

Automatische Lärmbewertung von Zugsvorbeifahrten

Werner A. Deutsch

Institut für Schallforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, A-1010 Wien, Österreich,
Email: Werner.Deutsch@oeaw.ac.at

Einleitung

Lärm-Monitoringsysteme liefern üblicherweise gemessene und errechnete Signalparameter, z.B. Pegel und Frequenzbewertungen, sowie sonstige Metadaten in Echtzeit und in diversen Speicherformaten. Vernachlässigt wird jedoch bisher die Aufzeichnung und Auswertung der Tondaten selbst, womit insbesondere die Rolle der Klangfarbe weitgehend unberücksichtigt bleibt. Gerade Klangfarbenunterschiede sind es, die ebenso wie die Lautstärke die Unterscheidung und Dominanz von Lärmquellen vermitteln. Der Beitrag zeigt, wie mittels auch mehrere Wochen dauernder Tonaufzeichnungen von Zugsvorbeifahrten nicht nur die Lärmergebnisse selbst, sondern auch ihre akustische Umgebung ohne besonderen Mehraufwand erfasst und dokumentiert werden können. Auch die Auswertung der Tondaten ist heute mit Hilfe hochauflösender Frequenzanalysen und statistischer Verfahren auf Standard-PCs rationell durchführbar, und die Menge der multidimensionalen Daten wird auf wenige zugrunde liegende Komponenten reduziert. Statistische Zusammenhänge, Distanz- und Ähnlichkeitsmaße bilden ferner die Grundlage für inhaltsbezogene Klassifikationen und Bewertungen ohne verbale Beschreibung. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die im vorliegenden Beitrag beschriebene Bewertungsmethode die in Richtlinien festgelegten Beurteilungsverfahren keineswegs ersetzen soll, sondern als deren mögliche Ergänzung angesehen wird.

Segmentierung und Low-Level-Deskriptoren

Aus den kontinuierlich aufgezeichneten und in einer Tondatenbank gespeicherten Tonaufnahmen mit der Gesamtlänge von mehr als 800 h wurden die Schallereignisse automatisch extrahiert, wonach Ereignisdauer und Schalldruckpegel segmentweise berechnet werden konnten. An der Messstelle (ca. 78 m vom nächstliegenden Bahngleis entfernt) herrschte ein über 24 h gemessener Basispegel von ca. $L_A = 41$ dB, wodurch die automatische Segmentierung erleichtert war. Die Trennung von Schienen- und Straßenlärm erfolgte an einem Trainingsset von ca. 1000 Zugsvorbeifahrten auditiv. An weiteren Low-Level-Signaldeskriptoren wurden das spektrale Zentroid, Slope, Skew, Flux und 21 1/3-Oktave-Bandpegel für jedes Segment im Frequenzbereich von 63 bis 8000 Hz berechnet. Die Bandpegel wurden aus A-bewerteten FFT-Schmalbandspektren erhoben, nachdem sicher gestellt werden konnte, dass bei Zugsvorbeifahrtsgeräuschen durch die Zusammenfassung in 1/3-Oktaven kein für die Klangfarbenwahrnehmung wesentlicher Verlust an spektraler Auflösung entsteht. Bei etwa 6000 registrierten Zugsvorbeifahrten waren länger andauernde, tonale Komponenten selten. Flachstellengeräusche, die vornehmlich bei Güterzügen auftreten, wurden mittels Modulationsanalyse (FFT des Verlaufes der Kurzzeitamplitude in ausgewählten Frequenzbändern) detektiert.

High-Level-Deskriptoren

Die aus Pegelwerten und vorher genannten Parametern ohne spektrale Detailinformation gebildete Interkorrelationsmatrix zeigt durchwegs hohe Werte, mit Ausnahme des spektralen Zentroids. Somit war es nahe liegend, die Signalparameter Spitzenpegel, Dauer und 1/3-Oktave-Bandpegel zur weiteren Bearbeitung heranzuziehen. Dauer und gemittelter Spitzenpegel der Zugsvorbeifahrten zeigen eine deutliche Mischverteilung, deren Trennung nach der Klangfarbe mittels Hauptkomponentenanalyse (PCA) und Clusteranalyse vorgenommen wurde.

