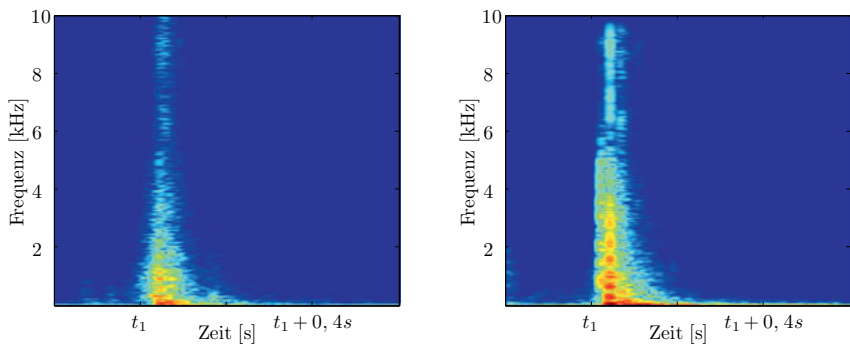


Abbildung A.33: Fast-Fourier-Transformation von Türzuschlaggeräuschen von Serienfahrzeugen nach Kapitel 3.4.1. Gruppe A. Links:  $T_{S5}$ . Rechts:  $T_{S6}$ .

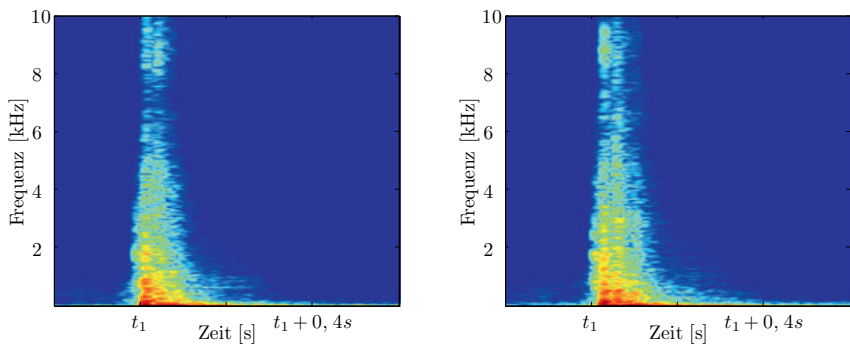


Abbildung A.34: Fast-Fourier-Transformation von Türzuschlaggeräuschen von Serienfahrzeugen nach Kapitel 3.4.1. Gruppe A. Links:  $T_{S7}$ . Rechts:  $T_{S8}$ .

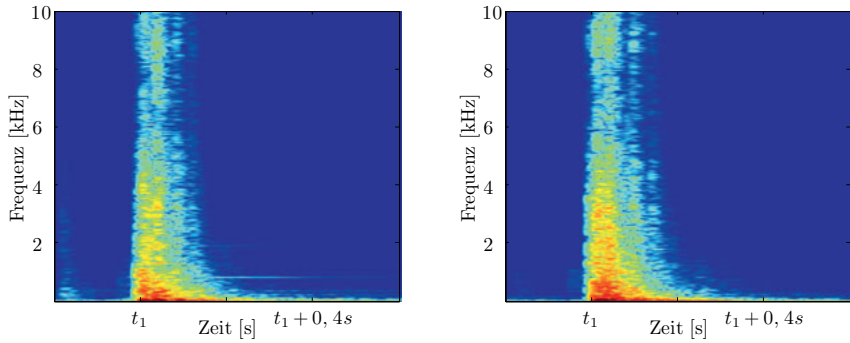


Abbildung A.35: Fast-Fourier-Transformation von technisch veränderten Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.2. Links:  $F_{S1}$  ohne technische Variation. Rechts:  $F_{S1}$  mit technischer Variation.

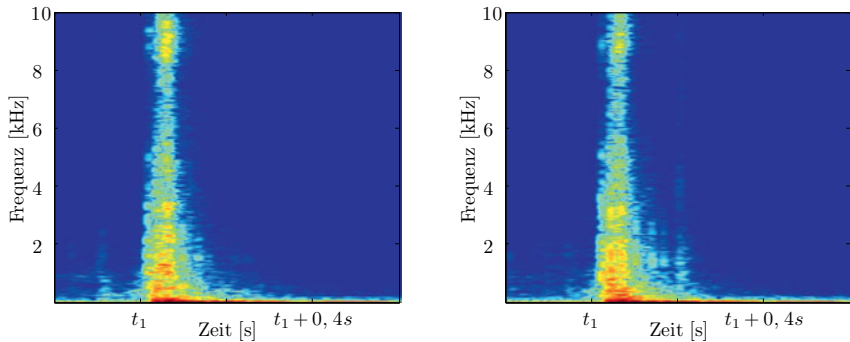


Abbildung A.36: Fast-Fourier-Transformation von technisch veränderten Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.2. Links:  $F_{S2}$  ohne technische Variation. Rechts:  $F_{S2}$  mit technischer Variation.

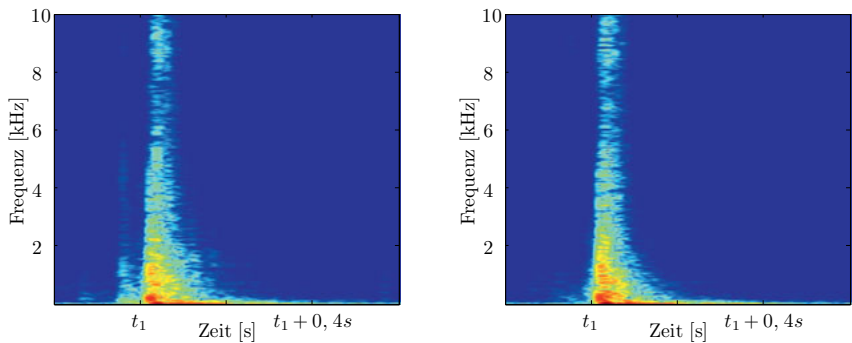


Abbildung A.37: Fast-Fourier-Transformation von technisch veränderten Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.2. Links:  $F_{S3}$  ohne technische Variation. Rechts:  $F_{S3}$  mit technischer Variation.

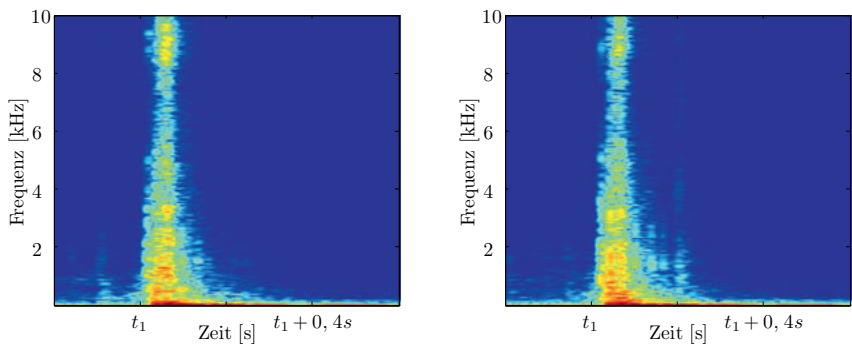


Abbildung A.38: Fast-Fourier-Transformation von technisch veränderten Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.2. Links:  $F_{S4}$  ohne technische Variation. Rechts:  $F_{S4}$  mit technischer Variation.

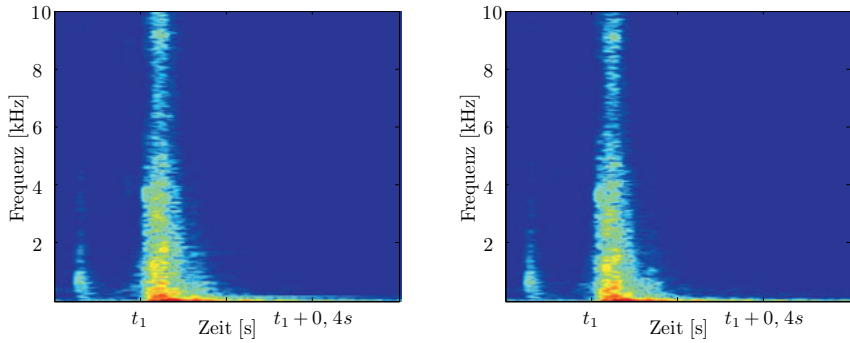


Abbildung A.39: Fast-Fourier-Transformation von technisch veränderten Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.2. Links:  $F_{S5}$  ohne technische Variation. Rechts:  $F_{S5}$  mit technischer Variation.

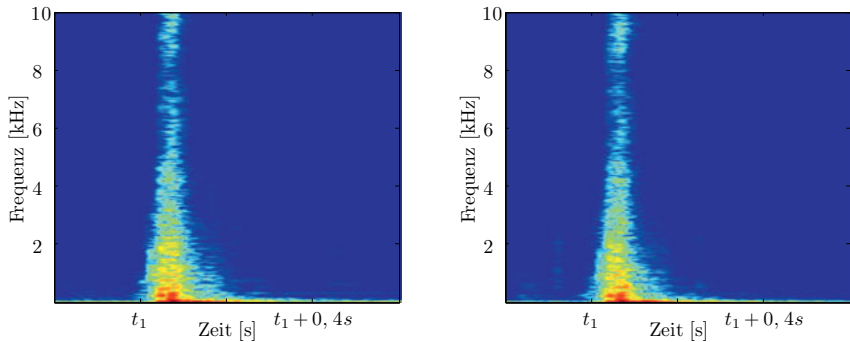


Abbildung A.40: Fast-Fourier-Transformation von technisch veränderten Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.2. Links:  $F_{S6}$  ohne technische Variation. Rechts:  $F_{S6}$  mit technischer Variation.

