

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 Me-  
thodik 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
$E_{THRQ}$	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
$N_{t,ft}$	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 [ $N \frac{s}{m^3}$ ]
$n C_3$	Maximale Anzahl zirkulärer Triaden
${}_x R_i^n$	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]
$f_m$	Bandmittenfrequenz [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 (psychoacoustic annoyance)
RPC	Rapid Prototyping Center (BMW AG)

---

## Konstanten

---

$$I_0 = 10^{-12} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad \text{Bezugsschallintensität}$$

$$P_0 = 20^{-6} \quad [Pa] \quad \text{Bezugsschalldruck}$$

$$Z_0 = 400 \quad \left[ N \frac{s}{m^3} \right] \quad \text{Schallkennimpedanz}$$

# 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.