

Potenziale von Terzspektren zur Bewertung der Tonhaltigkeit: Analyse von Schienenfahrzeuggeräuschen und subjektiven Urteilen

Dorothea Salz¹, Markus Hecht¹, Brigitte Schulte-Fortkamp²

¹ *Fachgebiet Schienenfahrzeuge, 10587 Berlin, Email: Dorothea.Salz@TU-Berlin.de, Markus.Hecht@TU-Berlin.de*

² *Institut für Technische Akustik, 10587 Berlin, Deutschland, Email: Brigitte.Schulte-Fortkamp@TU-Berlin.de*

Einleitung

Bisher existiert kein Bewertungsverfahren für die Tonhaltigkeit, welches auf alle Arten der Schienenfahrzeuggeräusche anwendbar ist. Schienenfahrzeuggeräusche zeichnen sich beispielsweise häufig durch starke zeitliche Fluktuationen aus, so dass Verfahren für annähernd stationäre Geräusche nicht angewendet werden können. Terzspektren-Verfahren bieten die Chance, wesentliche Aspekte auch bei der Bewertung der Tonhaltigkeit zu erfassen und schnell Eingang in die Praxis zu finden.

Laborstudien und Ergebnisse

Grundlage für die Erfassung der subjektiven Empfindung der Tonhaltigkeit bilden zwei Laborstudien (Studie A und Studie B), aufgebaut nach der Methode des vollständigen Paarvergleichs mit Intermittierendem Lauten Denken. Insgesamt wurden 18 verschiedene Geräusche von 6 Sekunden Dauer verwendet und jeweils sowohl bezüglich ihrer Tonhaltigkeit als auch ihrer Unangenehmheit bewertet. Nach der Bewertung von 15 Geräuschpaaren hatten die Versuchspersonen 30 Sekunden Zeit, um zu notieren, was ihnen gerade durch den Kopf geht. Im direkten Anschluss an den Versuch wurden Gruppeninterviews mit 4 bis 7 Versuchspersonen durchgeführt.

Die Auswertung der mündlichen und schriftlichen Kommentare nach der Grounded Theory nach Strauss [1] lieferte Einblicke in die Urteilsstrategien zur Tonhaltigkeit und Unangenehmheit der Geräusche auch hinsichtlich der Bewertung stationärer und zeitlich fluktuierender Geräusche: z.B. wurden Töne höherer Frequenz häufig als unangenehmer beschrieben. Zudem zeigte sich, dass die Versuchspersonen sich in der Laborsituation erleben und dass der Kontext der Geräusche und ihre Erfahrungen in ihre Bewertungen einfließen.

In Studie A wurden 8 Schienenfahrzeuggeräusche und 2 kontextfremde Geräusche eingesetzt, die nicht auf gleiche Lautheit eingestellt waren. In Studie B wurden 8 Schienenfahrzeuggeräusche und 2 braune Rauschen mit gering und stark ausgeprägter tonaler Komponente bei 700Hz mit Lautheiten von 15sone bis 16,4sone eingesetzt. Aus einem „Basis-Schienenfahrzeuggeräusch“ wurden in dieser Studie sukzessive tonale Anteile entfernt. 96 normalhörende Versuchspersonen nahmen an den Versuchen teil.

Die ermittelten Einflussparameter auf das Tonhaltigkeitsempfinden fließen in die terzspektrenbasierten Ver-

fahren ein. Die Hauptkomponentenanalyse liefert für die Tonhaltigkeitsversuche 2 bis 4 wesentliche Faktoren (Tabelle 1).

	F 1	F 2	F 3	F 4
Studie A R1	42,0%	26,5%	15,7%	10,3%
Studie A R2	56,8%	17,4%	12,9%	
Studie B R1	75,7%	13,2%		
Studie B R2	48,0%	25,0%	12,1%	

Tabelle 1: Erklärte Varianz der ermittelten Faktoren F (>10%) der einzelnen Versuchsdurchläufe der Laborstudien

Für die Schienenfahrzeuggeräusche in Studie B zeigt sich deutlich: Je tonhaltiger die Geräusche eingestuft werden, desto unangenehmer werden sie beurteilt.