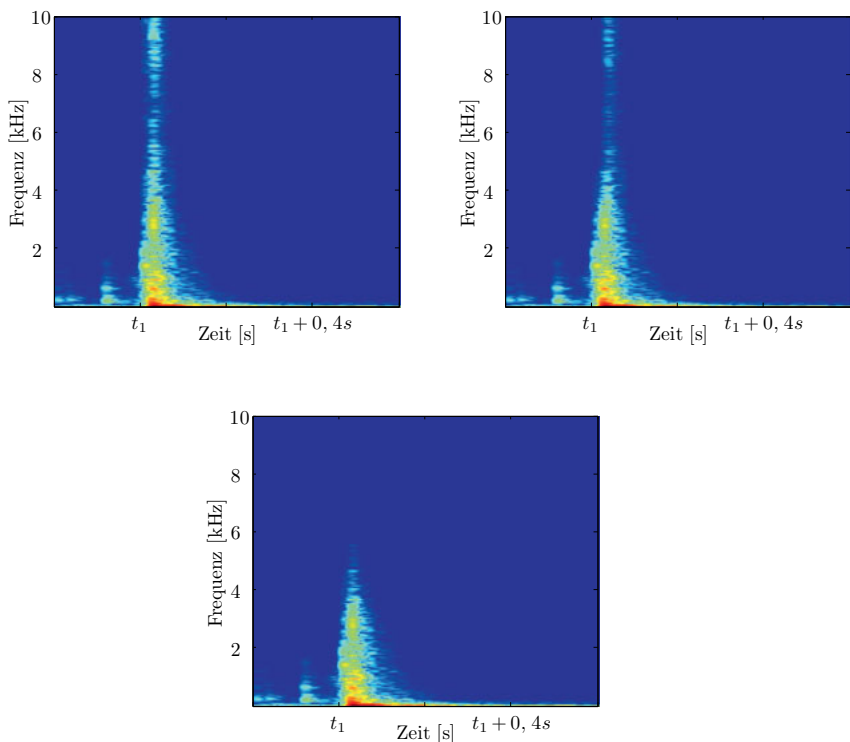


Abbildung A.41: Fast-Fourier-Transformation von synthetisch veränderten Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.2. Oben, links:  $F_{S1}$  original ohne synthetische Variation. Oben, rechts:  $F_{S1}$  mit synthetischer Variation,  $\frac{1}{3}$  des originalen Geräusches tiefpassgefiltert. Unten:  $F_{S1}$  mit synthetischer Variation, originales Geräusch vollständig tiefpassgefiltert.

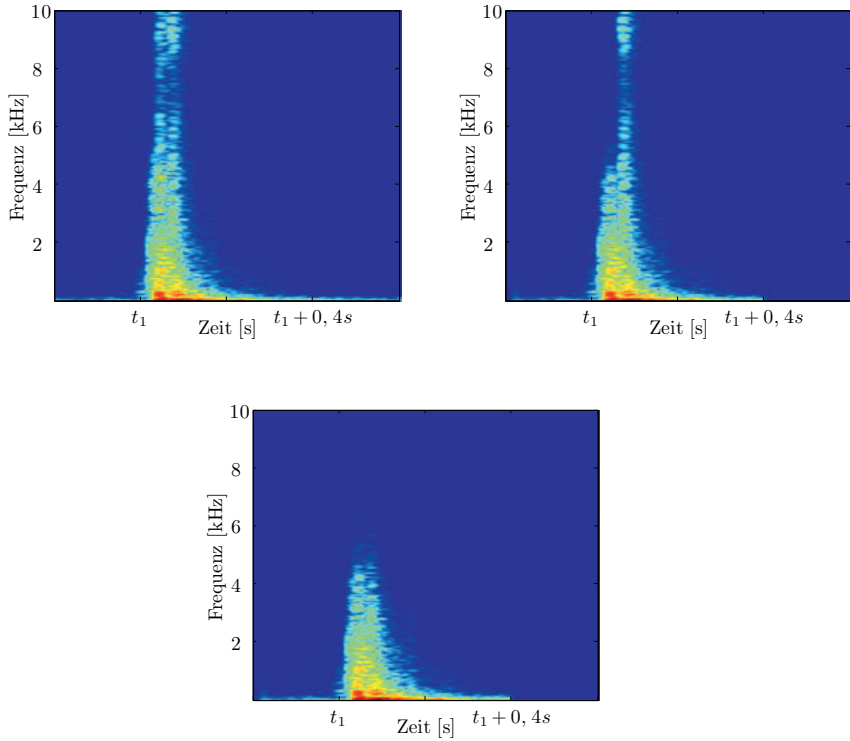


Abbildung A.42: Fast-Fourier-Transformation von synthetisch veränderten Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.2. Oben, links:  $F_{S_2}$  original ohne synthetische Variation. Oben, rechts:  $F_{S_2}$  mit synthetischer Variation,  $\frac{1}{3}$  des originalen Geräusches tiefpassgefiltert. Unten:  $F_{S_2}$  mit synthetischer Variation, originales Geräusch vollständig tiefpassgefiltert.

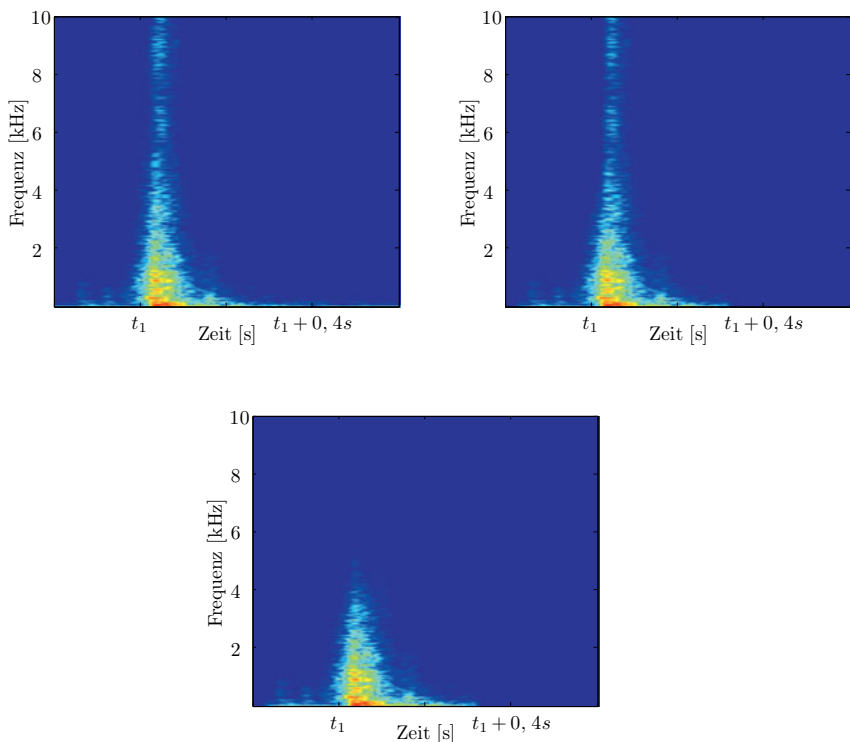


Abbildung A.43: Fast-Fourier-Transformation von synthetisch veränderten Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.2. Oben, links:  $F_{S3}$  original ohne synthetische Variation. Oben, rechts:  $F_{S3}$  mit synthetischer Variation,  $\frac{1}{3}$  des originalen Geräusches tiefpassgefiltert. Unten:  $F_{S3}$  mit synthetischer Variation, originales Geräusch vollständig tiefpassgefiltert.

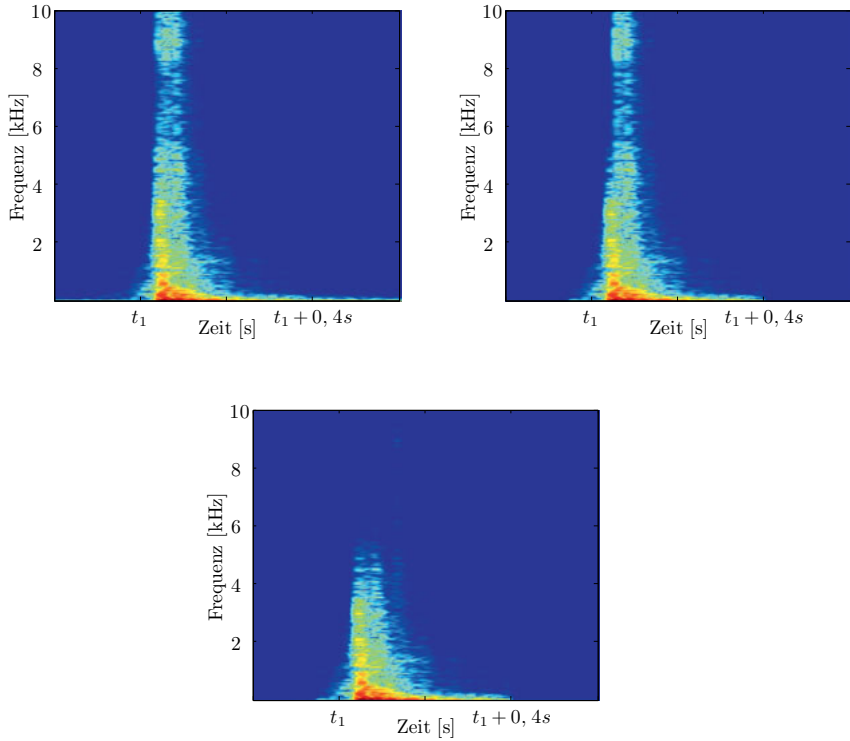


Abbildung A.44: Fast-Fourier-Transformation von synthetisch veränderten Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.2. Oben, links:  $F_{S_4}$  original ohne synthetische Variation. Oben, rechts:  $F_{S_4}$  mit synthetischer Variation,  $\frac{1}{3}$  des originalen Geräusches tiefpassgefiltert. Unten:  $F_{S_4}$  mit synthetischer Variation, originales Geräusch vollständig tiefpassgefiltert.



