

Simulation des Straßenverkehrsgerausches in Innenstadtstraßen

Roland Sottek, Winfried Kребber und Klaus Genuit

HEAD acoustics GmbH

Einleitung

Das Verkehrsgerausch in einer typischen Innenstadtstraße stellt ein komplexes auditorisches Szenario dar. Will man die Sound-Quality-Aspekte dieses Geräuschszenarios untersuchen, reichen die eingeführten Verfahren zur Messung von Vorbeifahrtgeräuschen nach ISO 362 bei weitem nicht aus. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes SVEN (Sound Quality of Vehicle Exterior Noise) werden daher neue Ansätze verfolgt. Ein wichtiges Element ist dabei die Synthese von Vorbeifahrtgeräuschen aus den einzelnen Komponenten (Motor, Reifen, Abgasanlage, etc.). Ein mögliches Konzept einer solchen Synthese wurde bereits auf der DAGA 2001 vorgestellt [1]: Aus den Nahfeldaufnahmen an den einzelnen Komponenten wird eine virtuelle Umgebung um einen virtuellen Hörer am Straßenrand aufgebaut. Die Simulation erlaubt die Untersuchung, welche Schallquellen am Fahrzeug in welcher Fahrsituation die Geräuschqualität bestimmen.

Während in der ISO 362 nur der maximale A-bewertete Schalldruckpegel betrachtet wird, liefert das im SVEN-Projekt entwickelte Verfahren Schalldruckzeitsignale an den Ohrkanaleingängen des virtuellen Hörers am Straßenrand. Damit sind weiterführende Auswertungen wie psychoakustische Analysen möglich.

Die Simulation von Verkehrsgerauschen erfordert zusätzlich eine Berücksichtigung der raumakustischen Eigenschaften der Umgebung, der Verkehrsstatistik und der Störung durch Einzelereignisse. An der Entwicklung von Modellen zur Verkehrsgerausch-erzeugung wird noch gearbeitet. Zur Zeit stehen jedoch Ergebnisse von Hörversuchen mit realen Geräuschaufzeichnungen zur Verfügung, die beispielsweise den Einfluss der architektonischen Gestaltung der Straßen belegen.



Abb. 1: Messung des Verkehrslärms in Paris

Abbildung 1 zeigt einen Messaufbau zur Aufzeichnung von Verkehrsgerauschen in einer Straße mit U-Profil. Diese Architektur schneidet in Hörversuchen besser ab als Straßen mit einseitiger oder ohne Bebauung bei gleicher Verkehrsdichte [2]. Ebenso lassen sich unterschiedliche physiologische Reaktionen durch unterschiedliche Gestaltung der Innenstadtstraßen im Experiment nachweisen [3].

Simulationsmodell

Die grundsätzliche Vorgehensweise zur Simulation von Außengeräuschen ist in [1] beschrieben:

Das Geräusch an den beiden Kunstkopfhoren wird durch einfache Überlagerung von unabhängigen Teilschallereignissen simuliert (Abb. 2, rechts). Jedes Einzelereignis resultiert dabei aus dem mit der zugehörigen Übertragungsfunktion gefilterten Anregungssignal. Zur Erzeugung binauraler Ohrsignale müssen jeweils zwei Filterungen mit den Übertragungsfunktionen zum linken und rechten Kunstkopfmikrofon durchgeführt werden. Für eine simulierte Vorbeifahrt sind ortsabhängige Filter notwendig.

Zur Ermittlung der Transferpfade von den hypothetischen Quellen zu den verschiedenen Positionen des Kunstkopfes wird in der Nähe der Mikrofone an den Quellen (z.B. Abgasendrohr), nacheinander mit einem Messlautsprecher angeregt. Als Anregungssignal wird eine Überlagerung aus „Sweep“- und „Pseudo Noise“- Sequenz verwendet. Die Übertragungsfunktionen werden aus den simultan gemessenen Schalldruckverläufen an den beiden Kunstkopfmikrofonen und dem jeweils betrachteten Mikrofon mittels Korrelationsanalyse berechnet.

Diese „Direkte Messung der Übertragungsfunktionen“ ist mit einem sehr hohen Messaufwand verbunden, insbesondere dann, wenn unterschiedliche Orientierungen des „Empfängers Kunstkopf“ für die Simulation erforderlich sind. Bei der Vorbeifahrt eines Fahrzeugs in Anlehnung an ISO 362 wäre eine feste Orientierung des Kunstkopfes zwar ausreichend, für ein aus beliebiger Richtung vorbeifahrendes Fahrzeug jedoch nicht. Es wurden insgesamt die Übertragungswege von den betrachteten neun Quellen zu insgesamt 24 Empfängerpositionen gemessen (d.h. $9 \times 24 = 216$ Übertragungsfunktionen) [1]. Die Winkelauflösung zur Bestimmung der Abstrahlcharakteristik lag zwischen ca. 10° und 20° ; weitere Übertragungsfunktionen wurden mittels Interpolation bestimmt. Eine zusätzliche Berücksichtigung der Orientierung (Drehung) des Kunstkopfes mit einer Auflösung von 10° würde den Messaufwand um den Faktor 36 erhöhen. Dies ist verständlicherweise nicht praktikabel.

