

Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik der Schallausbreitung von Pkw, Transportern und Lkw

FA 2.274

Forschungsstelle: Gesellschaft für Akustikforschung
Dresden mbH

Bearbeiter: Schulze, C. / Hübelt, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und
Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: April 2008

1 Aufgabenstellung

Die Berechnung der Schallausbreitung des fließenden Verkehrs erfolgt bisher durch Modellierung der einzelnen Fahrzeuge als punkt- oder linienförmige Schallquelle mit kugelförmiger bzw. zylindrischer Richtcharakteristik. Gerade die horizontale Schallausbreitung sowie die Wirksamkeit von Schallschutzmaßnahmen werden jedoch von der gerichteten Schallabstrahlung der vorbeifahrenden Fahrzeuge bestimmt. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Schallbeugung und -reflexion spielt ebenfalls der spektrale Gehalt des emittierten Schalls eine wesentliche Rolle bei der Schallausbreitung.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war die messtechnische Bestimmung der spektralen horizontalen und vertikalen Richtcharakteristik sowie der Schalleistung von Fahrzeugen verschiedenen Typs während der Vorbeifahrt mithilfe eines Mikrofonarray-Messsystems.

Als Mikrofonarray bezeichnet man eine Anordnung von mindestens zwei Mikrofonen. Anwendung finden Mikrofonarrays in den verschiedensten Bereichen der Akustik. Sie dienen vor allem der Lokalisation, Trennung und Analyse von Schallquellen. Die dadurch gewonnenen Informationen sind meist Voraussetzung für die Lärminderung von Maschinen, die Analyse der Geräuschenstehung bei der Umströmung von Objekten, die Suche von akustischen Leckagen oder akustisches Design. Auch in der Sprachverarbeitung lassen sich Anwendungen finden, wie z. B. die Sprecherlokalisierung zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstands von Sprachsignalen als wichtiger Bestandteil der Mensch-Maschine-Kommunikation.

Grundlage des angewendeten Messverfahrens ist die Ausnutzung der steuerbaren Richtwirkungseigenschaft eines Mikrofonarrays, welche durch die Anwendung nachgeschalteter Signalverarbeitung auf die einzelnen Mikrofon-signale erzielt wird. Durch Fokussierung des Mikrofonarrays auf das zu untersuchende Fahrzeug während der Vorbeifahrt können auftretende Störquellen ausgeblendet werden. Die ermittelten Schalldruckkartierungen ermöglichen anschließend die Berechnung der Richtcharakteristik und eine Abschätzung der Schalleistung des Fahrzeugs.

Zu Beginn wurden die Eigenschaften des Mikrofonarrays im Hinblick auf die Lokalisation des vorbeifahrenden Fahrzeugs optimiert. Für die Untersuchungen kam dabei ein Linienarray zum Einsatz, da für die Ermittlung der horizontalen bzw. vertikalen Richtcharakteristik ausschließlich die Quelllokalisierung in horizontaler bzw. vertikaler Richtung notwendig ist. Gegenüber einem zweidimensionalen Mikrofonarray erhöhen sich dadurch bei gleicher Mikrofonanzahl die örtliche Auflösung und die Nebenkeulenunterdrückung (SNR).

Im Hinblick auf die Bestimmung der Schalleistung von Schallquellen wurde das genormte, für quasi-stationäre Quellen angewendete Hüllflächen-Verfahren mit einer Methode verglichen, die in der Literatur zur Abschätzung der Schalleistung

von Schallquellen anhand von ermittelten Schalldruckkartierungen aus Mikrofonarray-Messungen eingesetzt wird. Aufgrund der Vor- und Nachteile beider Vorgehensweisen wurde innerhalb der vorliegenden Untersuchungen eine Anpassung des Hüllflächen-Verfahrens an die näherungsweise Bestimmung der Schalleistung bewegter Quellen mit Mikrofonarray vorgenommen.

Unter Einsatz des konstruierten optimierten Linienarrays fanden messtechnische Untersuchungen zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen spektralen Richtcharakteristik sowie der Schalleistung statt. Die Messungen erfolgten im fließenden Verkehr bei kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw und des Kleintransporters mit konstanter Geschwindigkeit von 50, 80 und 100 km/h. Die Untersuchungen am fünffachsignen Lkw wurden bei kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 und 80 km/h durchgeführt. Die ermittelten Ergebnisse der horizontalen und vertikalen Richtcharakteristik sowie der Schalleistung wurden abschließend analysiert und interpretiert.