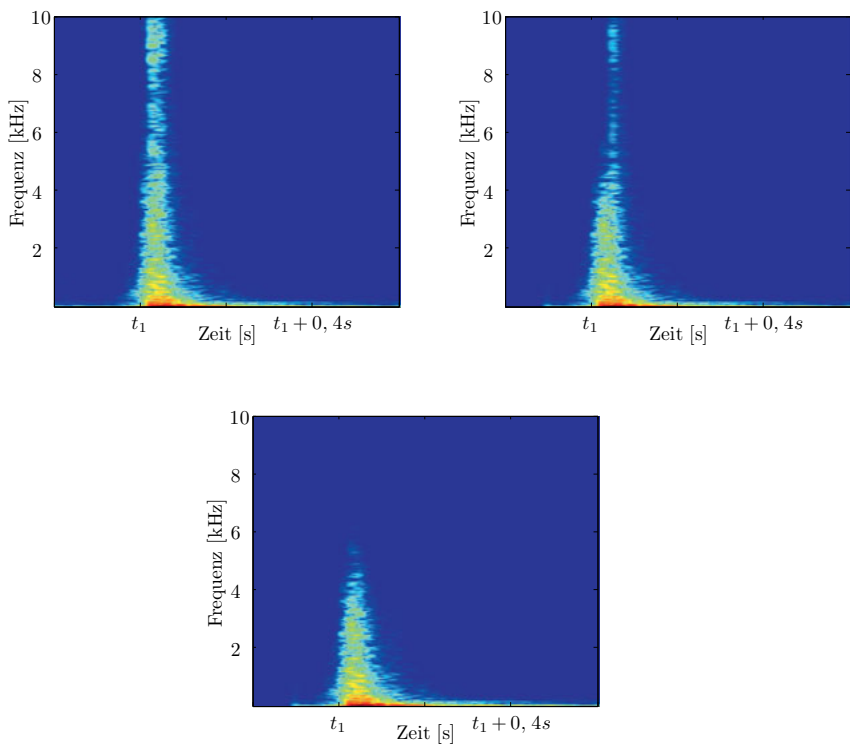


Abbildung A.45: Fast-Fourier-Transformation von synthetisch veränderten Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.2. Oben, links:  $F_{S5}$  original ohne synthetische Variation. Oben, rechts:  $F_{S5}$  mit synthetischer Variation,  $\frac{1}{3}$  des originalen Geräusches tiefpassgefiltert. Unten:  $F_{S5}$  mit synthetischer Variation, originales Geräusch vollständig tiefpassgefiltert.

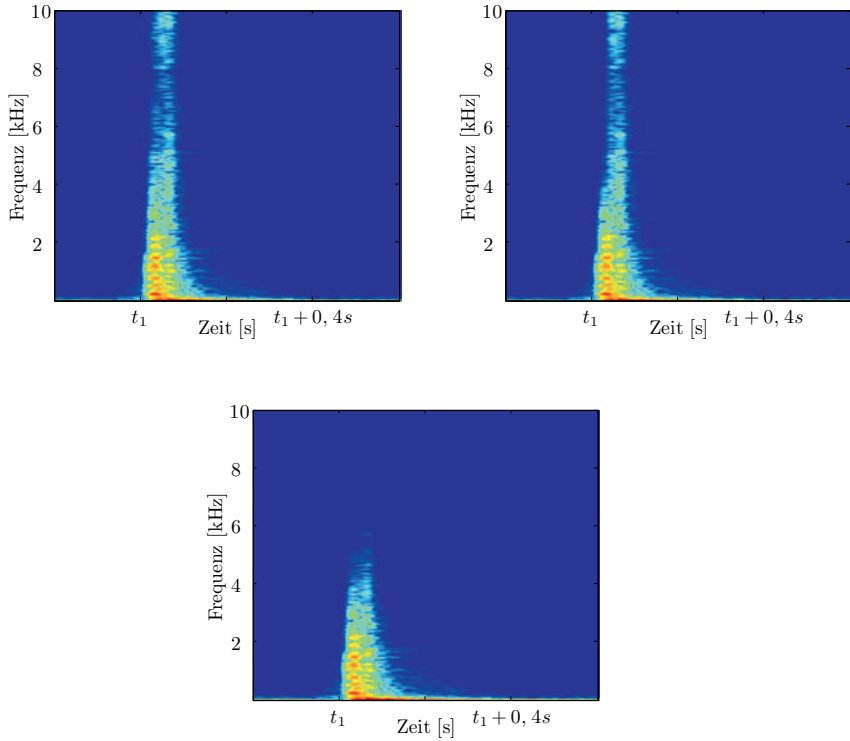


Abbildung A.46: Fast-Fourier-Transformation von synthetisch veränderten Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.2. Oben, links:  $F_{S_6}$  original ohne synthetische Variation. Oben, rechts:  $F_{S_6}$  mit synthetischer Variation,  $\frac{1}{3}$  des originalen Geräusches tiefpassgefiltert. Unten:  $F_{S_6}$  mit synthetischer Variation, originales Geräusch vollständig tiefpassgefiltert.

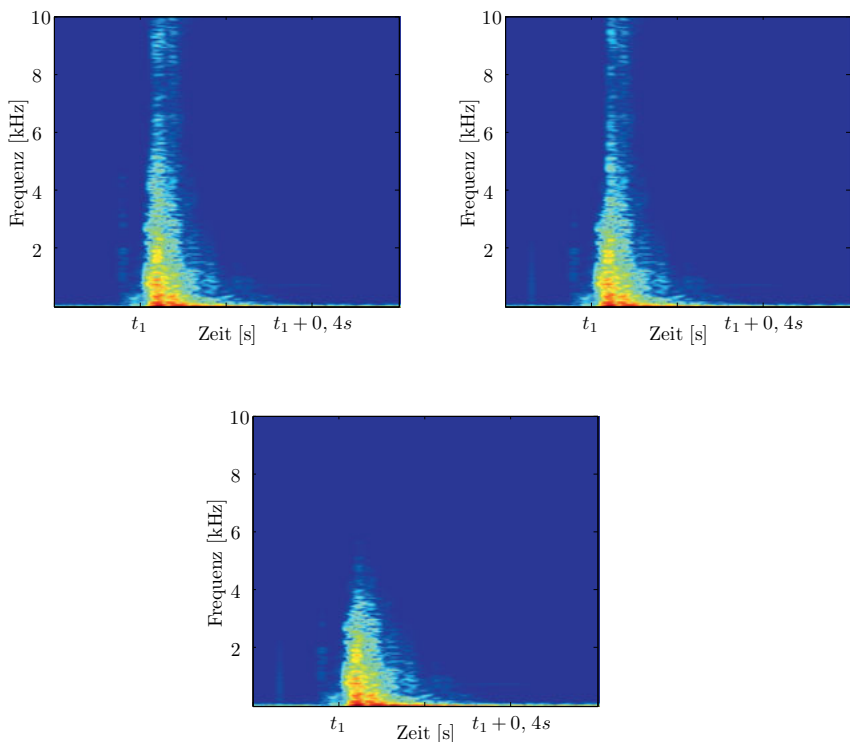


Abbildung A.47: Fast-Fourier-Transformation von synthetisch veränderten Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.2. Oben, links:  $F_{S7}$  original ohne synthetische Variation. Oben, rechts:  $F_{S7}$  mit synthetischer Variation,  $\frac{1}{3}$  des originalen Geräusches tiefpassgefiltert. Unten:  $F_{S7}$  mit synthetischer Variation, originales Geräusch vollständig tiefpassgefiltert.

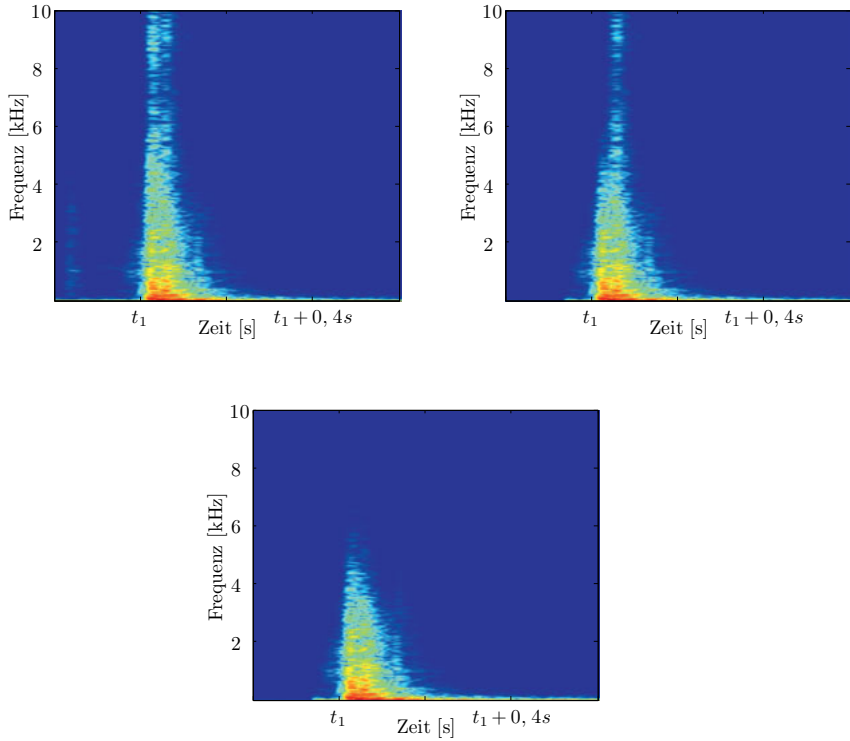


Abbildung A.48: Fast-Fourier-Transformation von synthetisch veränderten Türzuschlaggeräuschen nach Kapitel 3.4.2. Oben, links:  $F_{S8}$  original ohne synthetische Variation. Oben, rechts:  $F_{S8}$  mit synthetischer Variation,  $\frac{1}{3}$  des originalen Geräusches tiefpassgefiltert. Unten:  $F_{S8}$  mit synthetischer Variation, originales Geräusch vollständig tiefpassgefiltert.