Daher ist folgender Ansatz verfolgt worden: Die einzelnen Übertragungsfunktionen werden, wie in Abbildung 2 ersichtlich, in eine SRTF (source related transfer function), in Funktionen zur Berücksichtigung des Doppler-Effektes und einer entfernungsabhängigen Dämpfung/Verzögerung, sowie in eine HRTF (head related transfer function) vereinfachend aufgeteilt. Für genügend große Abstände zwischen Fahrzeug und Hörer ist dies zulässig.

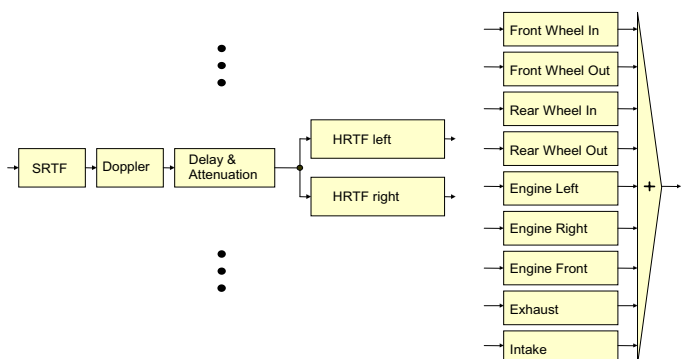


Abb. 2: Erweitertes Simulationsmodell

Eine SRTF wird ähnlich wie in [1] beschrieben mit einem Mikrofon (anstatt des Kunstkopfes) an der Position des Kunstkopfes bestimmt, die Berechnung erfolgt hier jedoch als minimalphasig-

ges Filter. Die jeweils benötigte HRTF kann für einen Kunstkopf oder Hörer in einem reflexionsarmen Raum gemessen werden. Dabei wird mit einem entzerrten Lautsprecher aus verschiedenen Richtungen beschallt und der Schalldruck in den beiden Ohrkanaleingängen aufgezeichnet. Es folgt eine Normierung der einzelnen Spektren mit dem Spektrum für frontalen Schalleinfall. Die Übertragungsfunktionen werden zunächst minimalphasig berechnet und dann die interauralen Laufzeitunterschied in einem zweiten Schritt berücksichtigt. Diese Funktionen stehen in einer Datenbank für verschiedene Kunstköpfe und einige Versuchspersonen zur Verfügung.

Die Aufteilung der Signalwege in SRTF und HRTF reduziert nicht nur deutlich den Messaufwand, sondern ist für die Raumsimulation unbedingt notwendig: Reflexionen werden mittels Spiegelschallquellen realisiert, der Schall der Spiegelschallquelle erreicht den Hörer im Allgemeinen aus einer anderen Richtung als der Direktschall; darüber hinaus ist die Abstrahlung der Quelle für diese Schallanteile unterschiedlich.

Anwendungsbeispiel

Als Messzyklus wird im Folgenden die beschleunigte Vorbeifahrt eines Mittelklassefahrzeugs (Ottomotor) im 2. Gang mit 50 km/h betrachtet. Bei der Simulation wird zum einen die Relativbewegung zwischen Fahrzeug und Kunstkopf (ortsabhängige Übertragungsfunktionen) und zum anderen der Dopplereffekt (Abbildung 2) berücksichtigt.

In [1] wurde bereits für den Fall eines „mit gleicher Geschwindigkeit bewegten Kunstkopfes“ (keine Berücksichtigung der Ortsabhängigkeit der Übertragungsfunktionen und des Dopplereffektes) gezeigt, dass die Reifengeräusche, insbesondere die Anteile „Vorderrad Auslauf“ und „Hinterrad Einlauf“ für den betrachteten Anwendungsfall dominant sind. Der Einfluss des Abgasendrohrs und der Ansaugmündung war im unteren Frequenzbereich signifikant. Die Anteile des Motors zeigten keine auffälligen Muster.

An diesen Aussagen ändert sich grundsätzlich nichts, wenn die Simulation der realen Vorbeifahrt für einen virtuellen Hörer am Straßenrand analysiert wird. Allerdings ist nun ein Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Vorbeifahrtgeräuschen möglich.

Für den beschriebenen Fahrzyklus sind in den Abbildungen 3 und 4 die Spektrogramme eines mit einem Kunstkopf aufgezeichneten Vorbeifahrtgeräusches und des simulierten Vorbeifahrtgeräusches dargestellt. Die Übereinstimmung im Hörvergleich ist sehr gut. Im Spektrogramm erkennbare Abweichungen im Bereich unter 100 Hz sind auf Messfehler in den Übertragungsfunktionen zurückzuführen. Die Unterschiede im oberen Frequenzbereich sind mit der vereinfachten Aufteilung der Übertragungsfunktionen in SRTF und HRTF und Störungen auf der Teststrecke zu erklären.

