

Ein Vergleich berechneter Tonhaltigkeiten mit subjektiven Urteilen zu Tonhaltigkeit und Unangenehmheit von Schienenfahrzeuggeräuschen

Dorothea Salz¹, Sebastian Roßberg²

¹Fachgebiet Schienenfahrzeuge, Technische Universität Berlin; Email: dorothea.salz@tu-berlin.de

²Institut für Technische Akustik, Technische Universität Berlin; Email: sebastian.rossberg@tu-berlin.de

Motivation

Die Geräuschemissionen moderner Schienenfahrzeuge weisen zunehmend tonale Anteile auf, bedingt durch die verwendeten Komponenten und modernen Bauweisen. Obwohl tonale Anteile das Störungspotential von Geräuschen erhöhen, wird die Tonhaltigkeit bei der Geräuschbewertung in der Schienenfahrzeugbranche nur selten berücksichtigt. Um die Akzeptanz der Bewertung der Tonhaltigkeit zu erhöhen, wird nach möglichst einfach zu handhabenden Methoden gesucht, mittels derer die erhöhte Störwirkung tonhaltiger Schienenfahrzeuggeräusche in die Geräuschbewertung einbezogen werden kann. Dabei werden bestehende Bewertungsverfahren wie die DIN 45681 (2002) auf ihre Anwendbarkeit untersucht und weitere Störfaktoren der tonhaltigen Geräusche sondiert.

Der Versuch

Unterschiedliche Umweltgeräusche (insbesondere Schienenfahrzeuggeräusche) werden durch Versuchspersonen in einer Testreihe hinsichtlich ihrer Tonhaltigkeit und Unangenehmheit beurteilt. Die verwendeten Geräusche weisen unterschiedliche Zeitverläufe auf. Die Beurteilung in vollständigen Paarvergleichen erfolgt schriftlich auf Bewertungsbögen. Die Versuchspersonenklientel besteht vorwiegend aus Laien (Schülern) und Versuchspersonen mit psychoakustischen Vorkenntnissen (Studenten aus psychoakustischen Vorlesungen).

Ablauf

Da es sich bei den beurteilenden Personen nicht um Experten handelt, erhalten sie zu Beginn des Versuchs eine kurze Einführung zum Begriff der Tonhaltigkeit. Dabei werden Tonbeispiele zur Verdeutlichung und zur Kontrolle des Verständnisses eingesetzt. Es wird darauf geachtet, den Begriff Tonhaltigkeit wertneutral darzustellen, und tonhaltige Wohl- als auch Missklänge zu demonstrieren.

Die Geräuschpaare werden über Kopfhörer dargeboten. Jedes Paar wird nur einmal dargeboten, innerhalb von 4 Sekunden muss die Beurteilung erfolgen, dann folgt das nächste Paar. Der gesamte Test besteht aus sieben einzelnen Durchgängen (Runs), in denen jeweils sechs verschiedene Geräusche paarweise miteinander verglichen werden. In fünf dieser Runs sollen die Geräusche hinsichtlich ihrer Tonhaltigkeit bewertet werden, in zwei Runs hinsichtlich ihrer Unangenehmheit. Zwischen den einzelnen Runs erfolgt jeweils eine Pause von 30 Sekunden. Diese dient zur Erholung für die Testpersonen und gibt Gelegenheit die aktuellen Gedanken auf dem Bewertungsbogen zu notieren. Die Kommentare dienen zur Kontrolle des Testdesigns und der Konzentration der Testpersonen und fließen in die spätere Charakterisierung der Einflussfaktoren ein. Insgesamt dauert die Bewertung 30 Minuten.

Anschließend an den Paarvergleichstest wird in kleineren Gruppen ein Nachträgliches Lautes Denken^[1] durchgeführt. Es wird auf das Erleben des Tests, Antwortverhalten und -strategien, Kritik am Testdesign etc. eingegangen. Die Kommentare aus dem Test werden einbezogen und näher besprochen. Die Gespräche fließen in

die spätere Auswertung ein. Abschließend werden die Versuchspersonen audiometriert.

Geräusche

Insgesamt werden 27 verschiedene Geräusche bewertet. Grundlage bilden acht Schienenfahrzeuggeräusche zu je 6 Sekunden in unterschiedlichen Situationen und Betriebszuständen. Vier Geräusche davon wurden in je drei Teile zu 2 Sekunden geteilt. Zu Vergleichszwecken und zur Auflockerung des Testes werden sieben weitere Umweltgeräusche (je 2 bzw. 6 Sekunden) bewertet.

Die untersuchten Schienenfahrzeuggeräusche umfassen sowohl Innen- als auch Außengeräusche. Im ersten Run werden vorwiegend hinsichtlich Amplitude und Frequenz weitgehend konstante Innengeräusche von Schienenfahrzeugen mit hohen Tonhaltigkeiten im Bereich unter 2 kHz verglichen. Diese Geräusche können nach DIN 45681 (2002) bewertet werden.