2 Untersuchungsmethodik

2.1 Richtcharakteristik

Durch Lokalisation des Fahrzeugs zu verschiedenen Zeitpunkten während der Vorbeifahrt ist es möglich, den vom Fahrzeug am Immissionsort hervorgerufenen Schalldruck für beliebige horizontale Schalleinfallswinkel zu bestimmen. Daraus lässt sich anschließend die horizontale Richtcharakteristik berechnen. Entgegen der Anwendung des Einzelmikrofon-Verfahrens bei stationärer Quelle wird in diesem Fall die Schallquelle um den stationären Empfänger bewegt. Durch Lokalisierung des Fahrzeugs während der Vorbeifahrt unter einem horizontalen Schalleinfallswinkel von 0° und Wiederholung der Vorbeifahrt bei gleicher Fahrzeuggeschwindigkeit mit variiert Höhe des Mikrofonarrays ist es möglich, die vertikale Richtcharakteristik des Fahrzeugs zu bestimmen. Innerhalb der Untersuchungen sollte der Nachteil der kugelförmigen Richtcharakteristik des Einzelmikrofons vermieden werden, indem ein Mikrofonarray mit steuerbarer Richtcharakteristik durch Anwendung des Beamforming-Algorithmus eingesetzt wird.

Die Richtcharakteristik des für die vorliegenden Untersuchungen eingesetzten Mikrofonarrays wurde im Hinblick auf die Lokalisation des vorbeifahrenden Fahrzeugs im Frequenzbereich von 315 bis 3150 Hz optimiert. Die Frequenzbandgrenzen resultieren dabei aus dem energetischen Schwerpunkt des Standardisierten Verkehrslärmspektrums (DIN, 1997). Für die Untersuchungen wurde ein Linienarray gewählt, da für die Ermittlung der horizontalen bzw. vertikalen Richtcharakteristik ausschließlich die Quelllokalisierung in horizontaler bzw. vertikaler Richtung notwendig ist. Gegenüber einem zweidimensionalen Mikrofonarray erhöhen sich dadurch bei gleicher Mikrofonanzahl die örtliche Auflösung und der SNR.

Der Einsatz eines mittels der in (Schulze u. a., 2004) beschriebenen numerischen Synthese optimierten 32-elementigen Linienarrays der Länge von 2,6 m garantiert einen SNR von 18,8 dB. Durch Anwendung einer Hamming-Mikrofonwichtung auf eine äquidistante Mikrofonanordnung konnte der theoretische SNR auf 44,3 dB erhöht werden.

2.2 Schalleistung

Die Normreihe (DIN EN ISO 3744–3746) beschäftigt sich mit der Bestimmung der Schalleistung von quasi-stationären

Schallquellen auf der Basis des Hüllflächen-Verfahrens. Die Schalleistung lässt sich durch Messung des mittleren Schalldrucks ermitteln, der auf der Hüllfläche vorhanden ist, die die Schallquelle umschließt. In Abhängigkeit von der Genauigkeitsklasse besitzt die Hüllfläche eine Vollkugel-, Halbkugel- oder Quaderform, auf der die Messpunkte zur Bestimmung des Schalldruckpegels regelmäßig angeordnet sind. Der Vorteil des Hüllflächen-Verfahrens ist die für die Praxis ausreichend genaue Bestimmung des Schalleistungspegels der Schallquelle. Neben dem hohen zeitlichen Messaufwand kann diese Methode aufgrund des vorbeifahrenden Fahrzeugs nicht angewendet werden.

Ziel ist der Einsatz eines geeigneten Mikrofonarray-Verfahrens zur Bestimmung der Schalleistung einer Schallquelle anhand einer einzelnen Schalldruckkartierung. Der Vorteil eines solchen Verfahrens besteht neben dem geringen zeitlichen Messaufwand in der möglichen Untersuchung von nicht-stationären – z. B. impulsartigen oder bewegten Quellen. Allerdings gestattet eine solche Methode nur eine Abschätzung der Schalleistung, da die Messung des Schalldruckpegels nur innerhalb eines Teils der gesamten Hüllfläche durchgeführt wird. Für die Ermittlung der Schalleistung müssen somit Annahmen für die Schallabstrahlung durch die verbleibende Hüllfläche gemacht werden.

Hald (Hald, 2005) schlägt ein Verfahren vor, das die Integration über die Schalldruckkartierung als Grundlage für die Bestimmung der Schalleistung der Schallquelle verwendet. Simulationsberechnungen des Autors an Modellpunktstrahlern haben gezeigt, dass das Verfahren nur innerhalb eines geringen Öffnungswinkels und für den Fall vollständig inkohärenter Schallquellen einsetzbar ist.

