

Einsatz eines Mikrofon-Arrays für statistische Vorbeifahrt-Messungen (SPB)

FA 2.299

Forschungsstelle: Akustik Technologie Göttingen

Bearbeiter: Püschel, D. / Auerbach, M. / Bartolomaeus, W.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Bonn

Abschluss: November 2010

1. Aufgabenstellung

Bei statistischen Vorbeifahrtmessungen werden die Geräusche vieler einzelner Fahrzeuge während der Vorbeifahrt gemessen, um die akustische Qualität der Straße zu bestimmen. In der Praxis stellt sich dabei oft das Problem, dass die Fahrzeuge zu dicht hintereinander fahren um sie getrennt messen zu können. Das Kriterium ist hier, dass der Pegel zwischen den Fahrzeugen um mindestens 6 dB abnehmen soll, was im dichten Verkehr oft nicht mehr gegeben ist.

Die Durchführung der Messungen wird damit sehr langwierig, weil abgewartet werden muss, bis einzelne Fahrzeuge gemessen werden können oder die Messungen müssen zu Zeiten mit geringer Verkehrsdichte durchgeführt werden, also z. B. nachts. In beiden Fällen ist der Aufwand für die Durchführung der Messungen stark erhöht.

Benötigt wird daher eine Methode, die auch die Messung bei dichtem Verkehr erlaubt. Es sollte untersucht werden, inwieweit es mit einem Mikrofon-Array möglich ist die Messung auf ein einzelnes Fahrzeug zu fokussieren und so die Schallquellen der Fahrzeuge zu trennen. Mit einem Array von Mikrofonen lassen sich je nach Verrechnung bestimmte Richtcharakteristiken erzeugen, die dann auf den gewünschten Bereich fokussiert werden sollen.

Ziel ist es, die unerwünschten Geräuschquellen soweit auszublenken, dass die Pegelkurve eines einzelnen Fahrzeugs dargestellt werden kann, so als ob dieses Fahrzeug allein auf der Straße wäre.

2. Untersuchungsmethodik

Das gesuchte Messverfahren besteht zum einen aus der Anordnung der Messmikrofone und zum anderen aus dem Verrechnungsverfahren für die Mikrofon-signale. Beide Komponenten müssen für das geforderte Ziel optimiert bzw. entwickelt werden.

Das sich daraus ergebende Messsystem wird dann mit realen, kontrollierten Vorbeifahrten getestet. Statt also zufällig vorbeifahrende Fahrzeuge zu messen, wurden Testfahrzeuge einzeln und in Kombination mit unterschiedlichen Abständen zwischen den Fahrzeugen gemessen. Aus den Einzelmessungen konnte der reale Pegel eines Fahrzeugs bei verschiedenen Geschwindigkeiten direkt ermittelt werden, welcher dann mit den Pegeln verglichen wurde, der aus den Messungen mit zwei dicht hintereinander fahrenden Fahrzeugen extrahiert wurde.

Da die Pegel auch bei gleichem Fahrzeug noch eine statistische Schwankung aufweisen und von der Geschwindigkeit abhängt, wurden sie über der Geschwindigkeit aufgetragen und dann mit und ohne Quellentrennung verglichen.

Einen weiteren Vergleich boten Messungen mit Lautsprechern am Fahrzeug. Über sie wurde Rauschen mit definiertem Pegel ausgegeben und untersucht, inwieweit dieser von den anderen Fahrzeuggeräuschen (im wesentlichen Reifen) während der Vorbeifahrt trennbar ist.

Diese Fahrttests wurden sowohl mit PKW als auch mit LKW durchgeführt, um die Eignung für beide Fahrzeugklassen zu verifizieren.

2.1 Mikrofon-Anordnungen

Es wurden 3 lineare Mikrofonanordnungen untersucht mit je 6, 10 und 20 Mikrofonen, um zu sehen, welcher Aufwand für die Realisierung mindestens nötig ist. Die Anordnung der Mikrofone erfolgte entsprechend einem Golomb-Lineal. Das heißt, dass kein Abstand zwischen den Mikrofonen doppelt vorkommt und das Lineal ist optimal, wenn dabei die kürzest mögliche Gesamtlänge gewählt wird. Mit den drei Arrays wurde parallel gemessen, sodass die resultierenden Pegelkurven direkt verglichen werden können. Dazu wurden also 36 Mikrofon-signale parallel erfasst.



