

Terzspektrenbasierte Bewertung der Tonhaltigkeit von Schienenfahrzeuggeräuschen

Verfahrensentwicklung und -validierung
aus Laborstudien

vorgelegt von
Diplom-Ingenieurin
Dorothea Salz
aus Wissen/Sieg

Von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktorin der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Peter Mnich
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht
Gutachter: Prof. Dr. Brigitte Schulte-Fortkamp

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 4. November 2005

Berlin 2006
D83

Berichte aus der Akustik

Dorothea Salz

**Terzspektrenbasierte Bewertung der Tonhaltigkeit
von Schienenfahrzeuggeräuschen**

Verfahrensentwicklung und -validierung aus Laborstudien

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5823-X

ISBN-13: 978-3-8322-5823-8

ISSN 1611-1303

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Ein Dank an alle, die mich auf dem Weg zu meiner Promotion begleitet und unterstützt haben.

Herrn Prof. Hecht für seine Unterstützung, die diese Arbeit erst ermöglicht hat, und seine stets konstruktive Kritik, die mir sehr geholfen hat. Frau Prof. Schulte-Fortkamp für die kontinuierliche Förderung meiner Arbeit, insbesondere für ihre motivierenden und wertvollen Anregungen, die mich ermutigt und vorangebracht haben. Herrn Prof. Mnich für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Sebastian Roßberg und Thomas Thron, dass sie als Thema für ihre Diplom- bzw. Studienarbeit die Bewertung tonhaltiger Schienenfahrzeuggeräusche gewählt haben: Die gemeinsame Beschäftigung mit diesem anspruchsvollen Thema war ein wesentlicher Baustein dieser Arbeit und hat zudem viel Spaß gemacht. Auch weiteren Fachkollegen – insbesondere Matthias Vormann, Christoph Eichenlaub und Thomas Dreesen – für den Austausch, dieser war sehr wertvoll für das Entstehen dieser Arbeit. Meinen Kolleginnen und Kollegen des Fachgebietes Schienenfahrzeuge für ihre Hilfsbereitschaft und die gute Laune.

Für das Korrekturlesen der Arbeit und Anregungen Katrin Kusche, Juan Fernández, Marc Wiemers, Yacin Ben Othman, Thomas Thron und Christoph Schärpermeier. Bei allen Versuchspersonen für ihre bereitwillige Teilnahme an meinen Hörversuchen. Meinen Eltern für ihre Unterstützung, insbesondere für die schönen Aufenthalte meines Sohnes Matthias bei Ihnen. Bei Matthias und meinem Freund Steffen dafür, dass sie mich immer wieder von meiner Arbeit abgehalten und auf andere Gedanken gebracht haben.

Summary

The newly developed third-octave band based assessment of the analyzed railway sounds with tonal components results in highly significant correlations (up to -0,906) between the calculated tonality values and the subjective tonality judgements. Thus, the research reported here reveals potentials of third-octave band spectra for the tonality assessment of railway sounds. Moreover, the work contributes to extend the understanding of the percipience of railway sounds with tonal components. The developed third-octave band based procedures for the assessment of railway sound tonality were faced to results from psychoacoustic laboratory studies about tonality and annoyance. The results of existing procedures for the determination of tonality (DIN 45681 (2002), procedures of prominence ratio and determination of the tonality with Artemis[©] based on publications by Terhardt and Aures) were regarded comparatively. Third-octave band spectra were used as the basis of evaluation, since sound data in the form of third-octave band spectra are often simpler to receive than sound data for a narrow-band analysis. The development of the new third-octave band spectra based procedures integrates the findings on the percipience of tonality (Kapitel 2.1.2.2) as well as the results of laboratory studies (Kapitel 4).

The principal component analyses of the individual ranking for the judgements of paired comparison regarding tonality and annoyance lead to maximally 5 factors which make clear the judgement area of the experimental subjects (see Kapitel 4.1.2.4). The first factor, which covers the largest judgement range in each case, exhibits between 42 % and 76 % of the data's variance in the single runs. Hence, the first factor is of outstanding importance for the judgement behaviour. The first factor of the tonality examinations can be assigned to different sound parameters of tonality. For single runs of the study, factors 2 and 3 can be explained even by means of further psychoacoustic parameters, such as sharpness. The results of the study B show that railway sounds, which have been assessed as more tonal, are usually also rated as more annoying (Kapitel 4.3.3.1). This coincides with the findings of Klemenz (2005). He stresses the tonality as a quantity of which increases the annoyance of railway sounds - due to traction in this case. The judgement behaviour of annoyance, however, is not only determined by tonality but also by further psychoacoustic and contextual parameters (Kapitel 4.3.2.1).