Im zweiten Run dagegen liegen vorwiegend sehr instationäre Vorbeifahrten von Schienenfahrzeugen mit Tonhaltigkeiten zwischen 500 Hz und 6,25 kHz vor. Das exemplarisch dargestellte Spektrogramm (Abb. 1) eines in Run 2 verwendeten Anfahrtsgeräuschs stellt die charakteristischen dynamischen Eigenschaften der Außengeräusche dar. Die Pegel der mittleren und hohen Frequenzen weisen zwischen der zweiten und fünften Sekunde Maxima auf, wogegen sie zu Beginn und am Ende des Geräuschs niedrige Werte annehmen. Tonhaltige Anteile des Geräuschs verschieben sich über die Zeit innerhalb der Frequenzen. Durch die Eigenschaft in Amplitude und Frequenz nicht weitgehend konstant zu sein, ist es nicht im Sinne der Norm, diese Geräusche nach DIN 45681 (2002) zu bewerten.

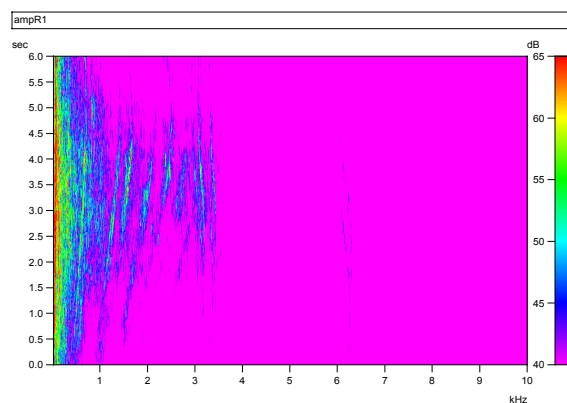


Abbildung 1: Spektrogramm eines Anfahrtsgeräuschs einer modernen Niederflurstraßenbahn (Außengeräusch, Vorbeifahrt) aus Run 2

Ergebnisse

Statistik

Die 47 Versuchspersonen, für die die bisherige Auswertung erfolgt, teilen sich folgendermaßen auf: 25 Schüler, die als interessierte Laien an diesem Versuch teilgenommen haben, sowie 22 Studenten mit psychoakustischen Kenntnissen (jedoch nicht mit dem Schwerpunkt Tonhaltigkeit).

Insgesamt liegen 232 ausgefüllte Bewertungsbögen vor, die sich unterschiedlich auf die einzelnen Runs verteilen. Der Anteil inkonsistenter (Konsistenzkoeffizient nach Kendall $K < 0,7$) oder nicht eindeutig ausgefüllter Bögen, die nicht in die Auswertung einfließen, liegt bei ca. 25% (siehe Tab. 1).

	Run 1	Run 2	Gesamt
Anzahl ausgefüllter Bewertungsbögen	47	47	94
Gesamtanzahl nicht auswertbarer Bögen	12	11	23
	Anteil 25,53%	23,40%	24,47%
Gesamtanzahl auswertbarer Bögen	35	36	71
	Anteil 74,47%	76,60%	75,53%

Tabelle 1: Anzahl auswertbarer Bewertungsbögen Run 1 und Run 2

Die berechneten Rangfolgen für jeden Bogen werden einer Clusteranalyse unterzogen. Dabei finden sich keine signifikanten Unterschiede zwischen der Beurteilung durch die Schüler und der der Studenten. Es ergibt sich für jeden Run eine Teilung in zwei getrennte Bewertungsmuster, allerdings lassen sich keine Gruppen konsistent über die Runs diesen Gruppen zuordnen. Daher wird davon ausgegangen, dass die Versuchspersonen ihr Bewertungsmuster innerhalb des Tests ändern.

Faktorenanalyse für Run 1

Die Faktorenanalyse der von 35 Testpersonen gebildeten Rangfolgen liefert drei Faktoren, mit denen sich 86 % der Varianz dieser Rangfolgen erklären lassen. Bei einem Vergleich der zugehörigen Faktorwerte der einzelnen Geräusche mit ausgewählten Geräuschparametern ergeben sich folgende Korrelationen:

1. Faktor 42% ~ obere tonhaltige Frequenzen (0,944**), Schärfe (0,823*)
2. Faktor 28% ~ Tonhaltigkeit (ΔL) der 2-Sekunden-Ausschnitte nach DIN45681 (2002) (0,705)
3. Faktor 16% ~ Tonhaltigkeit (ΔL) nach DIN 45681 (2002) (0,927*)

Es zeigt sich, dass der erste Faktor signifikant mit der Lage stark tonaler Anteile des Geräusches im Frequenzbereich korreliert. Liegen diese Anteile in einem höheren Frequenzbereich, wird auch die Tonhaltigkeit subjektiv höher beurteilt. Für den zweiten Faktor kann bisher keine signifikante Korrelation gefunden werden. Eine hohe Korrelation mit den nach DIN 45681 (2002) berechneten Tonhaltigkeiten (ΔL) der entsprechenden 2-Sekunden-Teilsamples weist jedoch auf einen Einfluss der zeitlichen Struktur der Geräusche hin. Dies gilt es durch geeignete Parametervergleiche zu überprüfen. Der dritte Einflussfaktor kann durch die für diese Geräusche berechnete Tonhaltigkeit (ΔL) nach DIN 45681 (2002) erklärt werden. Dies wird auf die relativ gleich bleibende Zeitstruktur der Samples in Run 1 zurückgeführt.