Bild 1: Die drei linearen Arrays auf einem gemeinsamen Träger zusammen mit der Elektronik zur Datenerfassung.

Die Arrays wiesen eine Gesamtlänge von 884, 1 375 und 2 264 mm auf (für 6, 10 und 20 Mikrofone). Der minimale Mikrofonabstand und die Länge des Arrays bestimmten die Wellenlängen und damit den Frequenzbereich der für die Richtungsselektion wirksam ist. Er beträgt entsprechend 190 - 3 200 Hz, 125 - 6 800 Hz und 75 - 20 000 Hz für die drei Arrays. Da das Geräusch der Vorbeifahrt seinen Pegel-Schwerpunkt bei rund 1 kHz hat, sind alle drei Anordnungen so gewählt, dass sie diesen Bereich gut abdecken.

2.2 Berechnungsverfahren

Die Trennung der Geräuschquellen aus den Mikrofon-signalen ist nicht trivial. Da mit einer relativ geringen Anzahl von Mikrofonen gearbeitet wurde, führt eine einfache Überlagerung der Mikrofon-signale, wie sie beim Standard Beamforming erfolgt, zu keiner ausreichenden Trennung der Quellen um verlässliche Pegelmessungen durchzuführen.

Es wurden zwei Verfahren für diese Aufgabe eingesetzt, wobei das erste Source Identification Algorithmus (SIA) vor Beginn der Arbeiten zur Verfügung stand und das zweite (Beam-Solve) im Rahmen dieses Projekts entwickelt wurde. SIA ist ein Algorithmus zur Identifizierung und Separierung einzelner Kugelschallquellen in jedem Frequenzband.

Beam-Solve dagegen beruht auf dem Beamforming-Verfahren, aus dem dann in einem zweiten Schritt auf die vermuteten Energien einzelner Schallquellen zurück gerechnet wird. Die Ergebnisse beider Verfahren sollten verglichen werden.

2.3 Durchführung der Messungen

Gemessen wurde die Vorbeifahrt auf einer geraden und ebenen Landstraße. Geschwindigkeit und Fahrzeugposition wurden dabei mit Radar und Lichtschranken ermittelt.

Zur Messung wurden 2 x 2 Pkw und 2 Lkw verwendet, die jeweils mit konstanter Geschwindigkeit einzeln und hintereinander mit unterschiedlichen Abständen gefahren wurden.

Zwei aktuelle C-Klasse Limousinen der Marke Mercedes waren die Pkw. Fahrzeug 1 war ein benzinbetriebener Wagen als Limousine und Fahrzeug 2 ein Diesel als Kombi.

Fahrzeug 3 und Fahrzeug 4 waren Pkw wie Fahrzeuge 1 und 2.



Bild 2: Einzelnes Fahrzeug bei der Vorbeifahrt in der Messsituation

Fahrzeug 5 war ein 5-achsiger Lkw (Sattelzug) von 15,5 m Länge: 2 Achsen befanden sich an der Zugmaschine, 3 Achsen am Anhänger. Fahrzeug 6 war ein 4-achsiger Lkw (Gliederzug) von 18,75 m Länge: 2 Achsen befanden sich an der Zugmaschine, 2 Achsen am Anhänger.

Die Pkw wurden von Mitarbeitern des Messteams gefahren und die Lkw von Fahrchullehrern.



Bild 3: Die beiden Lkw auf der Messstrecke

3. Untersuchungsergebnisse

3.1 Vorbeifahrten einzelner Pkw

In Bild 4 ist beispielhaft eine Pkw-Vorbeifahrt mit 91 km/h über Zeit und Weg aufgetragen für das Array mit 20 Mikrofonen.

Aufgetragen ist für jeden Punkt die Energiesumme der für diese Position ermittelten A-gewichteten Frequenzanteile aus dem SIA-Verfahren als Farbkodierung. Deutlich sind die beiden Räder als Schallquellen zu erkennen. Die dargestellte Dynamik

beträgt 30 dB. Selbst mit nur 6 Mikrofonen wird diese Dynamik erreicht. Mit dem Standard-Beamforming-Verfahren wäre höchstens eine Dynamik von 13 dB für 20 Mikrofone zu erwarten.

