Anwendung von Beamforming für Vorbeifahrtsmessungen

Andreas Fuchs[1], Marco Conter[1], Reinhard Wehr[1], Martin Hagmüller[2], Hannes Pessentheiner[2]
[1] *AIT - Austrian Institute of Technology GmbH, Mobility Department, Transportation Infrastucture Technologies*
[2] *Technische Universität Graz - Signal Processing and Speech Communication Laboratory*

Einleitung und Problemstellung

Statistical Pass-By (SPB) Messungen nach ISO 11819-1 [1] werden in der Regel dazu verwendet, den Einfluss der Straßenoberfläche auf den Verkehrslärm zu bestimmen. Hierbei werden die Vorbeifahrtspegel der einzelnen Fahrzeuge bestimmt, die den durchschnittlichen Verkehrsfluss widerspiegeln sollen. Um diesen Einzelvorbeifahrtspegel zu messen, müssen jedoch große Abstände zwischen den Fahrzeugen vorhanden sein, wodurch Messungen je nach Verkehrslage zeitaufwändig werden können und deshalb oft nur in der Nacht sinnvoll durchführbar sind. Für die Anwendung von Beamforming für Vorbeifahrtsmessungen gibt es mehrere Ansätze (vgl. [2]), der Fokus dieses Artikels liegt auf der Optimierung der Geometrie und des Beamforming-Algorithmus, um bereits in diesem Schritt eine pegelgenaue Abbildung zu erreichen. Dabei wird die Richtcharakteristik des Beamformes angepasst, um einen PKW vollständig abdecken ($7-8$ Meter entlang der Straße) und alle Nebenkeulen möglichst gut dämpfen zu können. Dadurch soll nur der Pegel des vorbeifahrenden, relevanten Fahrzeuges gemessen werden. Nach Optimierung in der Simulation zeigen Messungen von Einzel- und Doppelvorbeifahrten die pegelgenaue Abbildung und Quellenseparierung.

Beamforming

Algorithmus

Mikrofonarrays ermöglichen durch eine räumliche Abtastung des Schallfeldes die Verarbeitung von Richtungsinformationen. Durch Kombination der Mikrofonsignale entsteht eine höhere beziehungsweise in der Nachverarbeitung einstellbare Richtwirkung [3]. Dies geschieht durch Kompensation der Laufzeiten zu den einzelnen Mikrofonpositionen aus der gewünschten Richtung und anschließender Summierung. Dies kann mit einem Skalarprodukt im Frequenzbereich erreicht werden.

$$Y(f) = \mathbf{W}(f)^\top \mathbf{X}(f) \tag{1}$$

Im Vektor $\mathbf{W}(f)$ $(N \times 1)$ stehen die komplexen Koeffizienten zur Realisierung der Zeitverzögerung und Amplitudengewichte für die Frequenz f. $\mathbf{X}(f)$ $(N \times 1)$ enthält die N Mikrofonsignale und $Y(f)$ das Ausgangssignal des Beamformers. Dies führt zum gängigen Delay&Sum-Beamformer. Zwar ist dieser Beamforming-Algorithmus robust für unkorreliertes Rauschen auf den einzelnen Mikrofonkanälen [3], die Hauptkeule ist jedoch gerade zu hohe Frequenzen hin sehr schmal, wie in Abbildung 3 auf der rechten Seite zu sehen ist.

Um eine konstante Breite der Hauptkeule zu erreichen, werden die Filterkoeffizienten $\mathbf{W}(f)$ des Beamformers mittels eines *Least-Squares* Algorithmus berechnet, der die Vorgabe einer gewünschten Richtwirkung erlaubt. Die zu minimierende Kostenfunktion $\mathcal{J}$ lautet:

$$\mathcal{J} = ||\mathbf{\Delta} - \mathbf{D}(f)\mathbf{W}(f)|| + \lambda ||\mathbf{W}(f)|| \tag{2}$$

Die Vorgabe der Richtwirkung erfolgt über den Vektor $\mathbf{\Delta}$ $(M \times 1)$ mit M vorgegebenen Richtungen; im einfachsten Fall steht hier für die Richtungen der Hauptkeule eine 1, ansonsten eine 0. Die Matrix $\mathbf{D}(f)$ $(M \times N)$ beschreibt das physikalische Modell der Ausbreitung aus diesen Richtungen zur jeweiligen Mikrofonposition. Der erste Summand in Gleichung (2) minimiert somit den Fehler zur Vorgabe. $||\mathbf{W}(f)||$ ist der Noise Gain des unkorrelierten Rauschens und soll ebenso minimiert werden. Über diesen Zusatz kann mithilfe des zu wählenden Parameters λ die Robustheit des Algorithmus auf unkorreliertes Rauschen eingestellt werden. Dies ist insofern relevant, da eine nicht exakte Positionierung der Mikrofone als unkorreliertes Rauschen aufgefasst werden kann [3]. Bei geeigneter Wahl von λ ist eine praxistaugliche Genauigkeit im Millimeterbereich für die Positionierung ausreichend.

