

Simulation von Vorbeifahrtgeräuschen

Aulis Telle

HEAD acoustics GmbH, 52134 Herzogenrath, E-Mail: aulis.telle@head-acoustics.de

Einleitung

Vorbeifahrtgeräusche werden häufig nach ISO 11819-1 [1] bzw. ISO 362 [2] im Abstand von 7,5 m zur Mitte der Fahrspur ermittelt. Für die Beurteilung der Geräusche in einer größeren Entfernung kann eine solche Aufnahme nicht direkt verwendet werden. Zwar kann der maximale Schalldruckpegel mit Hilfe statistischer Methoden gut abgeschätzt werden, dieser reicht jedoch für eine psychoakustische Charakterisierung des Geräusches nicht aus. Insbesondere der Dopplereffekt und das binaurale Zeitverhalten während der Vorbeifahrt ändern sich mit der Entfernung erheblich.

In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, mit der aus einem Fernfeld-Mikrofonsignal in z. B. 7,5 m Entfernung das Zeitsignal eines virtuellen Mikrofons bzw. Kunstkopfes in beliebiger Entfernung extrapoliert werden kann. Hierfür werden unter Verwendung von synchron zum Schallsignal aufgezeichneter Orts- und Geschwindigkeitsdaten der Dopplereffekt und die Luftdämpfung kompensiert. Anhand des resultierenden Zeitsignals können entfernungsabhängig psychoakustische Effekte sowohl mit instrumentellen Maßen wie Lautheit, Schärfe und Tonalität als auch perceptiv in Hörversuchen untersucht werden.

Simulation

Um das Geräusch von vorbeifahrenden Fahrzeugen im Fernfeld abzuschätzen, können Messungen für die interessierenden Entfernungen durchgeführt werden. Dies hat jedoch für große Entfernungen (> 30 m) eine Reihe von Nachteilen:

- schlechtes Signal-zu-Rausch-Verhältnis, da Umgebungsgeräusche durch Vögel, andere Straßen, Wind, etc. dominieren können,
- schlechte Reproduzierbarkeit wegen starker Abhängigkeit der Messergebnisse von Witterungseinflüssen und Umgebung,
- hoher Messaufwand.

Eine Möglichkeit, diese Nachteile zu umgehen, besteht darin, Nahfeldsignale der relevanten Quellen am Fahrzeug während einer Vorbeifahrt aufzuzeichnen und für diese Quellsignale unter Berücksichtigung von Dopplereffekt und weiteren Ausbreitungsphänomenen die Ausbreitung zu einer entfernten Position zu berechnen. Zusätzlich zu den Nahfeldsignalen müssen dafür präzise Bewegungsdaten (Ort und Geschwindigkeit) des Fahrzeugs vorliegen, die über GPS, CAN, Radar, Lichtschranken, etc. erfasst werden können. Insbesondere zur Berechnung der Luftdämpfung sind weiterhin Lufttemperatur und -feuchtigkeit zu dokumentieren. Wie im Rahmen des EU-Projektes CityHush (Projektnummer FP7-233655) gezeigt werden konnte, lassen sich auf diese Weise valide Fernfeldsignale simulieren, auf Basis derer z. B. psychoakustische Karten und Auswertungen erzeugt werden können [3].

Die Simulation des Fernfeldsignals ist dabei unabhängig davon, mit welcher Methode die Nahfeldquellen erfasst werden. Es könnte z. B. auch ein ausreichend großes Mikrofon-Array am Fahrbahnrand eingesetzt werden, um die relevanten Quellen zu identifizieren und zu erfassen [4].

Im Vergleich zu umfangreichen Messungen im Fernfeld kann diese Methode die Reproduzierbarkeit und Flexibilität erheblich verbessern. Der Gesamtaufwand bleibt jedoch weiterhin recht hoch, da zum einen die Nahfeldquellen mikrofoniert werden müssen und zum anderen für die Simulation ein virtuelles akustisches Fahrzeugmodell aufgebaut werden muss.

Extrapolation aus Fernfeld-Mikrofonsignal

Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, mit der ein virtuelles Mikrofon- bzw. Kunstkopfsignal durch die Extrapolation eines Fernfeld-Mikrofonsignals (typischerweise das eines Mikrofons in 7,5 m Entfernung) ermittelt werden kann, wodurch der nötige Messaufwand erheblich reduziert wird.