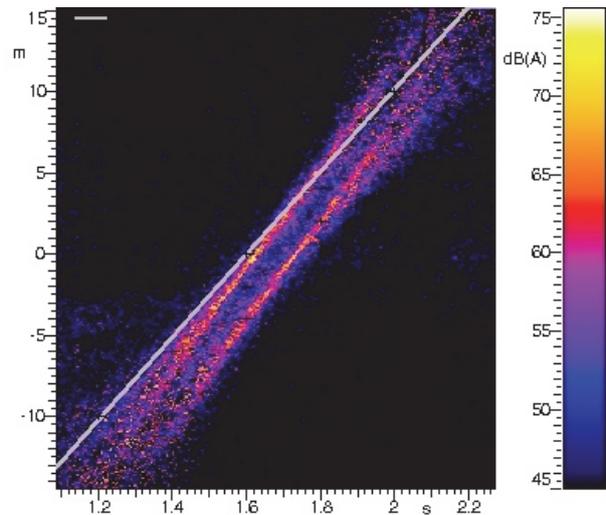


Bild 4: Wegzeit 20 Mikrofone, Vorbeifahrt mit 91 km/h

Die graue Linie zeigt die Position der Fahrzeugfront, wie sie aus Radar und Lichtschranken ermittelt wurde. Die Räder scheinen sich schneller zu bewegen, weil auf die Fahrzeugmitte fokussiert war und sich so eine Parallaxe ergibt.

Aus der Positionsmessung wird ein Fenster berechnet, über das die Energien im Bereich des Fahrzeugs sowie 2 m vor und hinter dem Fahrzeug integriert werden. Der so ermittelte Pegelverlauf ist in Bild 5 aufgetragen.

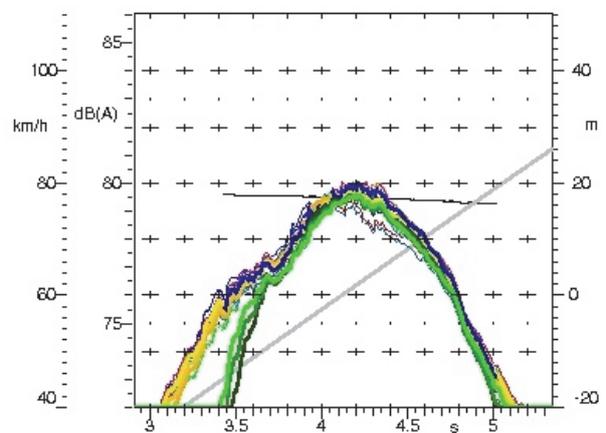


Bild 5: Vorbeifahrt mit Automatik-Fahrzeug, 80 km/h

Die blaue Pegelkurve gibt den Referenzpegel eines einzelnen Mikrofons an der Messposition wieder. Dieser Pegel sollte idealerweise durch die Arraymessungen nachgebildet werden. Die gelben Kurven geben den Summenpegel aller Positionen aus den Arraymessungen mit 6, 10 und 20 Mikrofonen an, wobei die Kurven umso dunkler werden, je mehr Mikrofone beteiligt sind. Analog stellen die grünen Kurven die aus dem mitlaufenden Fenster integrierten Pegel dar, wieder dunkler werdend, je mehr Mikrofone das jeweilige Array enthielt.

Zusätzlich sind zum Vergleich als dünne farbige Linien die Einzelpegel aller Mikrofone aus dem 6 und 10 Mikrofon-Array aufgetragen, um deren Streubreite zu verdeutlichen. Grau ist die Position der Fahrzeugfront aufgetragen und schwarz die Geschwindigkeit aus der Radarmessung.

Die Pegel aus den mitlaufenden Fenstern aller drei Arrays (grün) bilden den Zielpegel (blau) sowohl vom Verlauf als auch von den Werten her sehr gut nach für Fahrzeugpositionen bis zu +/-10 m um die Arrayposition. Die Abweichung beträgt dabei 0,5 bis 0,7 dB.