For a selection of 18 different noises – 14 of them modified and original railway noises –, very high and significant correlations between the subjective evaluation of the tonality of the noises and the tonality values computed by means of the new third-octave band based procedures could be proven. Here, we have the evidence that railway sounds, which contain tonal components, can be evaluated correctly by means of third-octave band spectra. Not only sounds with tonal components

which fall in two adjacent third-octave bands were included in the evaluation but also sounds with tonal components in the frequency range from 40 Hz to 200 Hz.

The results of one-third-octave band-based assessment variants, which include spectral masking ISO 532 (1975), the tonal threshold according to Pollack (1948), and a separate analysis of the outstand in the spectrum of two adjacent third-octave bands, explain the judgements of the experimental subjects better than variants, which do not consider this. Fragmentation of the entire signal into pieces of 1 second and the following analysis of the third-octave band spectra were found to be successful for the examination of time varying signals. The maximum value is recommended as summarizing parameter for the tonality values of the third-octave band spectra of the 1 sec fragments because it generally produces the best results. The advantage of a frequency-dependent evaluation - based on ISO/DIS 1996-2 (2003) - becomes clear when it is compared to a frequency-independent evaluation as it was developed based on DIN prEN ISO 3095 (2001). The calculation according to the variant „WOB15_K2“ (see Kapitel 5) crystallized particularly recommendable. This variant correlates very significantly with -0,890 to the subjective tonality judgements.

For existing tonality assessment procedures, high and significant correlations (see to Tabelle C.43) are obtained to the results of the already performed studies, if only the rough stationary sounds are included into the analysis. The analysis of all sounds of study A and B – including the strong instationary sounds – proves that in the evaluation of the total sound starting and braking in particular are underestimated when using the existing procedures of tonality assessment (Abbildung 4.30). These procedures are not intended for strong instationary sounds.

The high and significant correlations between assessment procedures and the subjective judgements alone are not sufficient to make a statement on suitable tonal adjustments. The determined values according to DIN 45681 (2002) for the two analyzed broad band noise signals (see Kapitel 4.4.2) allow for a clue how the determined tonality values can build up a basis for tonal adjustments in dB.

The evaluation of the comments after the Grounded Theory (Strauss (1991)) leads to different categories. Inquiring these categories allows insights into the perception of tonality. That finally results in a better understanding of percipience and judgement patterns become clearer. The experimental subjects emphasize the stronger annoyance of high-pitched tones and are able to describe their way of acting with the comparative assessment (Kapitel 4.3.2.3).

All the hypotheses made (Kapitel 3.1) without hypothesis II were confirmed by the results of the study (Kapitel 4.4.4). The present work could show that third-octave