Unter Berücksichtigung der Bewegungsdaten und der gewünschten Position des virtuellen Mikrofons bzw. Kunstkopfes werden der Dopplereffekt und die Luftdämpfung für das vorliegende Mikrofonsignal korrigiert. Dafür wird zunächst aus dem Fernfeld-Mikrofonsignal ein virtuelles Nahfeldsignal berechnet, für welches dann entsprechend das Signal im Fernfeld simuliert wird.

Der Dopplereffekt wird dabei im Zeitbereich durch nichtlineares Resampling kompensiert. Für die Korrektur der Luftdämpfung werden die in der ISO 9613-1 [5] definierten Filter passend parametrisiert und invertiert und das Mikrofonsignal entsprechend gefiltert.

Es werden dabei folgende Annahmen getroffen:

- Die Schallquelle ist eine Punktschallquelle ohne ausgeprägte Richtcharakteristik.
- Das Mikrofonsignal enthält keine Geräusche, die nicht von der beobachteten Quelle stammen.
- Position und Geschwindigkeit relativ zum Mikrofon sind über der Zeit genau bekannt.
- Schall breitet sich wie im Freifeld aus.

In Messungen können diese Annahmen in der Regel nicht alle erfüllt werden. Dies gilt insbesondere für die ersten beiden Annahmen. Es hat sich allerdings herausgestellt, dass ein PKW im Abstand von 7,5 m Abstand für die Extrapolationsmethode hinreichend gut als Punktschallquelle modelliert werden kann und das Signal-zu-Rauschverhältnis ebenfalls ausreicht, wenn die Aufnahmebedingungen günstig sind. Falls der Einfluss einer ausgeprägten Richtcharakteristik zu deutlich hörbar ist, wäre eine winkelabhängige Resynthese des virtuellen Nahfeldsignals denkbar. In den für diesen Beitrag verwendeten Signalen war jedoch das Reifengeräusch dominant, so dass hier darauf verzichtet werden konnte.

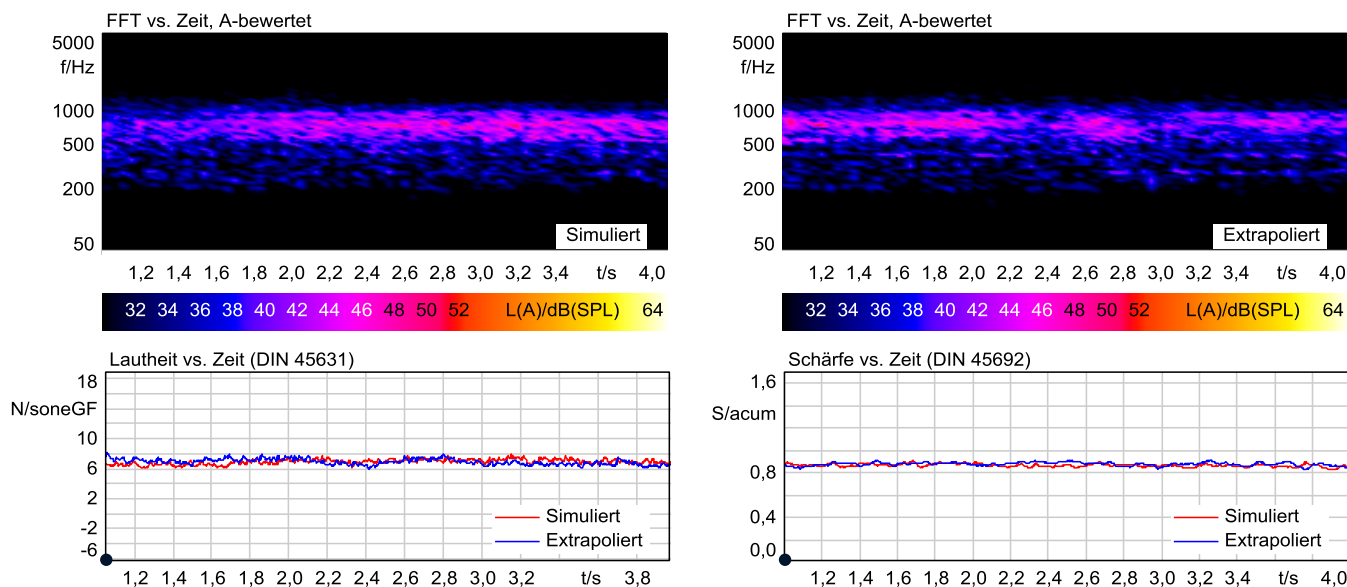


Abbildung 1: Vergleich von Extrapolation und Simulation für eine Entfernung von 100 m zur Quelle. Oben: Spektrogramme. Unten links: Lautheit über der Zeit. Unten rechts: Schärfe über der Zeit.

