

Zur autonomen Messung von Vorbeifahrgeräuschen

Maximilian Ertsey¹, Manuel Männel², Hugo Fastl³

¹ Müller-BBM GmbH, 82152 Planegg, E-Mail: Maximilian.Ertsey@mbbm.com

² Müller-BBM GmbH, 82152 Planegg, E-Mail: Manuel.Maennel@mbbm.com

³ Technische Universität München, 80333 München, E-Mail: hugo.fastl@tum.de

Einleitung

Mit Hilfe von statistischen Vorbeifahrtsmessungen (sog. SPB-Messungen gemäß DIN ISO EN 11819-1 [1]) kann die akustische Qualität einer Fahrbahnoberfläche durch die Erfassung des Vorbeifahrgeräuschs von zufällig ausgewählten Einzelfahrzeugen bestimmt werden.

Hierzu wird ein Mikrofon in 7,5 m Abstand zur Fahrstreifenmitte auf einer Höhe von 1,2 m positioniert. Es wird der $L_{AF,max}$ einzeln vorbeifahrender Fahrzeuge gemeinsam mit der über ein Dopplerradar gemessenen Geschwindigkeit v erfasst. Um eine statistisch aussagekräftige Datenlage zu erhalten, verlangt die Norm die Messung von mindestens 100 Pkw sowie 80 leichten und schweren Lkw. Über das Wertepaar von $L_{AF,max}$ und $\log_{10}(v)$ wird eine lineare Regression gebildet. Die Regressionskurve wird mit Referenzpunkten verglichen (ein typischer Referenzpunkt liegt bei 85,2 dB(A) bei 120 km/h [2]). Aus der Differenz ergeben sich Vergleichswerte für die akustischen Eigenschaften des Fahrbelags.

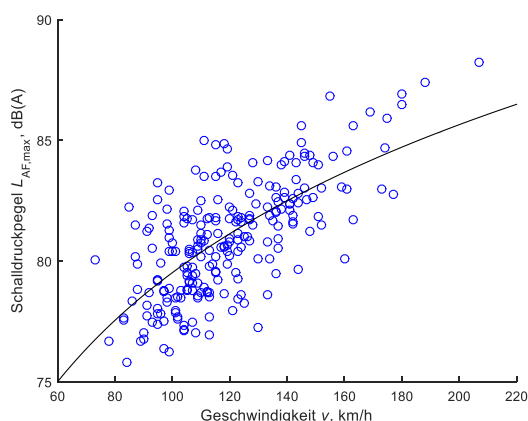


Abbildung 1: Gemessener maximaler Schalldruckpegel einzelner Vorbeifahrten als Funktion der Geschwindigkeit (blau) und daraus abgeleitete Regressionskurve (schwarz).

Die Anforderung, dass ein Fahrzeug einzeln die Messstelle passieren muss, definiert die Norm als eine durch das zu messende Fahrzeug verursachte Prominenz des Pegel-Zeit-Signals von wenigstens 6 dB gegenüber dem Umgebungslärm oder anderen Fahrzeugen.

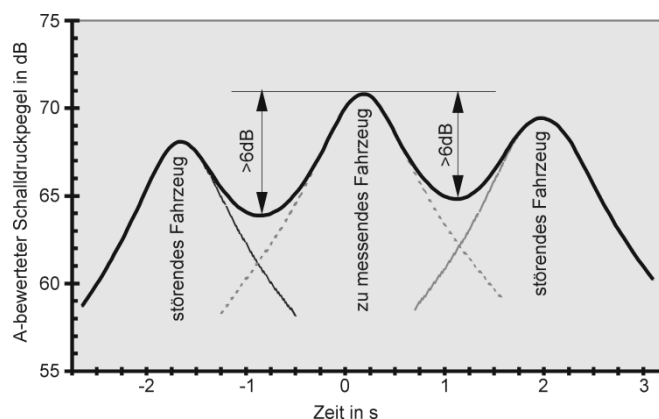


Abbildung 2: Definition eines einzeln vorbeifahrenden Fahrzeuges über eine Prominenz des Schalldruckpegels von wenigstens 6 dB. Bildquelle [1].

Problemstellung

Das oben beschriebene Messverfahren ist quantitativ und innerhalb der statistischen Abweichung reproduzierbar, jedoch nicht vollständig objektiv. Nach bisherigem Stand der Technik erfolgt die Messung unter laufender Beobachtung. Die Beurteilung, ob ein vorbeifahrendes Fahrzeug die Messkriterien einhält und zum Datenkollektiv herangezogen werden kann, geschieht über das Messpersonal – damit liegt insbesondere die Entscheidung, ob ein Fahrzeug noch als repräsentativ für die Fahrzeugklasse eingestuft wird, im persönlichen Ermessensspielraum des Messpersonals. Das Messergebnis wird also durch subjektive Einschätzungen beeinflusst [3]. Bei mehrspurigen Straßen muss zudem überprüft werden, ob das Fahrzeug die korrekte Fahrspur genutzt hat und damit die Querentfernung von 7,5 m zwischen Fahrzeugmitte und Mikrofonposition eingehalten war.