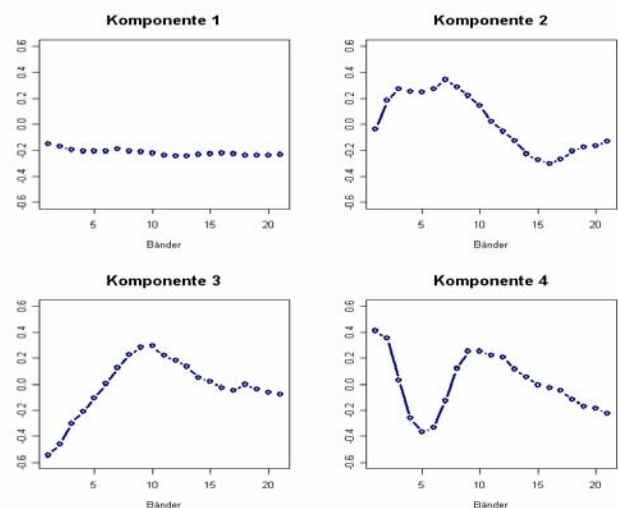


Abbildung 1: Hauptkomponenten (K1 bis K4) über 1/3-Oktave-Bandpegel im Frequenzbereich 63 Hz bis 8000 Hz, ca. 6000 Zugsvorbeifahrtsgeräusche. Während K1 kaum Frequenzspezifität enthält, zeigt K2 tiefe Frequenzanteile, K3 mittel hohe und K4 hohe und tiefe.

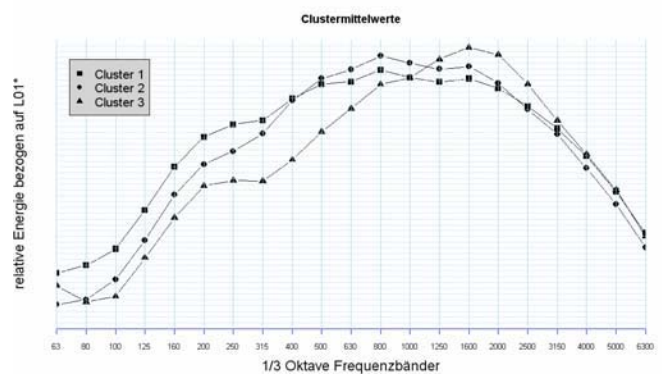


Abbildung 2: Clustermittelwerte über 1/3-Oktave-Bandpegel im Frequenzbereich 63 Hz bis 8000 Hz, ca. 6000 Zugsvorbeifahrtsgeräusche. Bei der Auswahl von $k = 3$ Clustern ergeben sich 3 Zugsvorbeifahrtsgeräuschklassen nach der Klangfarbe: „dunkel“, „mittel“, „hell“.

Auch nach der Clusteranalyse ergeben sich 3 trennbare Zuggeräuschklassen, die auditiv mit Klangfarbenattributen „dunkel“, „mittel“ und „hell“ versehen werden können.

Zur Modellierung der Clusterzugehörigkeit auf der Basis von wenigen Komponenten wurde in mehreren Durchläufen an verschiedenen Teilmengen der Schallereignisse eine Lineare Diskriminanzanalyse durchgeführt. Unter Verwendung der ersten 5 Komponenten aus der PCA sinkt die Rate der Fehlklassifikation auf ca. 5.4%.

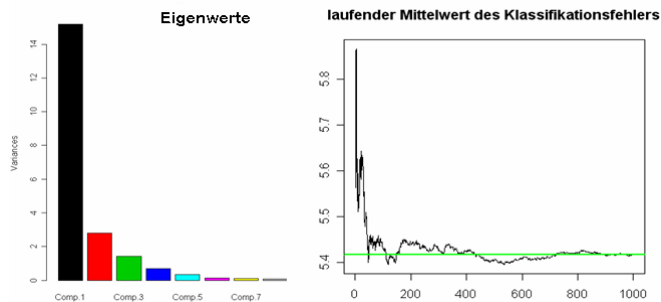


Abbildung 3: Links: Varianzanteil der ersten 8 Komponenten der PCA über 1/3-Oktave-Bandpegel. Rechts: Konvergenz der Fehlklassifikation auf 5.4% in der Linearen Diskriminanzanalyse nach 1000 Iterationen unter Verwendung der ersten 5 PCA-Komponenten.

Dreidimensionale Darstellung des reduzierten Merkmalsraumes

Aus den 23 Deskriptoren, der Schallereignisdauer, dem Gesamtpegel und den 1/3-Oktave-Bandpegeln, wurde ein dreidimensionaler Merkmalsraum gebildet, der operational in die Dimensionen Dauer: „kurz-mittel-lang“, Gesamtpegel: „leise-laut-sehr laut“ und Klangfarbe: „dunkel-mittel-hell“ geteilt angenommen wird.