Um die Welligkeit in der Hauptkeule zu minimieren, empfiehlt es sich nicht eine Binärmaske (0 & 1) im Vektor $\mathbf{\Delta}$ zu verwenden, sondern den Sperrbereich mit zum Beispiel -40 dB festzulegen und mit Hilfe eines Raised-Cosine einen glatten Übergang zur Hauptkeule zu realisieren.

Array-Geometrie

Es wurden nur linienförmige Geometrien untersucht. Der Einfluss der damit einhergehenden Rotationssymmetrie wurde im Hinblick auf den weitaus geringeren Aufwand beziehungsweise der prinzipiellen Durchführbarkeit in Kauf genommen. Es wurden Anordnungen mit maximal 15 Mikrofonen untersucht. Der kleinste vorkommende Mikrofonabstand d_{min} bestimmt den nutzbaren Frequenzbereich eines Arrays

$$f < \frac{c}{2d_{min}} \qquad [\mathrm{Hz}] \tag{3}$$

mit der Schallgeschwindigkeit c. Weiters spielen ebenso die Positionen entlang des Arrays eine Rolle in der resultierenden Richtwirkung. Neben dem klassischen äquidistanten Array wurden Geometrien mit Anordnungen nach dem Golomb-Lineal (vgl. [2]) und Anordnungen mit einer höheren Anzahl an Mikrofonen in der Mitte des Arrays, infolge als *gespreizte* Arrays bezeichnet, verwendet. Hierbei werden N Mikrofone im Bereich von -10 m bis $+10$ m gleichmäßig verteilt (Positionen $x_i, i = 1 \ldots N$)

und mit einem kubischen Anteil gewichtet:

$$p_i = x_i^3 + a x_i \qquad [\mathrm{m}], \qquad a \geq 0 \tag{4}$$

Aus den äquidistanten Positionen x_i der Mikrofone kommt es in Abhängigkeit des Parameters a zu einer Spreizung des Arrays mit den neuen Positionen p_i relativ zum Arraymittelpunkt. Durch Skalierung kann die gewünschte Länge beziehungsweise die maximale obere Grenzfrequenz eingestellt werden.

Simulation

Das Ziel der Simulation war, durch eine optimale Auswahl der Parameter eine möglichste breite (8 Meter), aber zugleich flache Hauptkeule entlang der Straße mittels einem Least-Squares Beamformer zu realisieren. Einfluss und sinnvoller Parameterbereich wurden mit Hilfe einer eigens erstellten MATLAB-GUI untersucht. Neben der Richtwirkung für einzelne Frequenzen und des Gesamtpegels entlang der Straße wurden der Noise Gain, die resultierende Beambreite und weitere Performanceparameter analysiert. Als Eingangsgrößen dienten neben der Geometrie (Länge, Anzahl der Mikrofone, Form), verschiedene Parameter für den Least-Squares Algorithmus (λ, vorgegebene Breite der Hauptkeule, Sperrbereichsdämpfung, Raised-Cosine Roll-off Faktor), sowie die Ungenauigkeit der Mikrofonpositionierung. Hier konnten zwei gegenläufige Tendenzen beobachtet werden:

- Anordnungen mit mehr Mikrofonen in der Mitte des Arrays zeigen weniger Frequenzabhängigkeit in der Breite der Hauptkeule.
- Der Least-Squares Beamformer bevorzugt jedoch ähnliche Mikrofonabstände, weshalb die Golomb-Anordnungen verworfen wurden.

