

Auswirkung der Kohärenz auf die Schallausbreitung

Wolfram Bartolomaeus, Michael Chudalla

Bundesanstalt für Straßenwesen, 51427 Bergisch Gladbach, Deutschland, Email: bartolomaeus@bast.de

Die Bundesanstalt für Straßenwesen ist die praxisorientierte, technisch-wissenschaftliche Einrichtung des Bundes auf dem Gebiet des Straßenwesens.

Einleitung

Die Kohärenz ist eine Eigenschaft von Wellenphänomenen, die zu starken lokalen Schwankungen der Feldgrößen führen kann. Dieses als Interferenz bekannte Phänomen ist aus der Optik z. B. bei Lasern wohl bekannt und kann auch bei akustischen Quellen beobachtet werden. Allerdings strahlt nicht jede (Schall-)Quelle kohärente (Schall-)Wellen ab.

Schallquellen

Eine wegen ihrer einfachen Beschreibung bei (Rechen-)Modellen bevorzugt verwendete Quelle ist die Punktquelle. Da alle Wellen von einem Punkt ausgehen sind die Wellen kohärent und weisen keinerlei Richtungscharakteristik auf. Eine ideale Punktschallquelle ist nur schwer physisch zu realisieren.

Gehen die Wellen dagegen von schwingenden (Ober-)Flächen aus, so bildet sich aufgrund der Schwingungsmoden i. A. eine Richtcharakteristik aus. Die Wellenfronten bleiben dabei allerdings in Phase, so dass die abgestrahlten Wellen kohärent sind. Ein Lautsprecher entspricht diesem Typ der Schallerzeugung.

Werden die Wellen in einem größeren Volumen erzeugt, so stellen sich inkohärente Wellenfronten ein. Die Richtcharakteristik kann dabei aber annähern Kugelförmig bleiben. Ein Modell für diese Quelle ist der Druckluftschallerzeuger.

Definitionen

Eng verwandt mit der Kohärenz ist die Korrelation. Der Korrelationsgrad gibt an, wie ähnlich sich zwei gegeneinander um die Zeit τ verschoben Signale sind. Der normierte Korrelationsgrad ist:

$$\varphi_{fg}(\tau) = \frac{\Phi_{fg}(\tau)}{\tilde{f} \cdot \tilde{g}} \quad [-] \quad (1)$$

Mit der Kreuzkorrelationsfunktion:

$$\Phi_{fg}(\tau) = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} f(t) \cdot g(t + \tau) dt \quad [\text{Pa}^2] \quad (2)$$

Zur Normierung auf den Wertebereich von Null bis Eins wird dabei die Kreuzkorrelationsfunktion durch die Effektivwerte \tilde{f} bzw. \tilde{g} der beiden Signale geteilt.

Die normierte Kohärenzfunktion der Kreisfrequenz ω ist:

$$\gamma^2 = \frac{|W_{fg}(\omega)|^2}{W_{ff}(\omega) \cdot W_{gg}(\omega)} \quad [-] \quad (3)$$

Wobei das Kreuzspektrum entweder als fouriertransformierte der Kreuzkorrelationsfunktion:

$$W_{fg}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{fg}(\tau) \cdot e^{-i\omega\tau} d\tau \quad [\text{Pa}^2] \quad (4)$$

oder direkt aus dem Amplitudenspektrum berechnet werden kann.

Vorbeifahrten

Die hier untersuchte Fragestellung war: Ist die Schallabstrahlung eines vorbeifahrenden Fahrzeugs kohärent oder inkohärent?

Zur Erzeugung der Ausgangssignale wurden Messungen an zwei speziellen Aufbauten durchgeführt. Zum einen wurden vier Mikrofone in 7,5 m von der Straßenmitte entfernt in den Höhen 1,2 m (1), 2,4 m (2), 3,6 m (3) und 4,8 m (4, S. Abbildung 1) aufgebaut und die Schalldruckzeitverläufe vorbeifahrende Fahrzeuge aufgenommen.



Abbildung 1: Messanordnung zur Bestimmung der vertikalen Kohärenz.

Zum anderen wurden vier Mikrofone in 7,5 m Entfernung zur Straßenmitte jeweils in 1,2 m Höhe nebeneinander angeordnet. Die Abstände zum ersten Mikrofon (1) betragen 3,75m (2), 7,5 m (3) und 15 m (4, s. Abbildung 2).

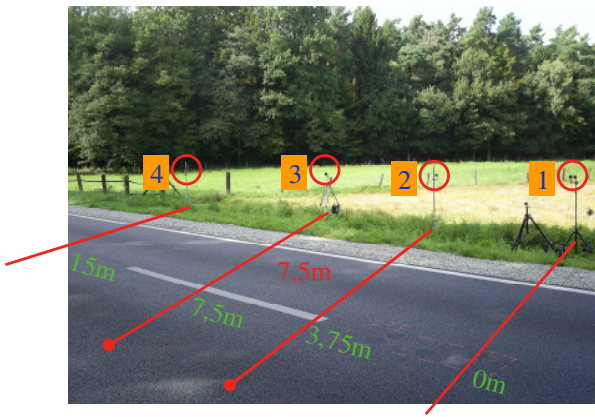


Abbildung 2: Messanordnung zur Bestimmung der horizontalen Kohärenz.