Für die näherungsweise Bestimmung der Schalleistung der Fahrzeuge wurde innerhalb der vorliegenden Untersuchungen eine Anpassung des Hüllflächen-Verfahrens an die näherungsweise Bestimmung der Schalleistung bewegter Quellen mit Mikrofonarray vorgenommen.

3 Akustische Messungen und Ergebnisse

Unter Einsatz des konstruierten optimierten Linienarrays fanden messtechnische Untersuchungen zur Bestimmung der horizontalen und vertikalen spektralen Richtcharakteristik sowie der Schalleistung von Fahrzeugen statt. Bei der Versuchsstrecke handelte es sich um einen asphaltierten, zweispurigen, geradlinigen und ebenen Streckenabschnitt von ca. 350 m Länge. An beide Seiten der Fahrbahn grenzten Weidelandflächen, wodurch Bedingungen für freie Schallausbreitung vorhanden waren. Die Messungen erfolgten im fließenden Verkehr bei kontrollierter Vorbeifahrt des Pkw und des Kleintransporters mit konstanter Geschwindigkeit von 50, 80 und 100 km/h. Die Untersuchungen am fünfsichtigen Lkw wurden bei kontrollierter Vorbeifahrt mit 50 und 80 km/h durchgeführt.

Die Bestimmung der horizontalen Richtcharakteristik erfolgte durch Lokalisation des vorbeifahrenden Fahrzeugs zu verschiedenen Zeitpunkten mit einem horizontal ausgerichteten Linienarray. Als Bezugswinkel wurde ein horizontaler Schalleinfallswinkel von 0° gewählt. Durch Lokalisierung des Fahrzeugs während der Vorbeifahrt in einem definierten Bereich des horizontalen Schalleinfallswinkels und Wiederholung der Vorbeifahrt bei gleicher Fahrzeuggeschwindigkeit mit variierter Höhe des vertikal positionierten Mikrofonarrays konnte die mittlere vertikale Richtcharakteristik des Fahrzeugs ermittelt werden. Als Bezugswinkel wurde ein vertikaler Schalleinfallswinkel von $+10^\circ$ festgelegt.

Die Ergebnisse der horizontalen Richtcharakteristik zeigen eine maximale horizontale Schallabstrahlung der Fahrzeuge im

Bereich von -60° bis -45° und $+30^\circ$ bis $+60^\circ$ (vgl. Bild 1). Die geringste Schallabstrahlung tritt unter einem horizontalen Winkel von -15° bis 0° und somit seitlich der Fahrzeuge auf. In (Sandberg u. a., 2002) sind verschiedene Untersuchungen zusammengefasst, in denen vergleichbare Ergebnisse für die horizontale Richtwirkung ermittelt wurden. Es konnte gezeigt werden, dass die horizontale bzw. vertikale Richtcharakteristik sowie die Schalleistung im gesamten Frequenzbereich von 315 bis 3 150 Hz durch die Richtcharakteristik der die Schallemission dominierenden Terzbänder bestimmt wird. Für den Pkw bzw. den Kleintransporter liegt der spektrale Schwerpunkt unabhängig von der untersuchten Geschwindigkeit im Frequenzbereich von 1000 bis 1 600 Hz bzw. 630 bis 1 000 Hz. Beim Lkw kommt es durch die Änderung der Geschwindigkeit von 80 auf 50 km/h zu einer Verschiebung des spektralen Schwerpunkts von 630 bis 1 000 Hz auf 500 bis 800 Hz. Durch Lokalisation des Pkw mit dem Mikrofonarray konnte gezeigt werden, dass im Frequenzbereich oberhalb von 1 000 Hz das Reifen-Fahrbahn-Geräusch des Pkw die Motoren- und Getriebe Geräusche sowie die aerodynamischen Schallquellen (= Hauptursachen der Schallabstrahlung eines vorbeifahrenden Fahrzeugs nach Sandberg u. a., 2002) dominiert. Dabei entsteht beim Reifen-Fahrbahn-Kontakt sowohl vor als auch hinter dem Reifen Schall, dessen Amplitude mit zunehmender Geschwindigkeit ansteigt. Daraus resultiert eine symmetrische Schallabstrahlung des Pkw. Begünstigt durch den Horneffekt, wurde für den Pkw unter einem horizontalen Schalleinfallswinkel von -60° bis -30° bzw. $+30^\circ$ bis $+60^\circ$ eine maximale horizontale Richtwirkung von bis zu $+6$ dB ermittelt. Für den Kleintransporter und den Lkw ist die auf den Winkel von 0° bezogene Symmetrie der horizontalen Richtcharakteristik weniger stark ausgeprägt. So dominiert z. B. außerhalb des Bereichs von -30° bis $+30^\circ$ die frontseitige Schallabstrahlung beider Fahrzeuge gegenüber der Schallemission unter positivem Winkel. Ursache dafür können, neben verstärkt auftretenden Motorengeräuschen, aerodynamische Geräusche sein, die besonders im Bereich des Übergangs zwischen Frontscheibe und Dach der Fahrzeuge auftreten.