Um hier ein Optimum zu finden, wurde auf eine Monte-Carlo-Simulation zurückgegriffen und es wurden die Beamformer- und Array-Eigenschaften für 100.000 unterschiedliche Parameterkombinationen ermittelt. In Anlehnung an ÖNORM EN 61672-1 [4] für Schallpegelmesser wird eine maximale Abweichung von ±1 dB innerhalb der Hauptkeule des Gesamtpegels akzeptiert, was den strengsten Vorgaben zur Richtcharakteristik von Schallpegelmessern der Klasse 1 entspricht. Sofern die Welligkeit in der Hauptkeule in diesem Rahmen bleibt, kann eine 1 dB-Beambreite (BW1) in Metern entlang der Straße angegegeben werden, die es zu maximieren gilt. Um die Nebenkeulendämpfung zu beschreiben, kann eine 20 dB-Beambreite (BW20) angegeben werden, ab der mindestens 20 dB Dämpfung erreicht sind. Diese sollte natürlich möglichst klein sein. 234 Kombinationen besitzen eine BW1 von mehr als 7 m und eine BW20 von unter 35 m. Um aus diesen strengen Schranken eine optimale Lösung zu finden, wurden weitere Parameter abgeleitet: Das Verhältnis BW1/BW20 gibt die Steilheit der Flanke der Hauptkeule (möglichst groß) an. Die Standardabweichung der für jede Frequenz berechneten BW1 sollte wiederum möglichst klein sein.

In Abbildung 1 ist zwischen den Indizes 135 und 160 bzw. 160 und 183 jeweils eine ähnliche Struktur zu erkennen. Innerhalb des gesamten Bereichs variieren nur zwei Parameter: Einerseits ist die Sperrbereichsdämpfung in der ersten Hälfte (Index 135 bis 160) bei −40 dB, in der zweiten Hälfte (Index 161 bis 183) bei −100 dB, wobei dies die nächste Parameterstufe ist und auch nicht viel Unterschied zwischen den beiden Bereichen zu sehen ist. Andererseits ändert sich der Faktor a für die Spreizung des Arrays jeweils im gleichen Bereich monoton steigend. Dieser wurde schließlich auf den jeweils niedrigsten Wert festgelegt, da dies die größte Flankensteilheit beziehungsweise eine bessere Abdeckung tieferer Frequenzen bedeutet. Erwartungsgemäß ist mit den meisten Mikrofonen ($N = 15$) die beste Performace zu erreichen.

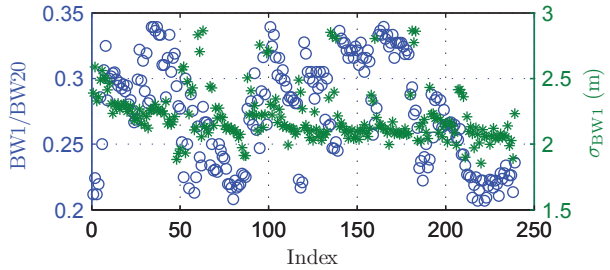

Abbildung 1: Performanceparameter BW1/BW20 und σ_{BW1} für verschiedene Parameterkombination aus den Ergebnissen der Monte-Carlo-Simulation. Blaue Kreise stehen als Verhältnis BW1/BW20 für die Steilheit der Flanke (möglichst groß), die grünen Kreuze für die Standardabweichung σ der BW1 über die Frequenz (möglichst klein). Zwischen Index 135 und 180 liegen optimale Kombinationen.

Abbildung 2: Aus der Simulation optimierte Mikrofonpositionen. Die Grenzfrequenz liegt bei 4,7 kHz. Das Mikrofon im Arrayzentrum wurde für die Auswertungen als Referenz verwendet.

Die Parameter Roll-off Faktor, Breite der Hauptkeule und λ für den Least-Squares Algorithmus sind in diesem Bereich der Indizes konstant und somit für die Auswertung festgelegt. Abbildung 3 zeigt die Richtwirkung entlang der Straße mit den gewählten Parametern für den Least-Squares Beamformer. Um die Robustheit zu testen, wurden die Mikrofone in der Simulation zufällig per Gaußverteilung mit einer Standardabweichung von 1 mm aus der idealen Position verschoben.

Messung

Angelehnt an [5] wurden Controlled-Pass-By (CPB) Messungen durchgeführt. Hierbei wurden Einzel- und Doppelvorbeifahrten mit zwei PKWs mit geringem Abstand durchgeführt, um einerseits die pegelgenaue Abbildung, andererseits die Quellentrennung zu überprüfen.