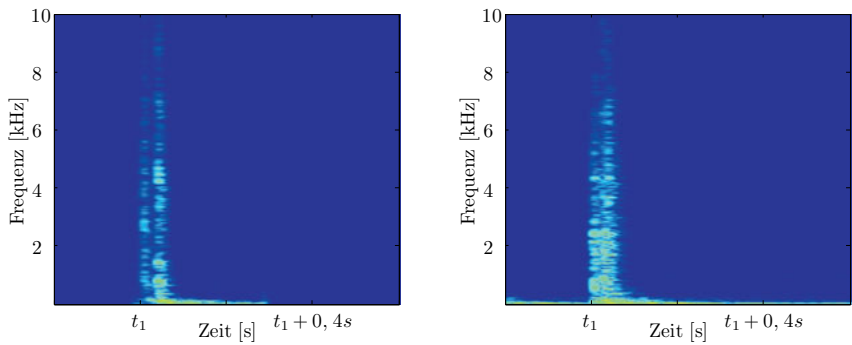


Abbildung A.49: Fast-Fourier-Transformation von Rückschnappgeräuschen des Blinkerhebels von Serienfahrzeugen nach Kapitel 4.1.2. Gruppe A. Links:  $B_{S1}$ . Rechts:  $B_{S3}$ .

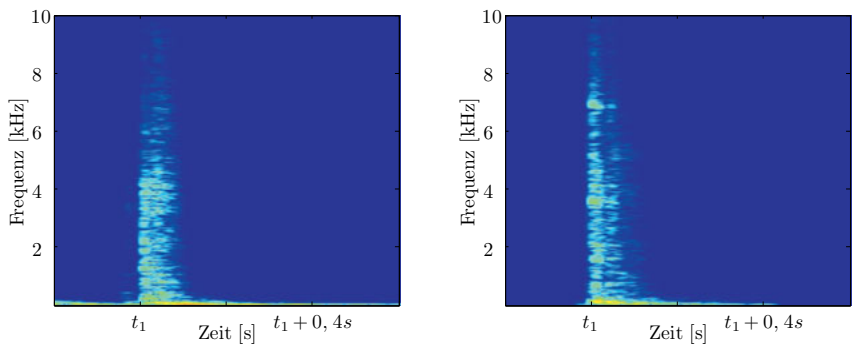


Abbildung A.50: Fast-Fourier-Transformation von Rückschnappgeräuschen des Blinkerhebels von Serienfahrzeugen nach Kapitel 4.1.2. Gruppe A. Links:  $B_{S4}$ . Rechts:  $B_{S7}$ .

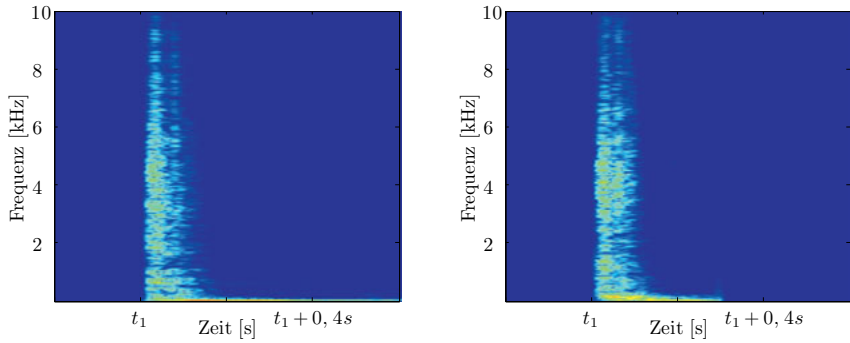


Abbildung A.51: Fast-Fourier-Transformation von Rückschnappgeräuschen des Blinkerhebels von Serienfahrzeugen nach Kapitel 4.1.2. Gruppe A. Links:  $B_{S2}$ . Rechts:  $B_{S6}$ .

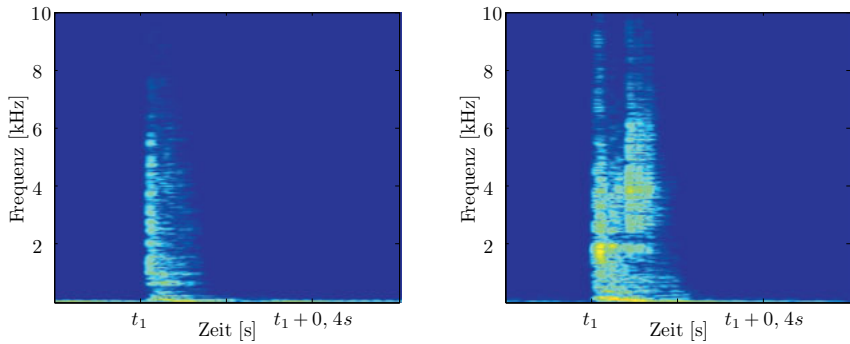


Abbildung A.52: Fast-Fourier-Transformation von Rückschnappgeräuschen des Blinkerhebels von Serienfahrzeugen nach Kapitel 4.1.2. Gruppe A. Links:  $B_{S11}$ . Rechts:  $B_{S14}$ .

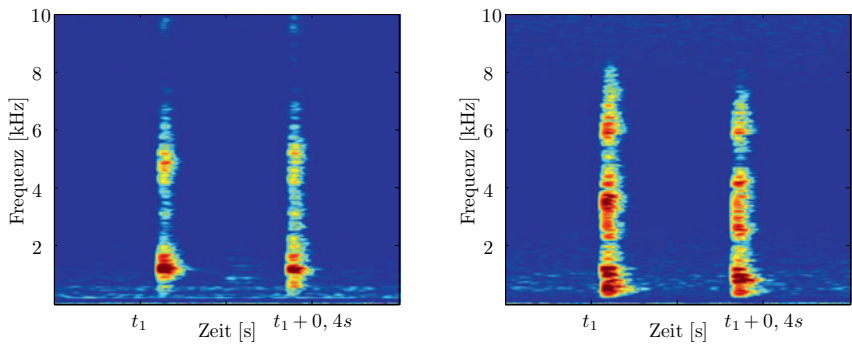


Abbildung A.53: Fast-Fourier-Transformation von Geräuschen der Warnblinkanlage von Serienfahrzeugen nach Kapitel 4.1.3. Gruppe A. Links:  $W_{S3}$ . Rechts:  $W_{S4}$ .

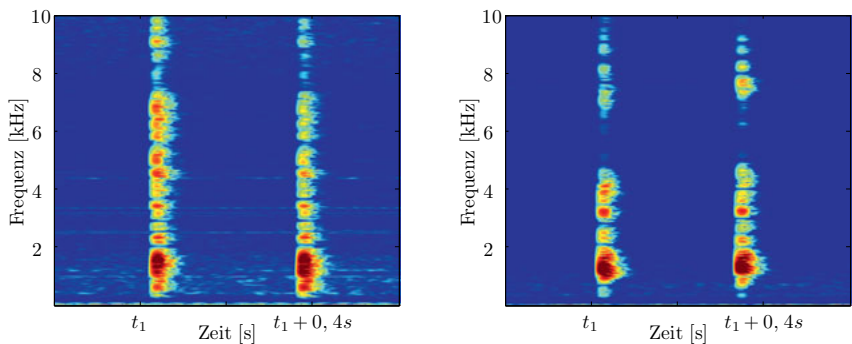


Abbildung A.54: Fast-Fourier-Transformation von Geräuschen der Warnblinkanlage von Serienfahrzeugen nach Kapitel 4.1.3. Gruppe A. Links:  $W_{S6}$ . Rechts:  $W_{S8}$ .

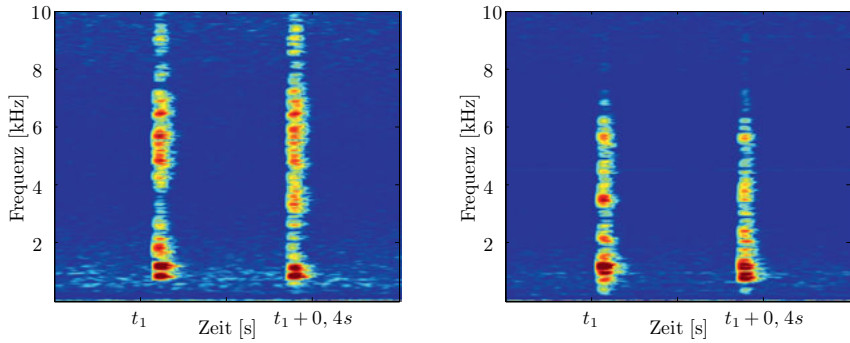


Abbildung A.55: Fast-Fourier-Transformation von Geräuschen der Warnblinkanlage von Serienfahrzeugen nach Kapitel 4.1.3. Gruppe A. Links:  $W_{S10}$ . Rechts:  $W_{S12}$ .

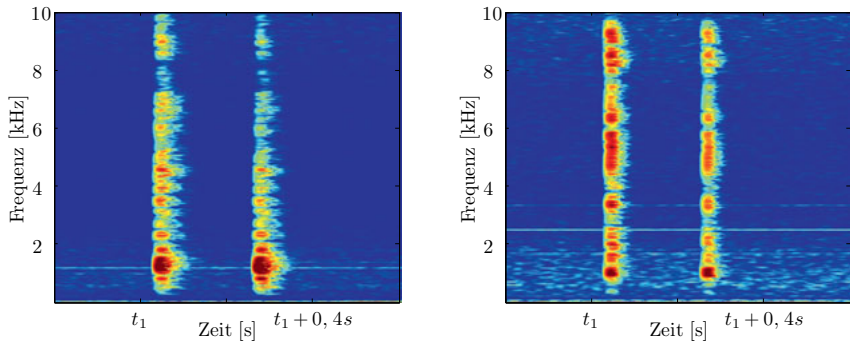


Abbildung A.56: Fast-Fourier-Transformation von Geräuschen der Warnblinkanlage von Serienfahrzeugen nach Kapitel 4.1.3. Gruppe A. Links:  $W_{S13}$ . Rechts:  $W_{S14}$ .