Bei der Betrachtung der beiden durch die Clusteranalyse gefundenen Bewertungsmustergruppen zeigt sich, dass sich diese vor allem durch die in der Gesamtgruppe entdeckten Parameter charakterisieren lassen. Zu je 59% lässt sich die Varianz der einen Gruppe durch die Tonhaltigkeit (ΔL) nach DIN 45681 (2002) (0,963**) erklären, und die der anderen Gruppe durch die Lage der oberen Frequenzen mit tonhaltigen Anteilen (0,833*).

Faktorenanalyse für Run 2

Die Faktorenanalyse der von 33 Testpersonen gebildeten Rangfolgen liefert zwei Faktoren, mit denen sich 74 % der Varianz dieser

Rangfolgen erklären lassen. Bei einem Vergleich der zugehörigen Faktorwerte der einzelnen Geräusche mit ausgewählten Geräuschparametern ergeben sich folgende Korrelationen:

1. Faktor 52% ~ Tonhaltigkeit (ΔL) nach DIN 45681 (2002) (0,829*)
2. Faktor 22% ~ dB- und dB(A)-Pegel (0,922** / 0,952**), Lautheit (0,980**)

Trotz der sehr unterschiedlichen und stark veränderlichen Zeitstruktur der Geräusche bilden die nach DIN 45681 (2002) berechnete Tonhaltigkeiten (ΔL) die subjektiven Urteile recht gut ab. Der zweite Faktor weist die beste Korrelation mit der Lautheit auf. Ein Erklärungsansatz hierfür ist die Verknüpfung des Begriffs der Tonhaltigkeit mit dem der Unangenehmheit, die vor allem durch die Lautheit bestimmt ist^[2], durch die Versuchspersonen. Diese Verknüpfung kann durch die Aufgabenstellung entstehen, oder daher rühren, dass die tonhaltigen Anteile der Geräusche auch sehr unangenehm sind, und diese Eigenschaft als Orientierung bei der Bewertung genutzt wird. Eine andere Erklärung liegt in der Beeinflussung des Tonhaltigkeitsurteils durch mehrere tonale Anteile innerhalb eines Geräusches (wie zum Beispiel Harmonische). Diese können eine höhere Bewertung hervorrufen, werden durch die DIN 45681 (2002) jedoch nicht zusätzlich erfasst^[3].

Zusammenfassung

Es werden keine signifikanten Unterschiede in der Beurteilung der Tonhaltigkeit zwischen Laien und Versuchspersonen mit psychoakustischen Vorkenntnissen gefunden. Die DIN 45681 (2002) bildet die Tonhaltigkeitsbeurteilungen (ΔL) teilweise ab, und könnte daher als Grundlage für das zu entwickelnde Verfahren dienen. Weitere bisher gefundene Einflussfaktoren, die Berücksichtigung finden sollten, sind die Lage der oberen tonalen Anteile im Frequenzbereich sowie möglicherweise die Anzahl der tonalen Anteile innerhalb eines Geräusches.

Ausblick

Bisher wurden nur ausgewählte spektrale Parameter in die Analyse einbezogen. In den nächsten Schritten werden weitere psychoakustische Parameter (wie zum Beispiel die Rauigkeit) und weitere Bewertungsverfahren der Tonhaltigkeit betrachtet. Die dynamischen Eigenschaften müssen anhand geeigneter Parameter, wie die Schwankungsstärke oder die zeitliche Lage der Tonhaltigkeits- und Lautheitsmaxima, in die Auswertung einfließen. Weiterhin werden die im Testverlauf gesammelten Kommentare bezüglich des Bewertungsverhaltens analysiert.

Für die Unterstützung der Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens "Reduktion von Straßenbahngeräuschen" möchten wir uns herzlich bei der „Alfried Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung“ bedanken.

¹ Schulte-Fortkamp, B.: Geräusche beurteilen im Labor. Fortschr.-Ber. VDI-Reihe 17 Nr. 100, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1994

² Zwicker, E., Fastl, H.: Psychoacoustics. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1999

³ Vormann, M. et al.: Subjective Rating of Tonal Components with an Adaptive Procedure. In Schick, A. et al. (ed.): Contributions to Psychological Acoustics: Results of the Eighth Symposium on Psychological Acoustics, pp.145-153, 2000