Die Ergebnisse der vertikalen Richtcharakteristik zeigen, dass die maximale vertikale Schallabstrahlung für die verschiedenen Fahrzeuge in unterschiedlichen Bereichen auftritt. Für den Pkw beträgt der Winkel maximaler vertikaler Schallabstrahlung im untersuchten Bereich geschwindigkeitsunabhängig $+10^\circ$. Die geringste Schallabstrahlung tritt unter einem vertikalen Winkel von $+32^\circ$ bis $+38^\circ$ auf. In (Sandberg u. a., 2002) dargestellte Ergebnisse einer Studie zeigen, dass die stärkste vertikale Schallabstrahlung unter einem Winkel von 0° auftritt. Zu größeren Einfallswinkeln hin nimmt die Schallabstrahlung wie im Falle der vorliegenden Messergebnisse ab. Für den Kleintransporter und den Lkw variiert der Winkel maximaler vertikaler Schallabstrahlung mit der Fahrzeuggeschwindigkeit zwischen $+21^\circ$ bis $+38^\circ$ bzw. $+21^\circ$ bis $+32^\circ$. Die geringste Schallabstrahlung findet beim Kleintransporter geschwindigkeitsunabhängig unter $+10^\circ$, beim Lkw unter $+21^\circ$ bzw. $+38^\circ$ statt (vgl. Bild 2). Es sei darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse der einzelnen Vorbeifahrten am Kleintransporter und am Lkw zur Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik gegenüber den Messungen zur horizontalen Richtwirkung unter den verschiedenen vertikalen Schalleinfallswinkeln in der Amplitude um bis zu 1,5 dB voneinander abweichen. Es wird vermutet, dass die einzelnen Fahrzeugzustände (Drehzahl, Gang) zwischen den Vorbeifahrten im fließenden Verkehr nicht konstant gehalten wurden. Für zukünftige Untersuchungen wird daher empfohlen die vertikale Schallabstrahlung unter den verschiedenen Winkeln nicht durch mehrere Vorbeifahrten zu realisieren, sondern eine Mikrofonanordnung über die gesamte Höhe zu verwenden und für die verschiedenen Winkel unterschiedliche Bereiche der Mikrofonanordnung auszuwerten. Bei Anwendung eines äquidistanten Linienarrays hätte dies

außerdem den Vorteil, die Anzahl der betrachteten vertikalen Schalleinfallswinkel ohne zusätzlichen Messaufwand deutlich zu erhöhen.

Die Ergebnisse der Schalleistung der Fahrzeuge zeigen wiederum den für die verschiedenen Fahrzeuge typischen spektralen Verlauf. Die Schalleistung steigt dabei mit zunehmender Fahrzeug-Geschwindigkeit an, da das Reifen-Fahrbahn-Geräusch als dominante Schallquelle mit der Geschwindigkeit des Fahrzeugs zunimmt. Der Gesamt-Schalleistungspegel des Kleintransporters liegt durchschnittlich 2,7 dB über dem des Pkw. Die Pegeldifferenz zwischen Lkw und Pkw beträgt im Mittel 12,3 dB (vgl. Bild 3). Bei Betrachtung der spektralen Pegelunterschiede lässt sich erkennen, dass die größten Pegelunterschiede im spektralen Schwerpunkt des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs auftreten. Dies zeigt, dass die zur näherungsweisen Bestimmung der Schalleistung mit Mikrofonarray getroffene Annahme, dass der mittlere Schalldruckpegel durch front- und rückseitige Schallabstrahlung gleich dem mittleren Schalldruckpegel durch seitliche Schallabstrahlung ist, zu einer deutlichen Unterschätzung der gesamten Schalleistung des Fahrzeugs führt. Auch durch die zweite Festlegung, dass die vernachlässigbare mittlere dachseitige Schallabstrahlung gleich der mittleren seitlichen Schallemission ist (was der Beschreibung einer allseitig konstant abstrahlenden Schallquelle entspricht), kann der Unterschätzung der Gesamtschalleistung aufgrund der energetisch vermindert einbezogenen stärkeren front- und rückseitigen Schallabstrahlung nicht entgegengewirkt werden. Für zukünftige messtechnische Untersuchungen wird daher empfohlen, die front- und rückseitige Schallabstrahlung mithilfe eines horizontalen Linienarrays zu erfassen, unter dem das Fahrzeug hindurch fährt. Dies ermöglicht ebenfalls die Bestimmung des mittleren dachseitigen Schalldruckpegels und damit bei gleichzeitiger Messung der vertikalen Schallabstrahlung mit vergrößerter Mikrofonanordnung die Bestimmung der allseitigen Schallabstrahlung des Fahrzeugs durch eine einzelne Vorbeifahrt.