band based procedures offer great potentials for the assessment of railway sounds with tonal components. Some of the developed third-octave band based procedures represent very good solutions for the assessment of the examined railway sounds with tonal components. Using these procedures allows the evaluation of tonality of railway sounds at rather small expenditure. Preferably, calculations should be made by means of a computer program. In particular, the procedure „WOB15_K2“ (see Kapitel 5) is recommended for assessment.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Hintergrund der Forschung	1
1.2	Ziele und Struktur der Arbeit	2
2	Grundlagen der Tonhaltigkeit und deren Bestimmung	5
2.1	Wahrnehmen, Tonhaltigkeit und Unangenehmheit	5
2.1.1	Wahrnehmen	5
2.1.2	Tonhaltigkeit	6
2.1.2.1	Begriffe	6
2.1.2.2	Wahrnehmen der Tonhaltigkeit	7
2.1.3	Unangenehmheit	15
2.2	Bekannte Verfahren zur Bewertung der Tonhaltigkeit	16
2.2.1	Subjektive Verfahren nach Höreindruck	16
2.2.2	Tone-to-Noise-Ratio-Verfahren	16
2.2.2.1	Tone-to-Noise-Ratio nach DIN 45681	16
2.2.2.2	Tone-to-Noise-Ratio nach ISO/DIS 1996-2	17
2.2.3	Prominence-Ratio-Verfahren	17
2.2.3.1	Prominence-Ratio-Verfahren nach ANSI	17
2.2.3.2	Prominence-Ratio-Verfahren nach Nobile/Bienvenue	18
2.2.4	Existierende terzspektrenbasierte Verfahren	18
2.2.4.1	Australische Norm AS 1055.1	18
2.2.4.2	Normen DIN prEN ISO 3095 und DIN prEN ISO 3381	20
2.2.4.3	Hörbarkeit von Tönen nach ISO/DIS 1996-2 Annex D	21
2.2.4.4	Verfahren zur Beschreibung von Flugzeuggeräuschen	22
2.2.4.5	Geräusche des Nahverkehrs (VDV 154)	22
2.2.4.6	Tonhaltigkeit von Wärmepumpen	22
2.2.4.7	Bewertung der Tonhaltigkeit nach DIN 45680	23
2.2.4.8	Maschinengeräusche	23
2.2.5	Zusammenfassung	23

3	Vorstellung neuer terzspektrenbasierter Verfahren	25
3.1	Hypothesen	25
3.2	Konzeptionelles Vorgehen und Struktur der Verfahren	26
3.2.1	Eingrenzung des Anwendungsbereiches	27
3.2.2	Kriterien einer gehörgerechten Bewertung	27
3.2.3	Kriterien des Tonhaltigkeitswahrnehmens	28
3.3	Beschreibung der terzspektrenbasierten Berechnungen	29
4	Laborstudien und Ergebnisse	41
4.1	Hörversuche	41
4.1.1	Aufbau und Ablauf	41
4.1.2	Auswertung	43
4.1.2.1	Auswahl der auswertbaren Bewertungsbögen	43
4.1.2.2	Berechnung und Evaluation der Rangfolgen	44
4.1.2.3	Clusteranalyse	44
4.1.2.4	Faktorenanalyse und Korrelation	45
4.1.2.5	Betrachtete Geräuschparameter	45
4.1.2.6	Auswertung der Notizen und Kommentare	46
4.2	Studie A	46
4.2.1	Versuch	46
4.2.1.1	Versuchsgeräusche	47
4.2.1.2	Versuchspersonenklientel	50
4.2.2	Ergebnisse	50
4.2.2.1	Analyse des Beurteilungsverhaltens	50
4.2.2.2	Faktorenanalyse und Korrelationen	56
4.3	Studie B	60
4.3.1	Versuch	60
4.3.1.1	Versuchsgeräusche	60
4.3.1.2	Versuchspersonenklientel	63
4.3.2	Ergebnisse	65
4.3.2.1	Analyse des Beurteilungsverhaltens	65
4.3.2.2	Faktorenanalyse und Korrelationen	74
4.3.2.3	Kommentare	84
4.3.3	Diskussion	87
4.3.3.1	Vergleich der Tonhaltigkeits- und Unangenehmkeitsurteile	87
4.3.3.2	Ergebnisse des Runs 1 und Runs 2 der Studie B	90
4.4	Diskussion der Ergebnisse aus Studie A und Studie B	92
4.4.1	Zusammengefasste Faktorskala Tonhaltigkeit der Studien A und B	92
4.4.2	Einschätzung der Tonhaltigkeitswerte	108
4.4.3	Bewertung stationärer Geräusche	110

4.4.4	Prüfung der Hypothesen anhand der Ergebnisse	111
5	Fazit und Empfehlungen	117
6	Zusammenfassung und Ausblick	123
6.1	Zusammenfassung	123
6.2	Ausblick	125
7	Literaturverzeichnis	127
A	Geräuschparameter	133
B	Kommentare	137
C	Korrelationen	143
C.1	Studie A	143
C.2	Run 1 der Studie B	159
C.3	Run 2 der Studie B	175
C.4	Run 3 der Studie B	185
C.5	Run 4 der Studie B	195
C.6	Studie B	201
C.7	Studien A und B	218
C.8	Annähernd stationäre Geräusche der Studien A und B	234
C.9	Interkorrelationen	238