Der aus den Arraymessungen berechnete Pegel liegt systematisch unter dem maximalen Zielpegel. Dies ist zu erwarten, da die Arrays nicht nur an einer Position messen, sondern den Pegel aus mehreren Positionen bestimmen und damit statistische Schwankungen zwischen den Mikrofonpositionen mitteln. D. h. die Array-Pegelkurven verlaufen immer auch etwas glatter als die Referenzkurve des einzelnen Mikrofons.

3.2 Vorbeifahrten mit 2 Pkw

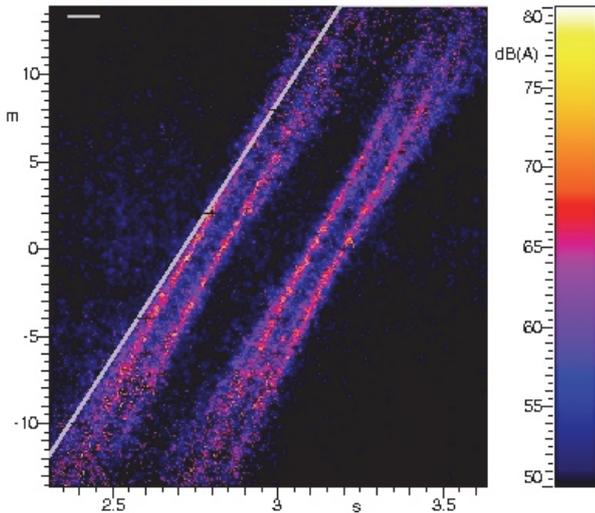


Bild 6: Wegzeit 20 Mikrofone, 2 Pkw mit ca. 100 km/h

Bild 6 zeigt die Vorbeifahrt von 2 dicht fahrenden Pkw als Wegzeit-Diagramm und Bild 7 entsprechende Pegelverläufe. Der Abstand zwischen den Pkw ist deutlich kleiner als eine Fahrzeuglänge. Trotzdem können die Pegelverläufe der beiden Fahrzeuge sauber getrennt werden und zwar mit allen drei Mikrofon-Arrays. Der Summenpegel bei der Fahrzeuge liegt 3 dB über dem Einzelpegel. Eine Messung mit dem ISO SPB-Verfahren wäre längst nicht mehr möglich.

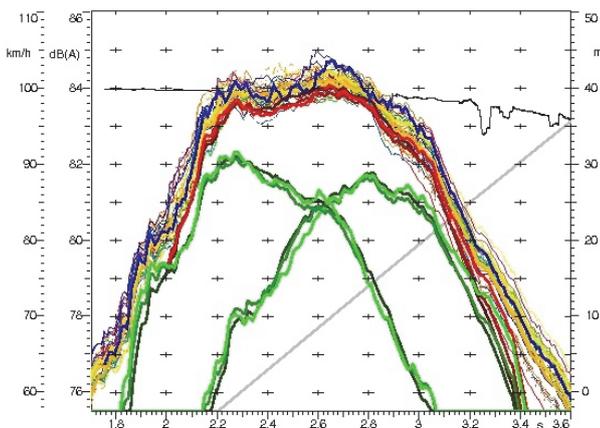


Bild 7: 2 Pkw, 99,7 km/h, Abstand 8,6 m von Front zu Front, SIA Algorithmus

Werden die Daten für Einzel- und Doppelfahrten verglichen (Auftragung über Geschwindigkeit), so ist im Rahmen der Messgenauigkeit kaum ein Unterschied feststellbar, d. h. die Pegel der Fahrzeuge können sehr gut getrennt werden. In den

Einzelmessungen finden wir gegenüber dem Referenzpegel eine systematische Abweichung von - 0,8 dB. Davon sind 0,6 dB durch die Mittelung über die Mikrofonpositionen erklärbar und unvermeidbar. Es bleibt also im Mittel ein Messfehler von - 0,2 dB mit 20 Mikrofonen und dem SIA-Verfahren (- 0,27 und - 0,31 dB mit 6 und 10 Mikrofonen).