Messaufbau

Der Messaufbau orientiert sich an den Vorgaben aus [1] zur SPB-Messung. Das Mikrofonarray wird parallel

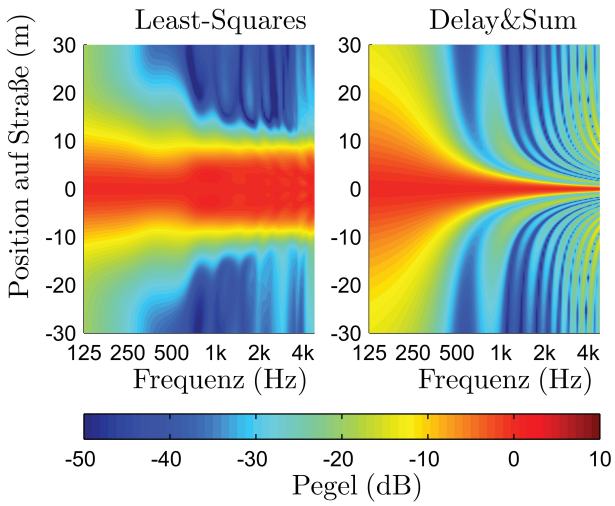

Abbildung 3: Richtwirkung entlang der Straße mit dem Least-Squares Beamformer (links) und einem Delay&Sum-Beamformer (rechts) über der Frequenz. Der Beam ist im rechten Winkel zum Array nach vorne gerichtet.

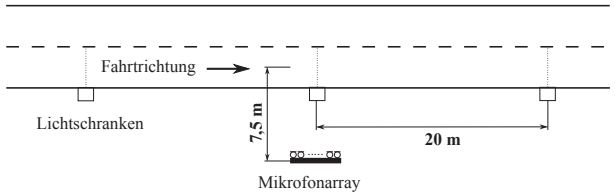

Abbildung 4: Messaufbau für die CPB-Messung. Lichtschranken an den Positionen −20, 0 und 20 m relativ zur Position des Mikrofonarrays entlang der Straße zur Geschwindigkeits-, Position- und Abstandsbestimmung. Höhe des Mikrofonarrays: 1, 2 m.

zur Straße in 7, 5 m Entfernung und 1, 2 m Höhe positioniert. Die Mikrofone wurden mit Hilfe einer Positionierungshilfe aus Plexiglas, die per Laser zurecht geschnitten wurde, ausgerichtet. Um die Position, Geschwindigkeit und den Abstand zwischen den Fahrzeugen zu messen, wurden drei Lichtschrankensensoren entlang der Straße positioniert, wie in Abbildung 4 dargestellt. Als Messfahrzeuge dienten ein BMW X3 und ein Volvo XC 60 (Kompakt-SUVs). Die Mikrofone (Brüel&Kjaer 4189-L-001 & Norsonic Nor1220) wurden mit drei synchronisierten Brüel&Kjaer Pulse 3560 B-130 Systemen aufgezeichnet. Die gesamte Messkette wurde vor der Messung kalibriert. Der zu messende Geschwindigkeitsbereich lag zwischen 20 und 70 km/h und für die Doppelvorbeifahrten wurden Sicherheitsabstände von 1 bis 3 Sekunden gewählt.

Fokussierung

Der Ansatz die Hauptkeule des Mikrofonarrays statisch nach vorne zu richten, brachte nur unbefriedigende Ergebnisse, da sich bei hohen Geschwindigkeiten das Fahrzeug nur sehr kurz innerhalb der Hauptkeule aufhält. Dadurch entstehen bei zeitbewerteten Pegeln (L_{Af}, L_{AE}) relevante Abweichungen. Die Dämpfung des Hintergrundgeräuschpegels, die durch die Richtcharakteristik des Mikrofonarrays entsteht, kann jedoch mit mindestens 4 dB abgeschätzt werden und CPB-Messungen bei leiseren Fahrzeugen wie zum Beispiel Elektroautos bei niedrigen Geschwindigkeiten ermöglichen.

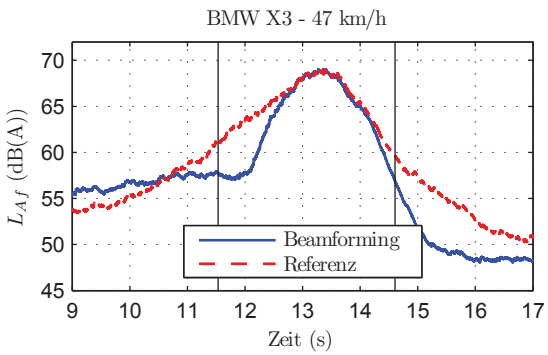

Abbildung 5: Vorbeifahrtspegel einer Einzelfahrt. In durchgezogenem Blau der Pegel mit Beamforming, in strichliertem Rot der Pegel am Referenzmikrofon. Die vertikalen schwarzen Linien zeigen die Fahrt innerhalb von ±20 m um das Array an.