Bei Straßen mit besonders hohem Verkehrsaufkommen erschwert sich die Messung, da in einem dichten Verkehrsfluss Einzelvorbeifahrten sehr selten auftreten. Auf dicht befahrenen Autobahnen ist die Durchführung einer Messung oftmals nur in den Nachtstunden möglich und erfordert mehrere Stunden Aufwand, um die Mindestanzahl an gültigen Vorbeifahrten zu erreichen.

Ansatz – autonomes Messsystem

Eine Tätigkeit ist umso besser automatisierbar, je klarer sie definiert ist und gleichmäßiger sie ausgeführt wird. Die SPB-Messung fällt unter dieses Kriterium, da während der Messung lediglich zu entscheiden ist, ob ein Fahrzeug einzeln vorbeifährt, den richtigen Fahrstreifen befährt und repräsentativ für die jeweilige Fahrzeugklasse ist. Daher

erscheint es effektiv, die Durchführung von SPB-Messungen zu automatisieren. Der Vorteil liegt einerseits in einer regelbasierten Auswahl von Vorbeifahrten, die die Messung vollständig objektiv machen, andererseits in der praktischen Anwendung, da ein autonom arbeitendes System über einen deutlich längeren Zeitraum agieren und somit bei geringerem Aufwand eine wesentlich höhere Anzahl an Vorbeifahrten erfassen kann. So wird durch die höhere Anzahl erfasster Fahrzeuge die statistische Sicherheit der Messung erhöht, gleichzeitig kann aufgrund der größeren Datenmenge eine wesentlich präzisere Auswahl der zu erfassenden Fahrzeuge erfolgen.

Technische Herangehensweise

Das bestehende System aus einem Mikrofon an der obligatorischen Messposition sowie einem Radar, welches die Fahrzeuggeschwindigkeit und aus der Anzahl der reflektierten Radarimpulse die ungefähre Fahrzeuglänge misst, soll um weitere Mikrofone erweitert werden. Ziel ist es, mit Hilfe von Schallquellenlokalisierung vorbeifahrende Fahrzeuge zu erkennen und einen Algorithmus zu entwickeln, mit dem einzelne Vorbeifahrten von dichten Verkehrszusammensetzungen unterschieden werden können. Durch spektrale Mustererkennung und die Information über die Fahrzeuglänge erfolgt eine automatische Klassifizierung der einzelnen Fahrzeuge. Zur genauen Lokalisation von Vorbeifahrten zeigt sich, dass drei Mikrofone mit exakt bestimmter Positionierung vollkommen ausreichend sind; hierbei werden zwei Mikrofone parallel zum Fahrstreifen platziert, ein drittes wird in größerer Höhe über einem der beiden anderen Mikrofone positioniert.

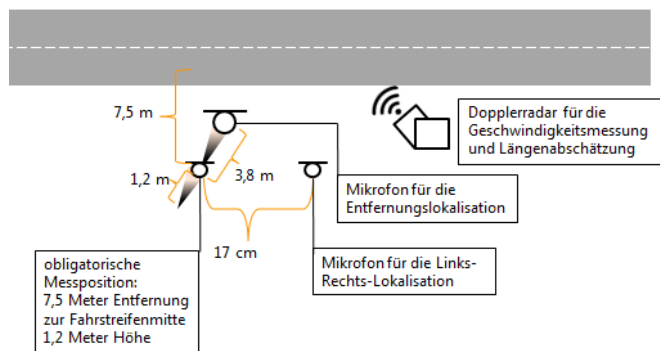


Abbildung 3: Ausbau und Anordnung des autonom messenden Systems.

Zur Detektion von Vorbeifahrten wird zwischen den beiden Mikrofonen, die sich auf einer zur Fahrbahn parallelen Linie befinden das Korrelationsmaximum für kurze Zeitintervalle berechnet. Der zeitliche Versatz des Maximums gibt den Haupteinfallswinkel einer Schallquelle zum entsprechenden Zeitpunkt an. Über der Zeit aufgetragen ergibt sich daraus eine Trajektorie, welche stets der dominantesten Schallquelle folgt.