3.3 Beam-Solve-Verfahren

Als Alternative zu dem proprietären SIA-Verfahren wurde eine neue Quellentrennung entwickelt, die auf der Standard-Beamforming-Abbildung beruht. Als Ergebnis des Beamforming liegt eine Pegelkurve über dem Weg vor (in Frequenzbändern), in der wegen der geringen Dynamik die Pegelwerte verschmiert sind (Faltungsfunktion). Um hieraus die ursprünglichen Quellpegel zu schätzen, wurde folgender Ansatz gemacht:

- Aus der Energieverteilung in der Beamforming Repräsentation werden die Maxima herausgesucht. D. h. die höchsten Spitzen in der Abbildung werden als Quellorte tatsächlicher Schallquellen interpretiert. Lokale Maxima, die entsprechend der jeweiligen Arraydynamik unter dem absoluten Maximum liegen, werden ignoriert, weil sie durch die Nebenmaxima der Verschmierungsfunktion zustande kommen.
- Für die Positionen dieser Maxima wird aus den vorher berechneten Faltungsfunktionen (Verschmierungen) der Einfluss auf alle anderen gefundenen Maxima ermittelt, so dass man den Anteil der Energie kennt der sich von der Position eines Maximums jeweils auf die Positionen der anderen Maxima mit abbildet.
- Die so gefundenen Komponenten ergeben für N Maxima eine N x N-Matrix (M), die zusammen mit dem Vektor der gefundenen Maxima (V) und dem Vektor der ursprünglichen Quellenergien (E) die Gleichung $V = E * M$ ergibt. V sind die gefundenen Pegelwerte an den Maximapositionen und E sind die angenommenen ursprünglichen Pegelwerte für die entsprechenden Schallquellen.
- Durch Lösen dieser Matrixgleichung erhalten wir den Vektor der Quellenergien E, deren Werte statt der Verteilung der Beamforming-Funktion in das Bild eingesetzt werden.
- Durch Summation der Ergebnisse aus allen Frequenzbändern ergibt sich dann die Verteilung der Schallenergie über den Weg.

Das so beschriebene Verfahren liefert für 2 Pkw Pegelkurven wie sie in Bild 8 gezeigt sind.

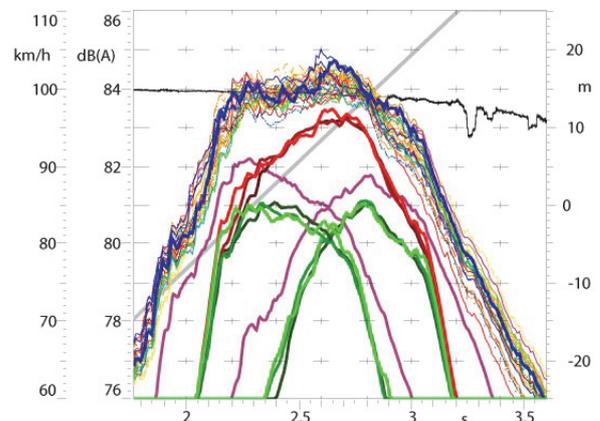


Bild 8: 2 Pkw 100 und 99 km/h, Abstand 11 m mit Beam-Solve Algorithmus. Zum Vergleich SIA Pegel in lila.

Hier ist zu erkennen, dass die mit Beam-Solve ermittelten Pegelkurven bis zu 1 dB unter denen des SIA-Verfahrens liegen, der Pegelverlauf aber weiterhin gut nachgebildet wird.

Eine genaue Auswertung von 28 Messungen mit Pkw 1 + 2 für Einzel- und Doppelfahrten ergibt, dass die Werte gegenüber dem SIA-Verfahren um - 1,3 bis + 2,2 dB abweichen. Dabei ist die Abweichung von + 2,2 dB ein Einzelfall. In der Regel sind alle Abweichungen negativ.

Die Abweichung ist abhängig von der Anzahl der verwendeten Mikrofone und beträgt

- für 6 Mikrofone - 1,3 bis + 2,2 dB,
- für 10 Mikrofone - 1,2 bis + 1,7 dB und
- für 20 Mikrofone - 1,2 bis - 0,6 dB.