# Literaturverzeichnis

- [1] Altinsoy, M. E.: *Klopfgeräusche als Qualitätsindiz von Haushaltsgeräten*. Fortschritte der Akustik, DAGA '12, Dt. Gesell. für Akustik e. V., Darmstadt, 38, 2012.
- [2] Altinsoy, M. E.: *Knocking Sound as Quality Sign for Household Appliances and the Evaluation of the Audio-haptic Interaction*. In: Magnussen, C., D. Szymczak und S. Brewster (Hrsg.): *Haptic and audio Interaction Design*, S. 121–130. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [3] Altinsoy, M. E. und U. Jekosch: *The Semantic Space of Vehicle Sounds: Developing a Semantic Differential with Regard to Customer Perception*. Journal of the Audio Engineering Society, 60:13–22, 2012.
- [4] Ando, Y.: *A theory of primary sensations and spatial sensations measuring environmental noise*. Journal of Sound and Vibration, 241:3–18, 2001.
- [5] ANSI S3.4: *Procedure for the Computation of Loudness of Steady Sounds*, 2007.
- [6] Anweiler, A. K. und J. L. Verhey: *Spectral loudness summation for short and long signals as a function of level*. Journal of the Acoustical Society of America, 119:2919–2928, 2006.
- [7] Aures, W.: *Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale, ein Beitrag zur gehörbezogenen Schallanalyse*. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Elektrotechnik, 1984.
- [8] Aures, W.: *Berechnungsverfahren für den sensorischen Wohlklang beliebiger Schallsignale*. Acustica, 59:130 – 141, 1985.
- [9] Auweraer, H. van der, K. Wyckaert und W. Hendrickx: *From sound quality to the engineering of solutions for NVH problems: case studies*. Acustica: acta acustica, 83:796–804, 1997.
- [10] Backhaus, K., B. Erichson, W. Plinke und R. Weiber: *Multivariate Analysemethoden: eine anwendungsorientierte Einführung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 12. Aufl., 2013.
- [11] Baird, T., N. Otto, W. Bray und M. Stephan: *Impulsive Noise of Printers: Measurement metrics and their subjective correlation*. Journal of the Acoustical Society of America, 118:1849–1849, 2005.

- 
- [12] Berg, J. A.: *Sound Branding: Grundlagen, Potenziale und Grenzen einer auditiven Markeninszenierung*. Diplomica Verlag GmbH, Hamburg, 2012.
  - [13] Bezat, M. C., R. Kronland-Martinet, V. Roussarie und S. Ystad: *From acoustic descriptors to evoked quality of car door sounds*. Journal of the Acoustical Society of America, 1:226–241, 2014.
  - [14] Bismarck, G. von: *Extraktion und Messung von Merkmalen der Klangfarbenwahrnehmung stationärer Schalle*. Dissertation, Technische Universität München, 1972.
  - [15] Bismarck, G. von: *Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds*. Acustica, 30:159–172, 1974.
  - [16] Bismarck, G. von: *Timbre of steady sounds: a factorial investigation of its verbal attributes*. Acustica, 30:146–159, 1974.
  - [17] Blauert, J.: *Product-Sound Assessment: An Enigmatic issue from the Point of View of Engineering?* Proceedings of the Inter-Noise 94, Yokohama, Japan, 2:857–862, 1994.
  - [18] Blauert, J.: *Communication Acoustics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
  - [19] Blauert, J. und U. Jekosch: *Sound-quality evaluation - a Multi-Layered Problem*. Acustica: acta acustica, 83(5):747–753, September/October 1997.
  - [20] Blommer, M., N. Otto, G. Wakefield, B. Feng und C. Jones: *Calculating the loudness of impulsive sounds*. SAE Technical Paper 951311, 1995.
  - [21] Bobbert, G.: *Innengeräusche von Kraftfahrzeugen*. Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Akustik: Fortschritte der Akustik. Plenarvorträge und Kurzreferate der 14. Gemeinschaftstagung der DAGA, Braunschweig, S. 229–243, 1988.
  - [22] Bodden, M.: *Instrumentation for sound quality evaluation*. Acustica: acta acustica, 83(5):775–783, September/October 1997.
  - [23] Bodden, M. und R. Heinrichs: *Moderators of Sound Quality of complex sounds with multiple tonal components*. Proceedings of the 17th International Congress on Acoustics, Rom, Italien, 2001.
  - [24] Bodden, M. und R. Heinrichs: *Diesel Impulsiveness: technical process*. Proceedings of the 36th Inter-Noise, Istanbul, Türkei, 2007.
  - [25] Borg, I. und T. Staufenbiel: *Theorien und Methoden der Skalierung*. Verlag Hans Huber, Bern, 2007.
  - [26] Bortz, J. und N. Döring: *Forschungsmethoden und Evaluation: für Human- und Sozialwissenschaftler*. Springer Medizin Verlag Heidelberg, 2006.

- 
- [27] Boulet, I.: *La sonie des sons impulsionnels: perception, mesures et modèles*. Dissertation, Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II, 2005.
- [28] Boulet, I.: *La sonie des sons impulsionnels*, Bd. 20. Les cahiers de l'audition, 2008.
- [29] Braess, H.H. und U. Seiffert: *Automobil design und Technik: Formgebung, Funktionalität und Technik*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2007.
- [30] Bregman, A.S.: *Auditory Scene Analysis: The Perceptual Organization of Sound*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1994.
- [31] Bruhn, H., R. Oerter und H. Rösing: *Musikpsychologie: Ein Handbuch in Schlüsselbegriffen*. Reinbek: Rowohlt, 2002.
- [32] Cattell, R.B.: *The scree test for the number of factors*. Multivariate Behavioral Research, 1:245–276, 1966.
- [33] Chalupper, J. und H. Fastl: *Dynamic Loudness Model (DLM) for Normal and Hearing-Impaired Listeners*. Acta Acustica united with Acustica, 88:378–386, 2002.
- [34] Coombs, C.H.: *A theory of data*. Wiley, New York, 1964.
- [35] Cox, D.R. und E.J. Snell: *The Analysis of Binary Data*. Chapman & Hall/CRC Monographs on Statistics & Applied Probability, 1989.
- [36] Crabb, H.C.: *The Virtual Engineer: 21st century product development*. New York, American Society of Mechanical Engineers, 1998.
- [37] Davison, M. und A. Sharma: *Parametric statistics and levels of measurement: factorial design and multiple regression*. Psychological Bulletin, 107:384–400, 1990.
- [38] Debreu, G.: *Review of R.D. Luce, Individual choice behavior: A theoretical analysis*. American Economic Review, 50:186–188, 1960.
- [39] DIN 1318: *Lautstärkepegel; Begriffe, Meßverfahren*, Sep. 1970.
- [40] DIN 45630-1: *Grundlagen der Schallmessung; Physikalische und subjektive Größen von Schall*, Dez. 1971.
- [41] DIN 45631/A1: *Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum - Verfahren nach E. Zwicker - Änderung 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche*, März 2010.
- [42] DIN 45633 Blatt 1: *Präzisionsschallpegelmesser. Allgemeine Anforderungen*, 1970.
- [43] DIN 45681: *Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen*, März 2005.

- 
- [44] DIN 45692: *Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe*, Aug. 2009.
- [45] DIN EN 61672-1: *Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen*, 2013.
- [46] DIN EN ISO 7779: *Akustik - Geräuschemissionsmessung an Geräten der Informations- und Telekommunikationstechnik*, Jan. 2011.
- [47] DIN ISO 226: *Akustik - Normalkurven gleicher Lautstärkepegel*, Apr. 2006.
- [48] Duvinneau, F., S. Liefold, U. Gabbert, M. Höchstetter und J.L. Verhey: *Engine Sound Weighting using a Psychoacoustic Criterion based on Auralized Numerical Simulations*. Proceedings of the Euronoise 2015, Maastricht, Niederlande, 2015.
- [49] Duvinneau, F., S. Liefold, M. Höchstetter, J.L. Verhey und U. Gabbert: *Psychoakustische Bewertung von Motorgeräuschen unter Nutzung auralisierter numerischer Simulationsergebnisse*. Fortschritte der Akustik, DAGA '15, Dt. Gesell. für Akustik e. V., Nürnberg, 2015.
- [50] Enders, R.: *Das Homerecording Handbuch*. Carstensen Verlag, München, 2003.
- [51] Engel, K.: *Wesentliche Geräuschquellen im Fahrzeug und deren Charakterisierung*, Kap. 6, S. 205–316, In: Sound-Engineering im Automobilbereich; Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [52] Eye, A. von und C. Schuster: *Regression Analysis for Social Sciences*. Academic Press, San Diego, California, USA, 1998.
- [53] Fahy, F. und J. Walker: *Fundamentals of Noise and Vibration*. E & FN Spon, London, 1998.
- [54] Fastl, H.: *Temporal masking effects: I. Broadband noise masker*. Acustica, 35:287–302, 1976.
- [55] Fastl, H.: *Temporal masking effects: II. Critical band noise masker*. Acustica, 36:317–331, 1977.
- [56] Fastl, H.: *Temporal masking effects: III. Pure tone masker*. Acustica, 43:283–294, 1979.
- [57] Fastl, H.: *Hearing sensation and noise quality evaluation*. Journal of the Acoustical Society of America, 87:134, 1990.
- [58] Fastl, H.: *The Psychoacoustics of Sound-Quality Evaluation*. Acustica: acta acustica, 83(5):754–764, September/October 1997.
- [59] Fastl, H.: *Psycho-Acoustics and Sound Quality*, Kap. 6, S. 139–162, In: Communication Acoustics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.