Verifikation

Zur Verifikation wurden zunächst aus Nahfeldaufnahmen mit Hilfe der im Rahmen des CityHush-Projektes entwickelten Simulations-Technologie [6] virtuelle Mikrofon- und Kopfsignale berechnet. Es wurden die Reifengeräusche der dem virtuellen Mikrofon zugewandten Reifen verwendet, wobei jeweils Ein- und Auslauf mikrofoniert waren. Das Simulationsmodell bestand somit aus zwei Einzelquellen pro Reifen, wobei ein Radstand von 3 m eingestellt wurde.

Als Ausgangssignal für die Extrapolationsmethode wurde das virtuelle Mikrofonsignal in 7,5 m Entfernung verwendet. Daraus wurden virtuelle Kopfsignale für 30 m und 100 m Entfernung berechnet. Der Vergleich der Ergebnisse ist in

Abbildung 1 beispielhaft für 100 m Entfernung dargestellt. Es werden Spektrogramm, Lautheit über der Zeit und Schärfe über der Zeit dargestellt. Lautheit und Schärfe zeigen einen faktisch identischen Verlauf. Die Spektrogramme sind abgesehen von der leicht unterschiedlichen Zeitstruktur vom Charakter her ebenfalls sehr ähnlich. Die erkennbaren Abweichungen sind auf die Reduktion der verteilten Quellen auf eine Punktschallquelle zu erklären. Diese Abweichungen sind allerdings selbst im AB-Vergleich akustisch kaum wahrzunehmen.

Die Extrapolationsmethode wurde zusätzlich zu den Simulationen auch mit realen Messungen verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass der Klangcharakter sehr gut abgebildet wurde, der Schalldruckpegel des extrapolierten Signals allerdings deutlich (etwa 6 dB) größer war als der der Messung. Dieser Unterschied ist vermutlich auf den Wind, der bei der Messung vorhanden war, zurückzuführen.

Weiterhin wurden auch Signale mit deutlich tonalem Charakter betrachtet. Hier hat sich gezeigt, dass die Tonhaltigkeit (berechnet nach [7]) der extrapolierten Fernfeldsignale mit der Entfernung wie bei den korrespondierenden Messungen nur leicht sinkt, während der Pegel und die Lautheit sehr deutlich abnehmen.

Zusammenfassung

Mit der in diesem Beitrag vorgestellten Extrapolationsmethode kann aus einem Fernfeld-Mikrofonsignal einer Vorbeifahrtmessung ein virtuelles Mikrofon- bzw. Kopfsignal für beliebige Entfernungen berechnet werden. Auf diese Weise kann z. B. in Hörversuchen oder durch die Berechnung instrumenteller Maße wie Tonhaltigkeit oder Lautheit die Wahrnehmung von Vorbeifahrtgeräuschen in Abhängigkeit von der Entfernung untersucht werden, ohne den Messaufwand unnötig in die Höhe zu treiben. Zusätzlich kann durch Integration von weiteren Schallausbreitungsmodellen der Einfluss z. B. der klimatischen Bedingungen untersucht werden.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 11819-1:2002-05: Akustik – Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche – Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren.
- [2] DIN ISO 362-1:2009-07: Messverfahren für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 – Teil 1: Fahrzeuge der Klassen M und N.
- [3] Fiebig, A., Sottek, R., and Genuit, K. Psychoacoustic analyses of the road traffic noise predicted for 2020, Forum Acusticum 2011, Aalborg, 2011.
- [4] Guidati, S. Arrays in Motion - Localization Techniques for Compensation of Relative Motion between Microphone Arrays and Sources, SAE Technical Paper 2013-01-1966, Grand Rapids, 2013.
- [5] ISO 9613-1:1993-06: Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien – Teil 1: Berechnung der Schallabsorption durch die Luft.
- [6] Sottek, R., Fiebig, A., Guidati, S., Marla, P. and Philippen, B. Measuring and analyzing road traffic noise, Euronoise, Prague, 2012.
- [7] Sottek, R., Kamp, F. and Fiebig, A. A new hearing model approach to tonality, Internoise 2013, Innsbruck, 2013.