Mithilfe der Lichtschranken ist jedoch die Position des zu messenden Fahrzeuges bekannt. Um den Pegelverlauf möglichst gut abzubilden, wurde daher zu jedem Zeitblock (8192 Samples bei einer Samplingfrequenz $f_S = 65536$ Hz) die Hauptkeule möglichst genau auf das Fahrzeug gerichtet. Die Beamforming Koeffizienten $\mathbf{W}(f)$ wurden für alle möglichen Positionen im 10 cm-Raster im Voraus berechnet und jeweils eingesetzt.

Ergebnisse - Einzelvorbeifahrt

Da die Hautpkeule entlang der Straße breit genug ist das gesamte Fahrzeug und somit alle Schallquellen abzudecken, ist eine pegelgenaue Messung mit dem Array möglich. Durch das dynamische Mitführen der Fokussierung des Arrays ist dies auch über einen größeren Bereich möglich, siehe Abbildung 5. Im Bereich −20 bis −10 m zeigt sich ein höherer Pegel des Referenzmikrofons. Die Ursache konnte nicht gefunden werden, der durch das Beamforming erhaltene Pegelverlauf ist jedoch symmetrischer. Wenn sich das Fahrzeug direkt vor dem Array befindet, werden kleinste Pegelschwankungen abgebildet.

Wie bei SPB-Messungen üblich, wurde aus den maximalen Vorbeifahrtspegeln für verschiedenen Geschwindigkeiten eine lineare Regression über die logarithmische Geschwindigkeit berechnet. Abbildung 6 zeigt die hohe Übereinstimmung.

Tabelle 1 fasst die Abweichung, die sich durch das Beamforming ergeben, mit Hilfe des Mittelwertes μ_X und der Standardabweichung σ_X der Differenz der Maximalpegel zusammen. Im Mittel ergibt sich für beide Fahrzeuge mit Beamforming ein um 0, 06 dB höherer Pegel. Um diesen minimalen Fehler als systematischen Offset identifizieren und korrigieren zu können, sind weitere Messungen nötig. Der Messfehler liegt derzeit unter 5 %.

Ergebnisse - Doppelvorbeifahrt

Um die Quellentrennung zu untersuchen, wurden Vorbeifahrten mit unterschiedlichen Abständen zwischen den

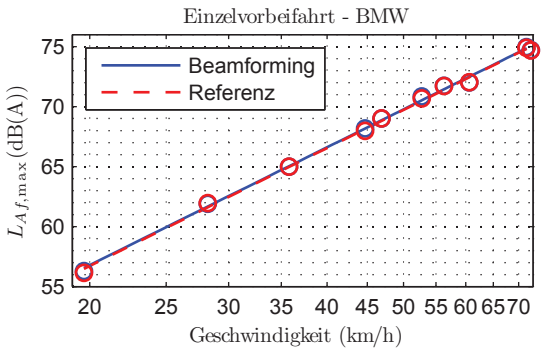

Abbildung 6: Lineare Regression des maximalen Vorbeifahrtspegels ($L_{Af,\max}$) über die logarithmische Geschwindigkeit. Die Regressionsgeraden sind nahezu deckungsgleich.

Tabelle 1: Mittelwert μ_X und Standardabweichung σ_X der Abweichung des über Beamforming berechneten Pegels zum Pegel des Referenzmikrofons: $X = L^{\mathrm{BF}}_{Af,\max} - L^{\mathrm{Ref}}_{Af,\max}$

	BMW	Volvo
μ_X	0,06 dB	0,06 dB
σ_X	0,08 dB	0,10 dB

Fahrzeugen durchgeführt. Abbildung 7 zeit eine Vorbeifahrt mit circa zwei Sekunden Sicherheitsabstand bei 22 km/h. Die Fokussierung des Mikrofonarrays wird für jedes Fahrzeug getrennt durchgeführt, allerdings nur innerhalb von ±20 m. Dadurch überlagern sich die Pegelverläufe am Anfang und Ende. Während die beiden Fahrzeuge im Referenzmikrofon praktisch nicht erkennbar sind, zeigen die mittels Beamforming berechneten Pegelverläufe klar die jeweilige Vorbeifahrt an. Um den Maximalpegel des Referenzmikrofons zu bestimmen, wird für das jeweilige Fahrzeug nur der bestmögliche Bereich herangezogen (beispielsweise in Abbildung 7 von beziehungsweise ab Sekunde 16).