- 
- [60] Fastl, H.: *Advanced Procedures for Psychoacoustic Noise Evaluation*. Proceedings of the Euronoise 2006, Tampere, Finland, 2006.
  - [61] Fastl, H., A. Jaroszewski, E. Schoerer und E. Zwicker: *Equal Loudness Contours between 100 and 1000 Hz for 30,50,70 phon*. *Acustica*, 70:197–201, 1990.
  - [62] Fechner, G. T.: *Elemente der Psychophysik*. Breitkopf und Härtel, Leipzig, 1860.
  - [63] Fellinger, R.: *Generierung eines Prozesses zur Absicherung akustischer Zielgrößen in der Automobilindustrie*. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Deggendorf, Februar 2015.
  - [64] Field, A.: *Discovering Statistics Using SPSS*. Introducing Statistical Methods Series. SAGE Publications Ltd., 2013.
  - [65] Fletcher, H.: *Auditory patterns*. *Review of Modern Physics*, 12:47–65, 1940.
  - [66] Fletcher, H. und W. Munson: *Loudness, its definition, measurement, and calculation*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 5:82–108, 1933.
  - [67] Forbes, J. und R. Wales: *Test process for best-in-class door closing sound quality*. Proceedings of the IBEC, Body Design and Engineering, 13:145–151, 1995.
  - [68] Fridrich, R.: *Investigating calculated loudness ISO532 for evaluating impulsive sounds*. Proceedings of the 1991 Noise and Vibration Conference, S. 443–452, 1991.
  - [69] Fujimoto, Y., S. Ishimitsu, K. Kawasaki, K. Sakamoto und T. Yoshimi: *A Study of Evaluating the Button Sounds using Wavelets*. In: *Audio Engineering Society Conference: 34th International Conference: New Trends in Audio for Mobile and Handheld Devices*, 2008.
  - [70] Gadermann, A. M., M. Guhn und B. D. Zumbo: *Estimating ordinal reliability for Likert-type and ordinal item response data: A conceptual, empirical, and practical guide*. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 17:1–13, 2012.
  - [71] Genuit, K.: *Background and Practical Examples of Sound Design*. *Acustica: acta acustica*, 83:805–812, 1997.
  - [72] Genuit, K.: *Sound quality of exterior vehicle noise*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 108:2496, 2000.
  - [73] Genuit, K.: *Geräuschwahrnehmung. Parameter bei der Beurteilung von Fahreindrücken: Hören - Fühlen - Sehen - Wissen*, S. 143–162, In: *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II*. Expert Verlag, Renningen, 2002.
  - [74] Genuit, K.: *Significance of Psychoacoustic Aspects for the Evaluation of Vehicle Exterior Noise*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123:3134, Juni 2008.

- 
- [75] Genuit, K. und J. Poggenburg: *The Influence of Vibrations on the Subjective Judgement of Vehicle's interior noise*. Noise-Con '98, Ypsilanti, Michigan, USA.
- [76] Genuit, K., B. Schulte-Fortkamp und A. Fiebing: *Neue Verfahren zum Benchmarking von Fahrzeuginnengeräuschen*, S. 134–146, In: *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen III*. Expert Verlag, Renningen, 2006.
- [77] Genuit, K., B. Schulte-Fortkamp, A. Fiebing und M. Haverkamp: *Bewertung von Fahrzeuggeräuschen*, Kap. 4, S. 109–181, In: *Sound-Engineering im Automobilbereich; Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [78] Genuit, K. und R. Sottek: *Das menschliche Gehör und Grundlagen der Psychoakustik*, Kap. 2, S. 39–88, In: *Sound-Engineering im Automobilbereich; Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [79] Giacomoni, C. und P. Davies: *Effect of room characteristics on perception of low-amplitude sonic booms heard indoors*. Journal of the Acoustical Society of America, 133:3370, 2013.
- [80] Glasberg, B.R. und B.C.J. Moore: *A Model of Loudness Applicable to Time-Varying Sounds*. Journal of the Audio Engineering Society, 50:331–342, 2002.
- [81] Gliem, J. A. und R. R. Gliem: *Calculating, interpreting, and reporting Cronbach's Alpha reliability coefficient for Likert-type scales*. Midwest Research to Practice Conference in Adult, Continuing, and Community Education, S. 82–88, 2003.
- [82] Griffin, R. W.: *Fundamentals of Management*. Texas A&M University, 7. Aufl., 2014.
- [83] Görne, T.: *Tontechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Leipzig, 2011.
- [84] Grote, K.H. und J. Feldhusen: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 24. Aufl., 2014.
- [85] Gulick, W.L., G. A. Gescheider und R. D. Frisina: *Hearing: Physiological Acoustics, Neural Coding and Psychoacoustics*. Oxford University Press, New York, 1989.
- [86] Guski, R.: *Wahrnehmen: ein Lehrbuch*. Kohlhammer W., Stuttgart, 1996.
- [87] Guski, R.: *Grundriss der Psychologie: Wahrnehmung: Eine Einführung in die Psychologie der menschlichen Informationsaufnahme*. Kohlhammer, Stuttgart, 2000.
- [88] Hair, J., R. Anderson und B. Babin: *Multivariate Data Analysis: A Global Perspective*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2009.

- 
- [89] Handmann, U. und M. Bodden: *Psychoakustische Untersuchungen an Fahrzeuginnengeräuschen*. Plenarvorträge und Fachbeiträge der 21. Deutschen Jahrestagung für Akustik, Fortschritte der Akustik, DAGA '95, Dt. Gesell. für Akustik e. V., Saarbrücken, S. 879–882, 1995.
- [90] Hansen, H. und R. Weber: *Semantic evaluations of noise with tonal components in Japan, France, and Germany: A cross-cultural comparison*. Journal of the Acoustical Society of America, 125(2):850–862, 2009.
- [91] Hashimoto, T.: *Sound quality approach on the vehicle interior and exterior noise - Quantification of frequency related attributes and impulsiveness*. Journal of the Acoustical Society of Japan, 21(6):337–340, 2000.
- [92] Haverkamp, M.: *Synästhetische Wahrnehmung und Geräuschdesign*, S. 115–141, In: Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II. Expert Verlag Renningen, 2002.
- [93] Höchstetter, M., M. Rolle, J.M. Sautter und B.A. Hemmrich: *Methode zur psychoakustischen Prognose singular impulshafter Geräusche*, Patent, amtliches Aktenzeichen 102014212733.5, 2014.
- [94] Höchstetter, M., M. Rolle, J.L. Verhey und U. Gabbert: *Physikalische und psychoakustische Vorhersage von singular impulshaften Geräuschen*. 8. Symposium Motor- und Aggregateakustik, Magdeburg, Deutschland, 2014.
- [95] Höchstetter, M., J.M. Sautter, U. Gabbert und J.L. Verhey: *Predicting the perceived Quality of impulsive Vehicle sounds*. Proceedings of the Euronoise 2015, Maastricht, Niederlande, 2015.
- [96] Höchstetter, M., M. Wackerbauer, J. Verhey und U. Gabbert: *Psychoacoustic prediction of singular impulsive sounds*. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 07/08, 2015.
- [97] Heeren, W., J. Rennies und J.L. Verhey: *Spectral loudness summation of nonsimultaneous tone pulses*. Journal of the Acoustical Society of America, 130(6):3905–3915, 2011.
- [98] Heinemann, G.W.: *Reden und Schriften: Allen Bürgern verpflichtet: Reden des Bundespräsidenten 1969-1974*. Suhrkamp, 1975.
- [99] Heldmann, K.: *Wahrnehmung, gehörgerechte Analyse und Merkmalsextraktion technischer Schalle*. VDI- Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [100] Hellbrück, J. und W. Ellermeier: *Hören: Physiologie, Psychologie und Pathologie*. 2. Hogrefe, Göttingen, 2004.
- [101] Herrmann, T. und W.H. Tack: *Methodologische Grundlagen der Psychologie*. Hogrefe-Verlag GmbH & Co. KG, Göttingen, 1994.

- 
- [102] Huth, C., H. Fastl, U. Widmann und G. Hölzl: *Sound quality design for high-speed trains' indoor noise: Psychoacoustic evaluation of tonal components*. Journal of the Acoustical Society of America, 105:1280, 1999.
  - [103] Ishimitsu, S., K. Sakamoto, T. Arai, T. Yoshimi, Y. Fujimoto und K. Kawasaki: *A study of evaluating the button sounds*. Proceedings of the Euronoise 2008, Paris, Frankreich, S. 3153–3158, 2008.
  - [104] ISO 532 B: *Acoustics - Method for calculating loudness level*, 1975.
  - [105] ISO/DIS 10845: *Akustik - Frequenzbewertung 'A' für Geräuschmessungen*, 1995.
  - [106] Jekosch, U.: *Basic Concepts and Terms of Quality, Reconsidered in the Context of Product Sound-Quality*. Acta Acustica united with Acustica, 90:999–1006, 2004.
  - [107] Jekosch, U.: *Assigning Meaning to Sounds - Semiotics in the Context of Product-Sound Design*, Kap. 8, S. 193–221, In: Sound-Engineering im Automobilbereich; Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
  - [108] Jekosch, U. und J. Blauert: *A semiotic approach towards product sound quality*. Proceedings of the Inter-Noise 96, Liverpool, Großbritannien, S. 2283–2286, 1996.
  - [109] Jeon, J. Y.: *Subjective Evaluation of Floor Impact Noise based on the Model of ACF/IACF*. Journal of Sound and Vibration, 241:147–155, 2001.
  - [110] Jeon, J. Y., J. H. Jeong und Y. Ando: *Objective and subjective evaluation of floor impact noise*. Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment, 2(1):20–28, 2002.
  - [111] Kaiser, H. F.: *The application of electronic computers to factor analysis*. Educational and Psychological Measurement, 20:141–151, 1960.
  - [112] Kebeck, G.: *Wahrnehmung: Theorien, Methoden und Forschungsergebnisse der Wahrnehmungspsychologie*. Juventa-Verlag, Weinheim, 1997.
  - [113] Kendall, M. G.: *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin & Company Limited, London, 1948.
  - [114] Killion, M.: *Revised Estimate of Minimum Audible Pressure: Where ist the Missing 6 dB*. Journal of the Acoustical Society of America, 63:1501–1510, 1978.
  - [115] Kuwano, S., H. Fastl, S. Namba, S. Nakamura und H. Uchida: *Quality of door sounds of passenger cars*. Acoustical Science and Technology, 27:309–312, 2006.
  - [116] Kuwano, S. und S. Namba: *Dimensions of Sound Quality and Their Measurement*. Proceedings of the 17th International Congress on Acoustics, Rom, Italien, 2001.