Vorgehen bei der Bewertung der Tonhaltigkeit mittels Terzspektren

Die Bewertung der Tonhaltigkeit von Schienenfahrzeuggeräuschen mittels Terzspektren baut auf drei Säulen auf:

- Eingrenzung des Anwendungsbereichs,
- Kriterien gehörgerechter Bewertung und
- Kriterien des Tonhaltigkeitswahrnehmens.

Der Anwendungsbereich beschränkt sich auf Schienenfahrzeuggeräusche, deren typische Geräuschsituationen und auf tonale Anteile im Bereich von 50Hz bis 6kHz. Im Sinne einer gehörgerechten Bewertung wurden sowohl die Tonschwelle nach Pollack [2] als auch die Frequenzmaskierung nach ISO 532 [3] einbezogen. Die entwickelten terzspektrenbasierten Verfahren können sowohl den zeitlichen Verlauf und die Frequenzlage von im Terzspektrum herausragenden Terzen als auch verschiedene Kennwerte zur Erfassung des dominierenden Tonhaltigkeitseindrucks in die Geräuschbewertung einbeziehen.

Um die Versuchsgeräusche auf der Basis von Terzspektren zu untersuchen, wurde jeweils das Gesamtgeräusch in zeitliche Abschnitte unterteilt. Im Anschluss daran wurden die Terzspektren der einzelnen zeitlichen Abschnitte folgendermaßen untersucht: Das Herausragen einer oder zweier Terzen aus dem Terzspektrum wurde definiert, für herausragende Terzen wurden Tonhaltigkeitswerte definiert und die Tonhaltigkeitswerte aller herausragenden Terzen wurden zu einem Wert für das gesamte Terzspektrum zusammengefasst (arithmetischer

Mittelwert, Maximum, Energetische Summe, Perzentilwerte, ...). Zum Schluss wurden die Werte aller Terzspektrum zu einem Tonhaltigkeitswert für das Gesamtgeräusch zusammengefasst. Zusammenfassende Parameter waren beispielsweise der arithmetische Mittelwert, dynamische Berechnungen entwickelt nach [4] und das Maximum.

Vergleich der Ergebnisse der terzspektrenbasierten Verfahren mit den subjektiven Urteilen zur Tonhaltigkeit

Exemplarisch werden im folgenden Ergebnisse vorgestellt: In Abbildung 1 sind Ergebnisse der terzspektrenbasierten Berechnungen zur Tonhaltigkeit vergleichend zu einer zusammengefassten Skala aus den Faktorwerten des Faktor 1 der subjektiven Tonhaltigkeitsbewertungen der beiden Laborstudien (Faktorskala Tonhaltigkeit) dargestellt.

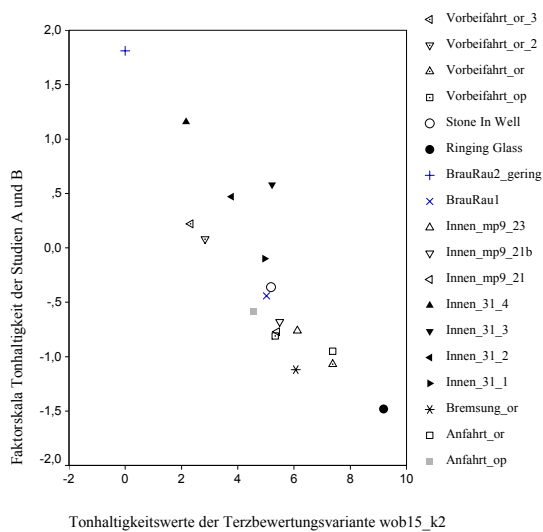


Abbildung 1: Tonhaltigkeit der Versuchsgeräusche: Variante mit frequenzabhängiger Tonhaltigkeitsschwelle (höchster Wert der Faktorskala entspricht der geringsten Tonhaltigkeit)