Das Ziel, mit Beamforming den Vorbeifahrtspegel eines PKWs ohne Störung durch ein unmittelbar nachfolgendes oder vorausfahrendes Fahrzeug zu messen, zeigt Abbildung 8. Die bei den Doppelvorbeifahrten mittels Beamforming ermittelte Regressionsgerade ist sehr nahe der

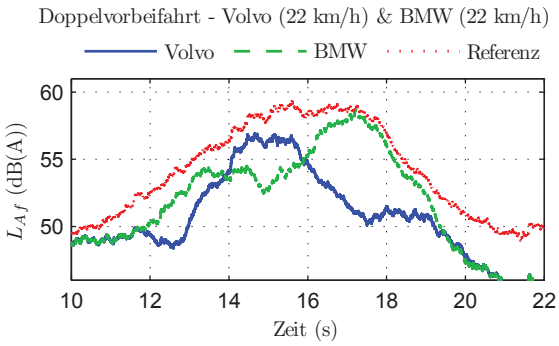

Abbildung 7: Doppelvorbeifahrt mit zwei PKWs mit zwei Sekunden Sicherheitsabstand bei 22 km/h (durchgezogen Blau und gestrichelt Grün). Der Pegel des Referenzmikrofons (punktiert Rot) zeigt kaum die Doppelvorbeifahrt an.

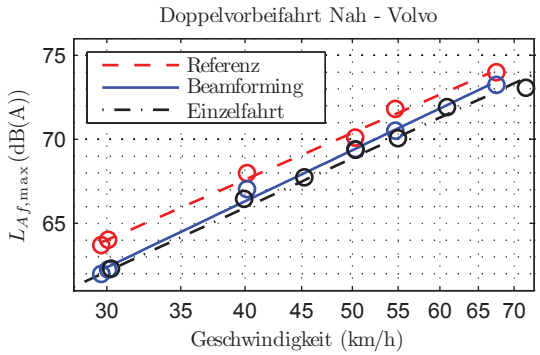

Abbildung 8: Lineare Regression des Vorbeifahrtspegels über die logarithmische Geschwindigkeit. In strichliertem Rot der maximale Vorbeifahrtspegels des Referenzmikrofons, in Blau der mittels Beamforming berechnete Maximalpegel. Zum Vergleich ist die Regressionsgerade aus der Einzelvorbeifahrtsmessung in strichpunktiert Schwarz dargestellt.

Regressionsgerade aus den Einzelvorbeifahrten für dieses Fahrzeug. Der maximale Pegel eines einzelnen Fahrzeugs aus den Doppelvorbeifahrten des Referenzmikrofons ist erwartungsgemäß um bis zu 3 dB höher. Für diese Regression wurden nur knappe Abstände zwischen den beiden Fahrzeugen (unter 1,7 Sekunden) verwendet.

Fazit und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass durch die anwendungsorientierte Anpassung der Geometrie und des Beamforming-Algorithmus eine sehr pegelgenaue Messung möglich ist. Die Quellenseparierung bei mehreren Fahrzeugen zeigt aussichtsreiche Ergebnisse. Eine Bestimmung des Vorbeifahrtpegels bei dichterem Verkehr und der Erhalt von mehr Messdaten in kürzerer Zeit sollte möglich sein. Dies soll in einem nächsten Schritt mithilfe einer Statistical Pass-By Messung überprüft werden, denn erst durch weitere Messungen können etwaige Fehlerquellen eindeutig identifiziert werden. Außerdem kann ein geringerer Hintergrundgeräuschpegel erreicht werden, der den höheren Aufwand wieder wett macht. Die, wenn auch minimale, zusätzlich eingeführte Fehlerquelle kann jedoch je nach Anwendung relevant sein.

Literatur

[1] ISO 11819-1: Acoustics - Measurement of the influence of road surface on traffic noise - Part 1: Statistical Pass-By method, 1997

[2] Püschel, D.: Einsatz eines Mikrofon-Arrays für Statistische Vorbeifahrt-Messungen (SPB). Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 1054 (2011)

[3] Tashev, I.: Sound Capture and Processing: Practical approaches. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2009

[4] ÖNORM EN 61672-1: Elektroakustik - Schallpegelmesser. Teil 1: Anforderungen, 2005

[5] Sandberg, U.; Ejsmont, J.A.: Tyre/Road Noise Reference Book. Informex, Kisa, 2002