4 Literatur

Deutsches Institut für Normung (DIN) (1997): DIN EN 1793-3: Lärmschutzeinrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften, Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum, November 1997.

Deutsches Institut für Normung (DIN) (1995): DIN EN ISO 3746: Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächen-Verfahren der Genauigkeitsklasse 3 über einer reflektierenden Ebene (ISO 3746:1995), Dezember 1995.

Hald, J. (2005): Combined NAH and Beamforming Using the Same Array. Technical Review, Brüel & Kjaer, Heft 1, 2005.

Sandberg, U.; Ejsmont, J. A. (2002): Tyre/Road Noise Reference Book, Informex, Kisa (Sweden).

Schulze, C.; Sarradj, E.; Zeibig, A. (2004): Characteristics of microphone arrays. Proceedings of Internoise 2004, Prague, Czech Republic, August 22nd – 25th 2004.

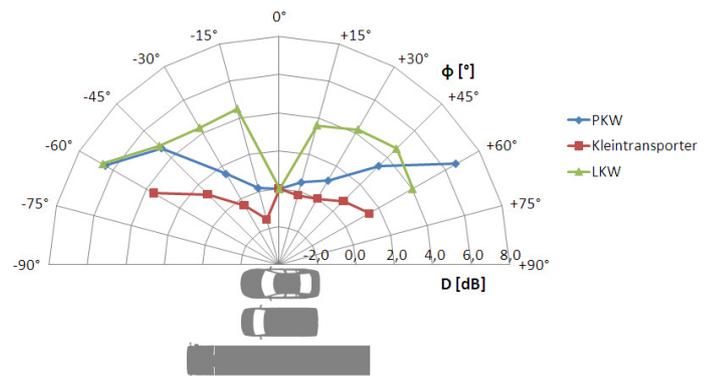


Bild 1: Horizontale Richtcharakteristik der Fahrzeuge bei kontrollierter Vorbeifahrt mit v = 80 km/h, Gesamtpegel 315 bis 3 150 Hz

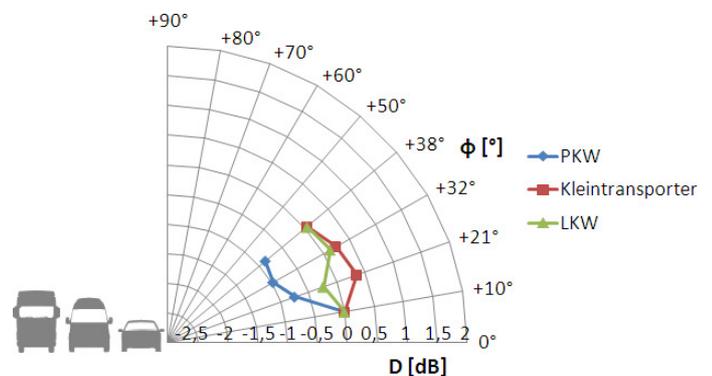


Bild 2: Vertikale Richtcharakteristik der Fahrzeuge bei kontrollierter Vorbeifahrt mit v = 80 km/h, Gesamtpegel 315 bis 3 150 Hz

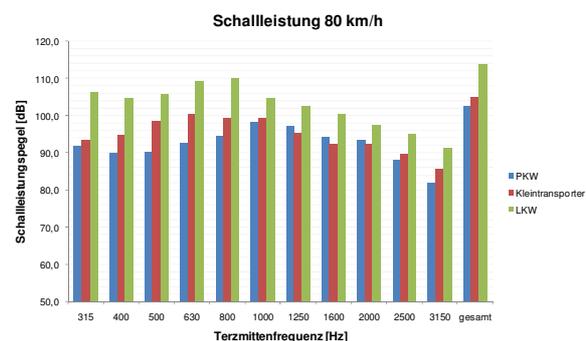


Bild 3: Schalleistungspegel der Fahrzeuge bei kontrollierter Vorbeifahrt mit v = 80 km/h , Terzpegel und Gesamtpegel 315 bis 3 150 Hz