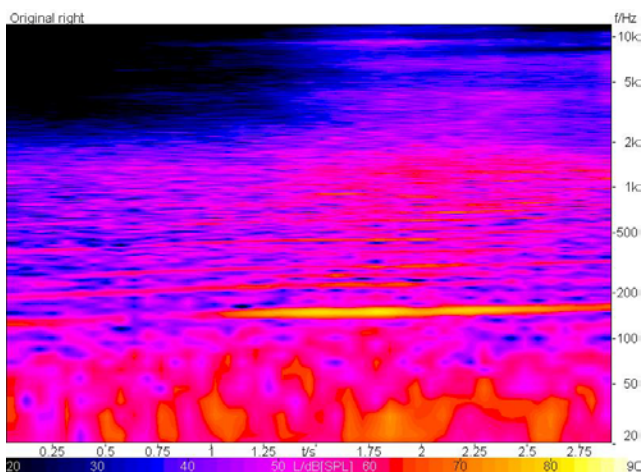


Abb. 3: Spektrogramm eines gemessenen Vorbeifahrtgeräusches

Das Simulationsmodell ermöglicht auch eine Auralisation von Einzelschallereignissen, z.B. Anteil des Abgasendrohrs. Tests mit diesen Signalen ergaben, dass die sich „entfernende Abgasanlage“ einen bekannten Höreindruck hervorruft. Dies liegt darin begründet, dass der Anteil des Abgasendrohrs am Vorbeifahrtgeräusch dominant ist und daher der erzeugenden Komponente zugeordnet werden kann. Neben der Auralisation der von den verschiedenen Quellen generierten Einzelschallereignisse und beliebiger Kombinationen ist auch eine Abschwächung, Verstärkung oder allgemein beliebige Filterung einzelner Anteile und die Generierung neuer Geräusche möglich, d.h. das Modell eignet sich sowohl für die Analyse als auch für das Sound Design.

Ausblick

Im Hinblick auf eine möglichst frühzeitige Vorhersage der Geräuschemission von Kraftfahrzeugen bei einer Motorentwicklung für ein bestehendes Fahrzeug (Datenbank mit Übertragungsfunktionen ist vorhanden) können auch Motorprüfstandsmessungen als Anregungssignale für die Simulation des Außengeräusches verwendet werden. Zusätzlich zu den SRTF müssen in diesem Fall jedoch Anpassfunktionen ermittelt werden, um zu berücksichtigen, dass sich die auf dem Prüfstand annähernd vorhandenen Freifeldbedingungen deutlich von den raumakustischen Randbedingungen des Motorraums unterscheiden. Dieser Ansatz wurde bereits bei der binauralen Innengeräuschsimulation auf der Basis von Motorprüfstandsmessungen erfolgreich eingesetzt. Die anderen nicht am Prüfstand gemessenen Eingangssignale (z.B. Reifengeräusche) werden als unveränderliche Teilschallereignisse betrachtet (Ablage in einer Geräuschdatenbank) und dem simulierten motorbasierten Anteil hinzugefügt.

Anmerkung

Die in diesem Beitrag dargestellte Arbeit wird unterstützt durch die europäische Kommission, Projekt SVEN, mit der Vertragsnummer G6RD-CT-1999-00113.

Literatur

- [1] R. Sottek, W. Krebber, K. Genuit. Simulation von Außengeräuschen. DAGA 2001 (CD).
- [2] W. Krebber, K. Genuit, R. Sottek. Lärmbelästigung durch Straßenverkehr - (k)ein Sound Quality Thema. DAGA 2002 (CD).
- [3] G. Notbohm, S. Schwarze. Physiologische Reaktionen als Indikator der Geräuschqualität von Straßenverkehr. DAGA 2002 (CD).

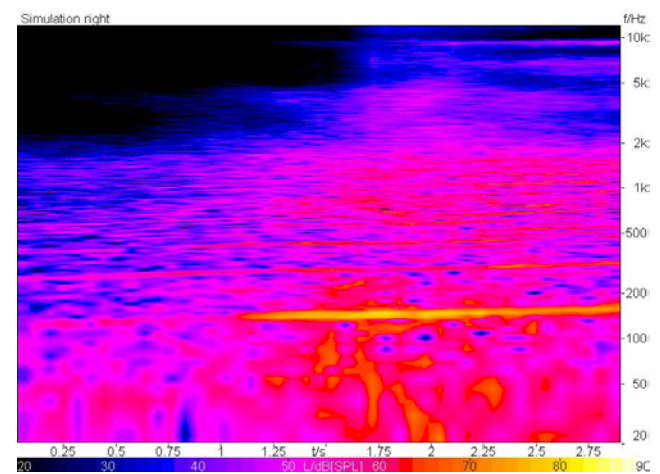


Abb. 4: Spektrogramm des simulierten Vorbeifahrtgeräusches