- 
- [117] Kuwano, S., S. Namba und H. Fastl: *On the judgment of loudness, noisiness and annoyance with actual and artificial noises*. Journal of Sound and Vibration, 127(3):457–465, 1988.
- [118] Kuwano, S., S. Namba und S. Hato: *Psychologische Bewertung von Lärm in Personenkraftwagen: Analyse nach Nationalität, Alter und Geschlecht*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 41:78–83, 1994.
- [119] Kuwano, S., S. Namba, H. Miura und H. Tachibana: *Evaluation of the loudness of impulsive sounds using sound exposure level based on the results of a round robin test in Japan*. Journal of the Acoustical Society of Japan, 8:241–247, 1987.
- [120] Kuwano, S., S. Namba und T. Yamasaki: *Effect of temporal pattern of non-steady state sounds on loudness*. Journal of the Acoustical Society of Japan, 12:229, 1991.
- [121] Liebing, R.: *Akustische Bewertungsverfahren für transiente Funktionsgeräusche*. Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2009.
- [122] Liebing, R. und R. Weber: *Subjektive Bewertung von instationären Funktionsgeräuschen in der Fahrzeugakustik*. Fortschritte der Akustik, DAGA '05, Dt. Gesell. für Akustik e. V., München, S. 405–406, 2005.
- [123] Liefold, S., F. Duvinneau und M. Höchstetter: *Sound quality of engine encapsulations*. Automobiltechnische Zeitschrift, 06, 2015.
- [124] Likert, R.: *A technique for the measurement of attitudes*. Archives of Psychology, 22:136–165, 1932.
- [125] List, H.: *Der Fahrzeugantrieb*. Springer-Verlag Wien, 2010.
- [126] Luce, R. D.: *The Choice Axiom after Twenty Years*. Journal of Mathematical Psychology, 15:215–233, 1977.
- [127] Lyon, R. H.: *Designing for Product Sound Quality, Mechanical Engineering*. New York, NY, USA: Marcell Dekker, 2000.
- [128] Marshall, A. und P. Davies: *A semantic differential study of low amplitude supersonic aircraft noise and other transient sounds*. Proceedings of the 23th International Congress on Acoustics, Madrid, Spanien, 2007.
- [129] Moore, B. C. J.: *Parallels between frequency selectivity measured psychophysically and in cochlear mechanics*. Scandinavian Audiology Supplementum, 25:139–152, 1986.
- [130] Moore, B. C. J.: *Psychology of Hearing*. Brill Academic Publishers, Inc., 2013.
- [131] Moore, B. C. J. und B. R. Glasberg: *A Model of Loudness Perception Applied to Cochlear Hearing Loss*. Auditory Neuroscience, 3:289–311, 1997.

- 
- [132] Morel, J., D. Marquis-Favre, C. and Dubois und M. Pierrette: *Road Traffic in Urban Areas: A Perceptual and Cognitive Typology of Pass-By Noises*. Acta Acustica united with Acustica, 98:166–178, 2011.
  - [133] Möser, M.: *Technische Akustik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
  - [134] Namba, S., S. Kuwano, A. Schick, A. Aclar, M. Florentine und Z. D. Rui: *A cross-cultural study on noise problems; comparison of the results obtained in Japan, West Germany, the USA, China and Turkey*. Journal of Sound and Vibration, 151(3):471–477, 1991.
  - [135] Namba, S., C. G. Rice und T. Hashimoto: *The loudness of decaying impulsive sounds*. Journal of Sound and Vibration, 116:491–507, 1987.
  - [136] Niwa, F.: *Überlegungen über Entscheidungen beim Paarvergleich mit sukzessiven Kategorien : (a) Auswertung der Entscheidungen und (b) Analyse intraindividuel-ler Inkonsistenz*. Dissertation, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät, Universität Heidelberg, 1975.
  - [137] Onishi, G., S. Ishimitsu und K. Sakamoto: *Study of Evaluating the Button Sounds Impression Evaluation Model for Button Sounds Using a Neural Network*. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, 77:2290–2299, 2011.
  - [138] Osgood, C.: *The nature and measurement of meaning*. Psychological Bulletin, 49:197–237, 1952.
  - [139] Osgood, C., G. J. Suci und P. H. Tannenbaum: *The Measurement of Meaning*. Urbana: University of Illinois Press, 1975.
  - [140] Otto, N., S. Amman, C. Eaton und S. Lake: *Guidelines for Jury Evaluations of Automotive sounds*. Journal of Sound and Vibration, 35:24–47, 1999.
  - [141] Parizet, E., E. Guyader und V. Nosulenko: *Analysis of car door closing sound quality*. Applied Acoustics, 69:12–22, 2008.
  - [142] Patsouras, C.: *Geräuschqualität von Fahrzeugen - Beurteilung, Gestaltung und multimodale Einflüsse*. Dissertation, Lehrstuhl für Mensch- Machine- Kommuni-kation, Technische Universität München, 2003.
  - [143] Patsouras, C., T. Filippou, H. Fastl, D. Patsouras und K. Pfaffelhuber: *Semanti-sches Differential versus psychoakustische Empfindungsgrößen bei Außenstand-geräuschen von Fahrzeugen der oberen Mittelklasse*. Fortschritte der Akustik, DAGA '02, Dt. Gesell. für Akustik e. V., Bochum, S. 154–155, 2002.
  - [144] Pearson, K.: *Mathematical contribution to the theory of evolution*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, S. 1–47, 1900.

- 
- [145] Pedersen, E., F. Van Den Berg, R. Bakker und J. Bouma: *Response to noise from modern wind farms in the Netherlands*. Journal of the Acoustical Society of America, 126:634–643, 2009.
  - [146] Pedersen, E. und P. Waye: *Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments*. Occupational and Environmental Medicine, 64:480–486, 2007.
  - [147] Persson-Waye, K. und E. Öhrström: *Psycho-acoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise*. Journal of S, 250:65–73, 2002.
  - [148] Petniunas, A., N. Otto, S. Amman und R. Simpson: *Door system design for improved closure sound quality*. SAE Technical Paper 1999-01-1681, 1999.
  - [149] Pfäfflin, B., H. M. Gerhard, P. Ehinger, R. Herrmann, H. Bathelt, M. Scheinhardt und J. Krüger: *Geräuschgestaltung*, Kap. 9, S. 427–500, In: Sound–Engineering im Automobilbereich; Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
  - [150] Pletschen, B.: *Akustikgestaltung in der Fahrzeugentwicklung*, Kap. 3, S. 89–108, In: Sound–Engineering im Automobilbereich; Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
  - [151] Rennies, J., I. Holube und J. L. Verhey: *Loudness of speech and speech-like signals*. Acta Acustica united with Acustica, 99:268–282, 2013.
  - [152] Rennies, J., J. L. Verhey, J. Chalupper und H. Fastl: *Modeling temporal effects of spectral loudness summation*. Acta Acustica united with Acustica, 95:1112–1122, 2009.
  - [153] Rennies, J., J. L. Verhey und H. Fastl: *Modellierung der Dynamik der spektralen Lautheitssummation*. In: Jekosch, U. und R. Hoffmann (Hrsg.): *Fortschritte der Akustik, DAGA '08, Dt. Gesell. für Akustik e. V., Dresden*, S. 449–450. Berlin, 2008.
  - [154] Roberts, J., R. Jones, N. Mansfield und S. Rothberg: *Evaluation of impact sound on the feel of a golf shot*. Journal of Sound and Vibration, 287:651–666, 2005.
  - [155] Robles, L., M. A. Ruggero und N. C. Rich: *Basilar membrane mechanics at the base of the chinchilla cochlea. I. Input output functions, tuning curves, and response phases*. Journal of the Acoustical Society of America, 80:1364–1374, 1986.
  - [156] Roederer, J. G.: *Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
  - [157] Ross, R. T.: *Scaling: A Sourcebook for Behavioral Statistics*. Aldine Publishing Company, 1974.

- 
- [158] Rossi, F. und A. Nicolini: *Psychoacoustic analysis of squeaking and rattling noises inside vehicle cabins*. Noise Control Engineering Journal, 58:441–454, 2010.
- [159] Rousson, V., T. Gasser und B. Seifert: *Assessing intrarater, interrater, and test-retest reliability of continuous measurements*. Statistics in Medicine, 21:3431–3446, 2002.
- [160] Scheibner, P.: *Ökonomische Objektivierung von elektromechanischen Funktionsgeräuschen*. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2011.
- [161] Schermer, F. J.: *Grundlagen der Psychologie*. Kohlhammer, 3. Aufl., 2011.
- [162] Schmaderer, M.: *Auswirkung physikalisch veränderter Parameter des Schließsystems auf die subjektive Wahrnehmung*. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Deggendorf, Januar 2014.
- [163] Schmidtke, H.: *Handbuch der Ergonomie: mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien*. Nr. Bd. 5 in *Handbuch der Ergonomie: mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien*. C. Hanser, 1989.
- [164] Schünke, M., E. Schulte und U. Schumacher: *Prometheus - LernAtlas der Anatomie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2011.
- [165] Schulte-Fortkamp, B. und A. Fiebing: *Soundscape analysis in a residential area: an evaluation of noise and people's mind*. Acta Acustica united with Acustica, 92:875–880, 2006.
- [166] Seifert, P.: *Untersuchung synthetisch bearbeiteter Signalparameter zur Prognose der auditiven Wahrnehmung singulärer, impulshafter Geräusche*. Bachelorarbeit, Hochschule für Telekommunikation Leipzig, Juni 2014.
- [167] Sheikh, M. A. und S. E. Lee: *Train noise - A psychoacoustic investigation for indoor aural comfort in high-rise urban environment in the tropics*. Proceedings Inter-Noise 2014, Melbourne, Australia, 2014.
- [168] Sheskin, D. J.: *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*. Crc Press Inc., 2011.
- [169] Sixtl, F.: *Meßmethoden der Psychologie*. Verlag Julius Beltz, Weinheim, 1967.
- [170] Skovenborg, E. und S. H. Nielsen: *Evaluation of different loudness models with music and speech material*. Proceedings of the 117th AES Convention, 2004.
- [171] Snare, T. C.: *Kulturübergreifende Untersuchung des auditiven Qualitätsempfindens von Funktionsgeräuschen an Kraftfahrzeuge*. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Ingolstadt, Juni 2015.