Dabei ist bei 6 und 10 Mikrofonen jeweils ein Ausreißer zu beobachten, der zu den + 2,2 und + 1,7 dB Werten führt. Wird dieser eliminiert, so reduzieren sich die Abweichungen über alle drei Mikrofonanordnungen auf - 0,4 bis - 1,3 dB.

Offenbar ist das Verfahren mit größeren Unsicherheiten behaftet als das SIA und weist eine geringere Stabilität auf. Dies kann durch die Verwendung von 20 Mikrofonen z. T. ausgeglichen werden, was zu stabileren Resultaten führt.

Im Mittel sind die mit Beam-Solve ermittelten Pegelwerte gegenüber dem SIA-Verfahren um 0,6 dB verringert, also unterschätzt.

3.4 Vorbeifahrten mit Lkw und Lautsprechermessungen

Die Vorbeifahrten mit Lkw stellten sich als erstaunlich unproblematisch heraus, da durch die Länge der Fahrzeuge die Quellen sich von Haus aus weniger überlagern als bei den Pkw-Messungen. Ohne die Quellentrennung ist dieser Effekt allerdings nicht direkt erkennbar. Im Ergebnis führt dies dazu, dass beide Verfahren mit Lkw genauso funktionieren, wie mit Pkw.

Die Messung mit einem Lautsprecher bestätigt die positiven Resultate. Er ist deutlich schärfer fokussiert im Weg-Zeit-Diagramm erkennbar, was bedeutet, dass die Unschärfe der Räder auf die tatsächliche Ausdehnung dieser Schallquellen zurückgeht. Eine optimale Trennung ist deshalb auch wegen der schlecht definierten Grenzen der Schallquellen nicht mehr zu erwarten. Solange der Pegel der Räder kleiner gleich dem des Lautsprechers ist, beträgt die Messunsicherheit für den Lautsprecher mit SIA-Verfahren - 0,9 / + 0,5 dB. Die Pegelunsicherheit nimmt in dem Fall mit geringerer Mikrofonzahl und höherem Pegel der Räder zu.

4. Folgerungen für die Praxis

Es zeigt sich, dass alle drei getesteten Mikrofonanordnungen mit dem ersten verwendeten Algorithmus (SIA) zur Quell-Identifikation und Separation in der Lage sind, aufeinander folgende Fahrzeuge zu trennen und einen Maximal-Pegel zu liefern, der im wesentlichen von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängt.

Eine systematische Abweichung von - 0,6 dB ergibt sich allein aus der Mittelung des Pegels über mehrere Mikrofonpositionen. Das absolute Maximum fällt dadurch prinzipiell geringer aus. Diese Mittelung verringert dabei auch die Streuung in der praktischen Anwendung. Um vergleichbare Werte zu liefern, können die Pegel mit der mittleren Abweichung korrigiert werden.

Der dann noch verbleibende Pegelfehler von - 0,2 dB mit dem SIA-Verfahren ist entweder vernachlässigbar oder kann ebenfalls im Mittel korrigiert werden.

Mit dem Beam-Solve-Verfahren steht eine weitere Methode zur Verfügung, die relativ einfach angewendet werden kann. Sie liefert etwas größere Unsicherheiten und eine weiter vergrößerte systematische Pegelunterschätzung.

Beide Verfahren funktionieren für Pkw und Lkw mit 6, 10 und 20 Mikrofonen. Das SIA-Verfahren liefert mit 6 Mikrofonen kaum schlechtere Ergebnisse als mit 20, während sich beim Beam-Solve die Erhöhung der Mikrofonzahl durch geringere Streuung bemerkbar macht.

Damit kann das anfangs gestellte Ziel als erfüllt gelten. D. h. der Pegel einzelner Fahrzeuge kann mit den neuen Verfahren auch im dichten Verkehr auf der Landstraße gemessen werden.

Die untersuchten Mikrofonanordnungen haben sich bewährt. Bei Verwendung von SIA reichen ggf. schon 6 Mikrofone für die Quellentrennung aus. Mit reinem Beamforming wäre das unmöglich, da die Dynamik lediglich 8 dB beträgt.

Das Beamforming mit Schätzung der Quellenenergie kann ebenfalls verwendet werden, wobei hier eher 20 Mikrofone empfehlenswert sind.