Für die Berechnungen werden vorbeifahrende Fahrzeuge als sich bewegende Punktschallquellen angenommen; diese grobe Näherung ist für die Lokalisation vollkommen ausreichend. Rein mathematisch entspricht der Verlauf des

zeitlichen Versatzes der Korrelationsmaxima bei Vorbeifahrt einer Punktschallquelle, unter Annahme einer unendlich langen geraden Straße und einer konstanten Fahrgeschwindigkeit, einer tanh-Kurve mit ihren Unendlichkeitsstellen bei einem Einfallswinkel von 90° . Durch Vergleich der gemessenen Lokalisationskurve mit einer tanh-Kurve lässt sich bei hoher Übereinstimmung eine Einzelvorbeifahrt bestimmen. Dicht hintereinander fahrende Fahrzeuge lassen sich anhand einer Sprungstelle der Schalllokalisationskurve erkennen, die durch den Lokalisationswechsel von dem vorderen auf das hintere Fahrzeug auftritt.

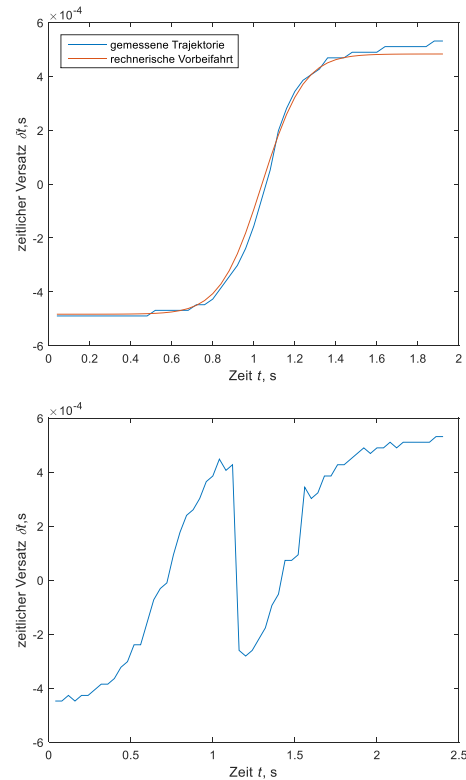


Abbildung 4. Oben: Darstellung des Zeitverlaufs des zeitlichen Versatzes δt des Lokalisationsmaximums bei einer Einzelvorbeifahrt (blau) und Vergleich mit einer rechnerischen Vorbeifahrtkurve (rot). Unten: Darstellung bei zwei dicht hintereinander fahrenden Fahrzeugen.

Zur Bestimmung der von einem Fahrzeug genutzten Fahrspur bzw. der Querentfernung zwischen Fahrzeug und Mikrofonstandort wird das gleiche Schalllokalisationsprinzip in der vertikalen Ebene angewandt. Der Schalleinfallswinkel ist auf Höhe des Messquerschnittes umso höher, je näher das Fahrzeug am Messquerschnitt vorbei gefahren ist.

Wird eine Vorbeifahrt als einzeln und gültig erkannt, so wird am Maximum des Schalldruckpegels analysiert, ob dieser die in der Norm geforderte Prominenz von 6 dB(A) gegenüber Fremdgeräuschen aufweist. Trifft diese Bedingung zu, so wird der maximale Schalldruckpegel gemeinsam mit der Geschwindigkeit als Wertepaar abgespeichert, zusätzlich werden noch die Anzahl der reflektierten Radarimpulse, die Prominenz des Schalldruckpegels, sowie die T6-Zeit (die Zeit, in welcher der Pegel-Zeit-Verlauf von -6 dB gegenüber dem Maximum

ansteigt und wieder zurück auf -6 dB fällt) als informative Größen und zur weiteren Sortierung mit erfasst.

Sortierungsverfahren

Die bisher erfassten Fahrzeuge müssen klassifiziert werden, d. h. es müssen zum einen zwischen Pkw-, Lkw- und sonstigen (z. B. Motorrad-) Vorbeifahrten unterschieden und innerhalb einer Klasse atypische Vorbeifahrten entfernt werden. Zur Sortierung zwischen Pkw und Lkw ist ein Grenzwert bei der Anzahl der reflektierten Radarimpulse ausreichend.

Atypische Fahrzeuge werden über eine erhebliche Abweichung ihres Terzspektrums gegenüber dem Datenkollektiv aller Vorbeifahrten definiert. Zur Beurteilung wird eine geschwindigkeitsabhängige spektrale Summenabweichung für jede einzelne Vorbeifahrt errechnet. Übersteigt die Summenabweichung einen gewissen Grenzwert, so wird diese Vorbeifahrt als atypisch gekennzeichnet und fließt nicht in die Endauswertung ein.