- 
- [172] Sontacci, A.: *Entwicklung eines Modulkonzeptes für die psychoakustische Geräuschanalyse unter Matlab*. Diplomarbeit, Kunstuniversität Graz, Diplomarbeit, 1998.
  - [173] Sottek, R.: *Gehörgerechte Rauigkeitsberechnung*. Fortschritte der Akustik, DAGA '94, Dt. Gesell. für Akustik e. V., Dresden, 1994.
  - [174] Sottek, R. und K. Genuit: *Models of signal processing in human hearing*. International Journal of Electronics and Communications, 59:157–165, 2005.
  - [175] Sottek, R., P. Vranken und G. Busch: *Ein Modell zur Berechnung der Impulshaltigkeit*. Fortschritte der Akustik, DAGA '95, Dt. Gesell. für Akustik e. V., Saarbrücken, S. 791–794, 1995.
  - [176] Steffens, J.: *Urteilsbildung bei der subjektiven Bewertung des Innengeräuschs von Elektrofahrzeugen*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 6:133–135, 2012.
  - [177] Stevens, S. S.: *On the Theory of Scales of Measurement*. Science, 103:677–680, 1946.
  - [178] Stevens, S. S.: *Handbook of experimental psychology*. Wiley, New York, 1951.
  - [179] Stevens, S. S.: *The Measurement of Loudness*. Journal of the Acoustical Society of America, 27:815–829, 1955.
  - [180] Steyer, R. und M. Eid: *Messen und Testen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
  - [181] Suzuki, Y. und T. Sone: *Frequency Characteristics of Loudness Perception: Principles and Applications*, S. 193–221, In: Contributions to Psychological Acoustics. Oldenburg: Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg, 1994.
  - [182] Suzuki, Y. und H. Takeshima: *Equal-loudness-level contours for pure tones*. Journal of the Acoustical Society of America, 116:918–933, 2004.
  - [183] Swift, S. H. und K. L. Gee: *Examining the use of a time-varying loudness algorithm for quantifying characteristics of nonlinearly propagated noise (L)*. Journal of the Acoustical Society of America, 129:2753–2756, 2011.
  - [184] Terhardt, E.: *Über akustische Rauigkeit und Schwankungsstärke*. Acustica, 20:215 – 224, 1968.
  - [185] Terhardt, E.: *Wohlklang und Lärm aus psychophysikalischer Sicht*. Ergebnisse des 3. Oldenburger Symposions zur Psychologischen Akustik, S. 403–409, 1984.
  - [186] Terhardt, E.: *Akustische Kommunikation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998.
  - [187] Terhardt, E. und G. Stoll: *Skalierung des Wohlklangs von 17 Umweltschallen und Untersuchung der beteiligten Hörparameter*. Acustica, 48:247–253, 1981.

- 
- [188] Thurstone, L. L.: *A Law of comparative Judgment*. Psychological Review, 101:266–270, 1994.
- [189] Tversky, A. und J. E. Russo: *Substitutability and similarity in binary choices*. Journal of Mathematical Psychology, 6:1–12, 1969.
- [190] Verhey, J. L., J. Hots und J. Rennies: *Loudness of time-varying environmental sounds: Still a challenge for current loudness models?* Proceedings of the Euronoise 2015, Maastricht, Niederlande, 2015.
- [191] Verhey, J. L. und B. Kollmeier: *Spectral loudness summation as a function of duration*. Journal of the Acoustical Society of America, 111:1349–1358, 2002.
- [192] Verhey, J. L. und M. Uhlemann: *Spectral loudness summation of sequences of short noise bursts*. Journal of the Acoustical Society of America, 123:925–934, 2008.
- [193] Vo, Q. und W. Sebbes: *Entwicklung eines subjektiv angenehmen Innengeräusches*. Automobiltechnische Zeitschrift, 95:508–519, 1993.
- [194] Vogel, A.: *Ein gemeinsames Funktionsschema zur Beschreibung der Lautheit und der Rauigkeit*. Biological Cybernetics, 18:31–40, 1975.
- [195] Watanabe, T. und H. Moller: *Hearing Thresholds and Equal Loudness Contours in Free Field at Frequencies below 1 kHz*. Journal of Low Frequency Noise and Vibration, 9:135–148, 1990.
- [196] Weber, E. H.: *De Pulsu, Resorptione, Auditu Et Tactu. Annotationes Anatomicae Et Physiologicae*. Köhler, Leipzig, 1834.
- [197] Wertheimer, M.: *Über Gestalttheorie*. Philosophische Zeitschrift für Forschung und Aussprache, 1:39–60, 1925.
- [198] Widmann, U.: *Ein Modell der Psychoakustischen Lästigkeit von Schallen und seine Anwendung in der Praxis der Lärmbeurteilung*. Dissertation, Technische Universität München, 1992.
- [199] Widmann, U.: *Evaluation of noise emissions of cars based on loudness*. Proceedings Inter-Noise 1996, Liverpool, Großbritannien, S. 2205–2210, 1996.
- [200] Widmann, U.: *Scaling annoyance of street traffic noise as a function of loudness and speech intelligibility*. Proceedings Inter-Noise 1996, Liverpool, Großbritannien, S. 2215–2220, 1996.
- [201] Willemsen, A. M. und M. D. Rao: *Characterization of sound quality of impulsive sounds using loudness based metric*. Proceedings of the 20th International Congress on Acoustics, Sydney, Australien, 5:3397–3404, 2010.

- 
- [202] Wirtz, M. und F. Caspar: *Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität*. Hogrefe- Verlag, Göttingen, 2002.
- [203] Yates, G.: *Basilar membrane nonlinearity and its influence on auditory nerve rate-intensity functions*. Hearing Research, 50:145–162, 1990.
- [204] Zeller, P.: *Handbuch Fahrzeugakustik*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [205] Zumbo, B. D., A. M. Gadermann und C. Zeisser: *Ordinal versions of coefficient Alpha and Theta for Likert rating scales*. Journal of Modern Applied Statistical Methods, 6:21–29, 2007.
- [206] Zwicker, E.: *Über psychologische und methodische Grundlagen der Lautheit*. Acustica, 8:237–258, 1958.
- [207] Zwicker, E.: *Die Zeitkonstanten (Grenzdauern) des Gehörs*. Zeitschrift für Hörgeräte-Akustik, 13:82–102, 1974.
- [208] Zwicker, E.: *Procedure for calculating loudness of temporally variable sounds*. Journal of the Acoustical Society of America, 62:675–682, 1977.
- [209] Zwicker, E.: *Psychoakustik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1982.
- [210] Zwicker, E. und H. Fastl: *Psychoacoustics: Facts and Models*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 3. Aufl., 2007.
- [211] Zwicker, E., H. Fastl und C. Dallmayr: *BASIC-Programm for Calculating the Loudness of Sounds from their 1/3-Octave Band Spectra According to ISO 532B*. Acustica, 55:63–67, 1984.
- [212] Zwicker, E., G. Flottorp und S. S. Stevens: *Critical band width in loudness summation*. Journal of the Acoustical Society of America, 29:548–557, 1957.





## Online-Shops



**Fachliteratur und mehr -  
jetzt bequem online recher-  
chieren & bestellen unter:  
[\*\*www.vdi-nachrichten.com/\*\*](http://www.vdi-nachrichten.com/)  
**Der-Shop-im-Ueberblick****



**Täglich aktualisiert:  
Neuerscheinungen  
VDI-Schriftenreihen**



Im Buchshop von [vdi-nachrichten.com](http://vdi-nachrichten.com) finden Ingenieure und Techniker ein speziell auf sie zugeschnittenes, umfassendes Literaturangebot.

Mit der komfortablen Schnellsuche werden Sie in den VDI-Schriftenreihen und im Verzeichnis lieferbarer Bücher unter 1.000.000 Titeln garantiert fündig.

Im Buchshop stehen für Sie bereit:

**VDI-Berichte** und die Reihe **Kunststofftechnik**:

Berichte nationaler und internationaler technischer  
Fachtagungen der VDI-Fachgliederungen

### Fortschritt-Berichte VDI:

Dissertationen, Habilitationen und Forschungsberichte  
aus sämtlichen ingenieurwissenschaftlichen Fachrich-  
tungen

### Newsletter „Neuerscheinungen“:

Kostenfreie Infos zu aktuellen Titeln der VDI-Schriftenreihen bequem per E-Mail

### Autoren-Service:

**Umfassende Betreuung bei der Veröffentlichung Ihrer Arbeit in der Reihe Fortschritt-Berichte VDI**

### Buch- und Medien-Service:

Beschaffung aller am Markt verfügbaren Zeitschriften, Zeitungen, Fortsetzungsreihen, Handbücher, Technische Regelwerke, elektronische Medien und vieles mehr – einzeln oder im Abo und mit weltweitem Lieferservice

## Die Reihen der Fortschritt-Berichte VDI:

- 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente
  - 2 Fertigungstechnik
  - 3 Verfahrenstechnik
  - 4 Bauingenieurwesen
- 5 Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
  - 6 Energietechnik
  - 7 Strömungstechnik
- 8 Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
  - 9 Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
  - 10 Informatik/Kommunikation
  - 11 Schwingungstechnik
- 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
  - 13 Fördertechnik/Logistik
- 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik
  - 15 Umwelttechnik
  - 16 Technik und Wirtschaft
- 17 Biotechnik/Medizintechnik
- 18 Mechanik/Bruchmechanik
- 19 Wärmetechnik/Kältetechnik
- 20 Rechnerunterstützte Verfahren (CAD, CAM, CAE CAQ, CIM ...)
  - 21 Elektrotechnik
  - 22 Mensch-Maschine-Systeme
- 23 Technische Gebäudeausrüstung

ISBN 978-3-18-379612-3