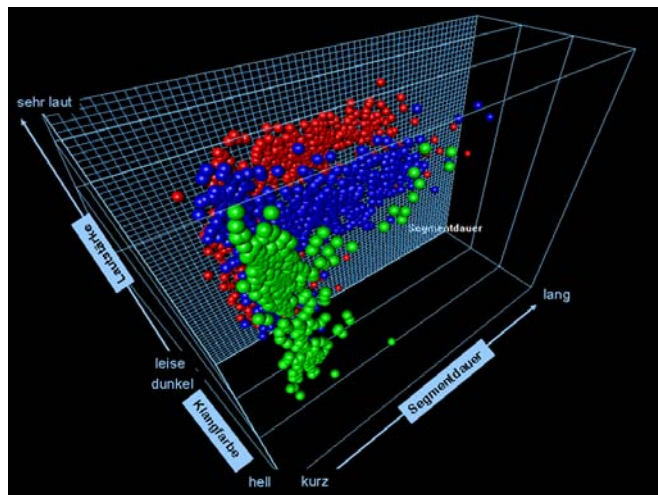


Abbildung 4: reduzierter Merkmalsraum zur interaktiven, graphisch-akustischen Darstellung von Zugsvorbeifahrten nach Dauer, Gesamtpegel und Klangfarbe. Im Vordergrund liegende Schallereignisse haben helle Klangfarbe. Die weitere Unterteilung des Raumes kann beliebig fein gewählt werden. Die Bereiche „lang-leise“ sind bei dem vorliegenden Tonmaterial kaum besetzt. Die Abbildung zeigt ca. 700 Zugsvorbeifahrten.

Das ergibt 27 Klassen, wobei jede weitere Unterteilung, je nach Bedarf, beliebig vorgenommen werden kann. Bei dem

vorliegenden Tonmaterial sind die Bereiche „lang-leise“ kaum besetzt. In diesem hochreduzierten Merkmalsraum lassen sich alle aufgezeichneten Zugsvorbeifahrten darstellen. Mit größeren Häufigkeiten finden sich Züge mit hoher Geschwindigkeit in den Klassen „kurz-laut-hell“, Güterzüge scheinen in der Gruppe „lang-sehr laut-dunkel“ vermehrt auf usw. Über ein einfach zu bedienendes, graphisch-akustisches Interface können Zugsvorbeifahrten beliebiger Bereiche einzeln oder in Gruppen für weitere Analysen (z.B. Transients, Flachstellengeräusche, Tonhaltigkeit) aus der Tondatenbank entnommen und akustisch wiedergegeben werden. Neu hinzukommende Zugsvorbeifahrten werden entsprechend positioniert. Zusätzlich zur Tonwiedergabe werden über Annotierungen eingebrachte oder automatisch erfasste Metadaten (z.B. Datum, Tageszeit, weitere Signaldeskriptoren) dargestellt.

Zusammenfassung und Ausblick

Aus den durchgeführten Arbeiten und Analysen wird die Haupthypothese unterstützt, dass zusätzlich zu den üblichen Pegelmessungen genauere Klangfarbenunterschiede in die Lärmbewertung eingehen sollten. Die Reduktion der spektralen Auflösung auf 21 Frequenzbänder (1/3-Oktavebänder, 63 bis 8000 Hz) für die Klassifizierung der Klangfarbe ist hinreichend genau. Es ist dabei für Zugsvorbeifahrten kein Informationsverlust hinsichtlich der spektralen Varianz zu erwarten. Klangfarbenunterschiede können in zumindest 3 Klassen von dunkel nach hell unterschieden werden. Clusteranalyse und PCA liefern für die Bildung der Klangfarbengruppen übereinstimmende Ergebnisse, deren Treffergenauigkeit mit ca. 95 % über die Diskriminanzanalyse validiert werden konnte. Die Anwendung des beschriebenen Verfahrens zur Einbeziehung der Klangfarbe in die Bewertung von weiteren, häufig auftretenden Lärmsignalen (z.B. Straßenlärm) wird vorgeschlagen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde in Kooperation mit der Staatlichen Versuchsanstalt-TGM (Wien) Akustik und Bauphysik durchgeführt und seitens des *bmvit* und der FFG im Rahmen der Projektlinie ISB-Innovatives System Bahn unterstützt. M. Stani und A. Niemczanowski (beide TGM) wird insbesondere für die aufnahmetechnischen Teile des Projekts gedankt, A. Noll und C. Gottschall für die Entwicklung der Softwareergänzungen in S_TOOLS-STx, B. Gygi für die Konzeptierung der Diskriminanzanalyse, T. Becker, A. Hirner und P. Balazs für die statistischen Auswertungen an dem umfangreichen Datenmaterial.

Literatur

- [1] MPEG-7 Audio: ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 N6828, 2004.
- [2] Zwicker, E.; H. Fastl: Psychoacoustics. Facts and Models. Springer Information Sciences; 1999.
- [3] Vos, J.: Annoyance caused by the sounds of a magnetic levitation train. J. Acoust. Soc. Am. 115(4), April 2004, p. 1597-1608.
- [4] R Foundation for Statistical Computing ISBN 3-900051-07-0; <http://www.r-project.org/>.