Die dargestellte terzspektrenbasierte Bewertungsvariante „wob15-k2“ führt zu Korrelationen von $-,890$ auf einem Signifikanzniveau von 0,01 (einseitige Signifikanz). Das Gesamtgeräusch wird bei dieser Variante in 1sec-Abschnitte unterteilt. Das Herausragen einer und auch zweier Terzen aus dem A-bewerteten Terzspektrum wird über die Differenz des Schalldruckpegels der untersuchten Terz(en) zum arithmetischen Mittelwert der Schalldruckpegelwerte der Nachbarterzen definiert und bezieht ein, ob die Tonschwelle überschritten und die jeweilige Terz nach [3] nicht verdeckt ist. Die Tonhaltigkeitswerte aller Terzen eines Terzspektrums werden zusammengefasst als Maximum zu dem die Summe der weiteren Tonhaltigkeitswerte, multipliziert mit 0,15, addiert wird. Das Maximum aller Terzspektrumenwerte liefert den Wert für das Gesamtgeräusch. Zur Definition des Tonhaltigkeitswertes werden frequenzabhängige Tonhaltigkeitsschwellen festgelegt. Diese liegen bis 160Hz bei 12dB(A), bis 400Hz bei 6dB(A) und bis 10kHz bei 3dB(A).

Legt man zum Vergleich unter Beibehaltung aller anderen Vorgehensschritte die Tonhaltigkeitsschwelle auf einen Wert von 5dB(A) fest (Bewertungsvariante „wog15-k2“), so ergeben sich deutlich geringere Korrelationen von $-,652$ auf einem Signifikanzniveau von 0,01 (einseitige Signifikanz). Es zeigt sich in Abbildung 2, dass die berechneten Tonhaltigkeitswerte von Schienenfahrzeuggeräusche mit hohen tonalen Anteilen im Frequenzbereich von 50Hz bis 200Hz (Innen_31_1, etc.) im Vergleich zu den anderen Geräuschen zu hoch bewertet werden.

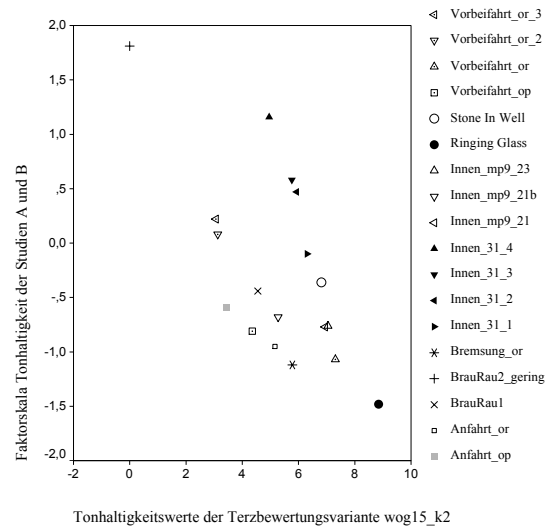


Abbildung 2: Tonhaltigkeit der Versuchsgeräusche: Variante mit frequenzunabhängiger Tonhaltigkeitsschwelle (höchster Wert der Faktorskala entspricht der geringsten Tonhaltigkeit)

Zusammenfassung

Die mittels terzspektrenbasierter Verfahren berechneten Tonhaltigkeiten weisen signifikant hohe Korrelationen zu den Urteilen der psychoakustischen Versuche auf. Mit Bewertungen bei denen das Gesamtgeräusch in 1sec-Abschnitte unterteilt wird und als zusammenfassender Wert für das Gesamtgeräusch das Maximum der Tonhaltigkeitswerte der einzelnen Terzspektrumen gewählt wird, werden Korrelationen zu einer zusammengefassten Skala der Tonhaltigkeit von bis zu $-,890^{**}$ nachgewiesen.

Literatur

- [1] Grundlagen qualitativer Sozialforschung - Datenanalyse und Theoriebildung in der empirischen soziologischen Forschung. Wilhelm Fink Verlag, München, 1991
- [2] Pollack I.: The Atonal Interval. The Journal of the Acoustical Society of America **Vol. 20 Nr. 2** (1948), 146-149
- [3] ISO 532 (E): Acoustics - Method for calculating loudness level. (1975)
- [4] Glasberg, Brian R.; Moore, Brian C. J.: A Model of loudness Applicable to Time-Varying Sounds. Journal of the Audio Engineering Society **Vol. 50 Nr. 5** (2002), 331-342