Validierung

Um das Messsystem zu validieren, wurden bei einer Messung Bilder der vorbeifahrenden Fahrzeuge erfasst und mit aufgezeichnet. Die durch den Algorithmus als gültig gekennzeichneten Fahrzeuge wurden mit den Bildern verglichen, um das Sortierungsergebnis des Algorithmus zu überprüfen. Hierbei ergab sich aus allen als gültig markierten Vorbeifahrten eine Fehlerquote von 4,8 %. Diese setzt sich zusammen aus parallelen Vorbeifahrten (ein Lkw fährt auf der rechten Spur und wird zeitgleich von einem Pkw überholt), Fahrzeugen mit atypischem Geräuschbild und Fahrzeugen auf der falschen Spur.

Zur Validierung verschiedener Messsysteme wurde ein Round-Robin-Test durchgeführt, in dem mehrere beobachtete SPB-Messungen zeitgleich mit dem autonomen Messsystem am selben Ort durchgeführt wurden, um die Abweichungen der konventionellen Messsysteme untereinander, aber auch gegenüber dem autonomen Messsystem aufzuzeigen. Mit den konventionellen Messsystemen wurden Regressionskurven ermittelt, die bei 120 km/h Pegelwerte zwischen 80,0 dB(A) und 80,7 dB(A) auswiesen [4]. Die Messergebnisse des autonomen Messsystems lagen bei dieser Geschwindigkeit bei 81,1 dB(A) und damit sehr nahe an den geführten Messungen, jedoch im direkten Vergleich noch leicht erhöht.

Grund für die Abweichungen ist eine asymmetrische Fehlerverteilung des Messergebnisses. Gefordert ist, das Reifen-Fahrbahn-Geräusch eines einzelnen vorbeifahrenden Fahrzeuges zu erfassen. Treten Fehlmessungen durch Fremdgeräusche auf, so führen diese zu einer Erhöhung des maximalen Schalldruckpegels. Dies führt in Summe zu einer Regressionskurve mit erhöhten Pegelwerten, da bei der Auswahl der Fahrzeuge auch kritische Fahrzeuge enthalten sind, die nicht mehr zwingend als typische Personenkraftwagen gelten.

Die Grenzkriterien für die Wahl von ungültigen Fahrzeugen sind in erster Linie die spektrale Summenabweichung und

die Anzahl an reflektierten Radarimpulsen. Diese wurden ursprünglich weit gefasst, so dass nur offensichtlich atypische Fahrzeuge aus dem Datenkollektiv ausgeschlossen wurden. Da die Messung als autonom arbeitendes System über einen geringeren Informationsstand verfügt als eine kontrollierte Messung, muss die Auswahl wesentlich restriktiver gehandhabt werden. Da andererseits das autonome System längere Messzeiten erlaubt, kann ohne Mehraufwand ein wesentlich größeres Datenkollektiv erfasst werden, Dies erlaubt eine strengere Selektion der auszuwertenden Fahrzeuge.

Das Datenkollektiv der Messung wurde mit verschärften Randbedingungen ein weiteres Mal so ausgewertet, dass nur Vorbeifahrten ausgewählt wurden, die dem Profil des jeweiligen Fahrzeugtyps mit einer wesentlich höheren Sicherheit zugeordnet werden können. Für den Fahrzeugtyp Pkw ergibt sich dann anhand der Regressionskurve bei 120 km/h ein Wert von 80,7 dB(A); das Ergebnis stimmt somit mit dem Ergebnis der geführten Messungen weitgehend überein.

Fazit

Mit Hilfe eines Mikrofonarrays ist es möglich, Fahrzeugvorbeifahrten autonom zu detektieren und SPB-Messungen durchzuführen, deren Ergebnisse mit denen geführter Messungen vergleichbar sind.

Aufgrund des wesentlich umfangreicheren Datensatzes der autonomen Messung können jedoch scharfe Grenzkriterien für die Auswahl gültiger Vorbeifahrten eines Fahrzeugtyps zugrunde gelegt werden. Das Ergebnis der autonomen Messung kann so mit dem der geführten Messung in Übereinstimmung gebracht werden.

Literatur

- [1] DIN ISO EN 11819-1: Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: Statistical Pass-By method
- [2] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 3/2009 vom 31.3.2009 (S 13/7144.2/02-09/1005908, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtplanentwicklung) zu Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – RLS-90
- [3] M. Männel, W. Bartolomaeus und A. Attenberger: Zusätzliche Anforderungen an Statistische Vorbeifahrtmessungen, in Deutsche Jahrestagung für Akustik DAGA, Nürnberg, 2015
- [4] S. Kluth et al.: Untersuchung des Einflusses systematischer Fehler bei der Anwendung des SPB-Verfahrens, in Deutsche Jahrestagung für Akustik, Aachen DAGA, 2016