Ergebnisse

In der Abbildung 3 sind die in der ersten Spalte die Kohärenzfunktionen der Höhen 2 bis 4 bezogen auf die Höhe 1 für den Frequenzbereich von 200 Hz bis 10 kHz dargestellt.

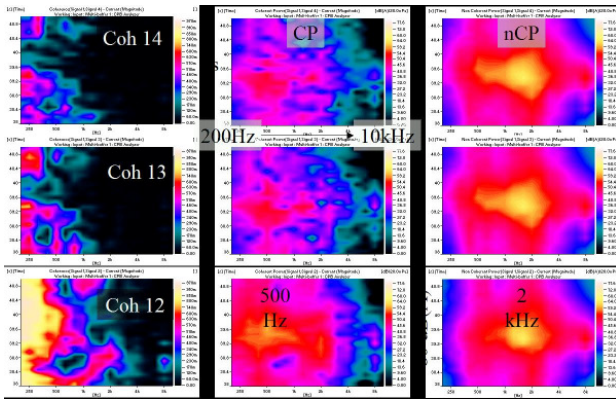


Abbildung 3: Vertikale Kohärenz.

Für kleine vertikalen Winkel (Coh 12) ist die Kohärenz größer als für größere Winkel. Gegen hohe Frequenzen verschwindet die Kohärenz überdies ganz. In der zweiten Spalte ist der kohärente Anteil des Leistungsspektrums (CP) dargestellt. Das Maximum von ca. 500 Hz wird hier bei kleinen vertikalen Winkeln (12) erreicht.

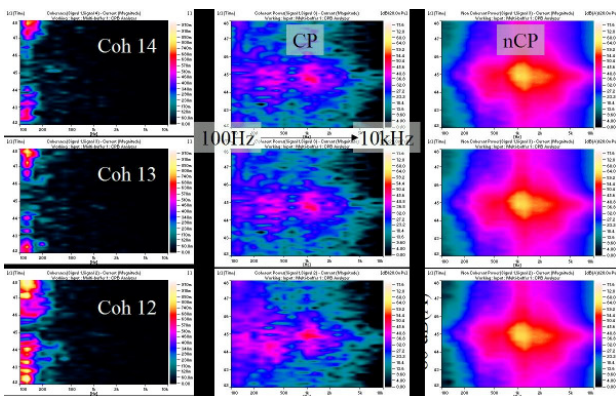


Abbildung 4: Horizontale Kohärenz.

Demgegenüber liegt der nicht kohärente Anteil (nCP, Spalte 3) weitgehend unabhängig von dem vertikalen Winkel bei ca. 2 kHz. Offensichtlich werden zwei wesentlich unterschiedliche Schallentstehungsmechanismen dargestellt. Zum einen eine Motorinduzierte kohärente Körperschallabstrahlung und zum anderen eine durch Luftverwirbelung erzeugte Schallabstrahlung der Reifen.

Die Abbildung 4 zeigt für den horizontalen Aufbau im Wesentlichen das gleiche Bild. Nur ist hier der kohärent abgestrahlte Anteil noch geringer und wenig von dem horizontalen Winkel abhängig. Warum ist das so?

Normierung

Der kohärente Anteil bei der vertikalen Anordnung kann durch eine Normierung der Schallsignale erhöht werden. Dazu wird die geometrisch Ausbreitungsdämpfung der Kugelwelle (Faktor $1/r$) und die Frequenzverschiebung aufgrund des Doppler-Effektes aus den zeitlichen Schalldruckverläufe entfernt. In Abbildung 5 ist jetzt deutlich die Kohärenz zwischen den Signalen 2 und 1 zu erkennen. Allerdings bricht diese immer noch zum Zeitpunkt der Vorbeifahrt ein.

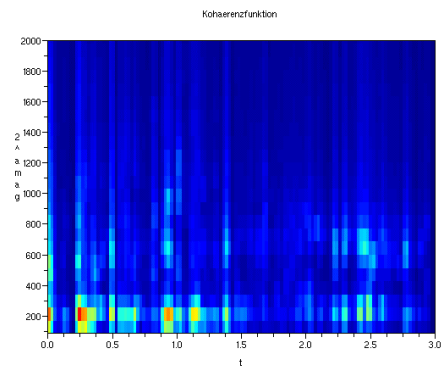


Abbildung 5: Normierte horizontale Kohärenzfunktion zwischen den Signalen 2 und 1.

Die horizontale Kohärenz einer Vorbeifahrt wird also zusätzlich durch die Bewegung der Quelle gemindert.

Schlussfolgerungen

Für die Messung z. B. in der Halle für akustische Modelltechnik muss insbesondere bei großen Winkeldifferenzen zwischen den Schallstrahlen mit starken Abweichungen gerechnet werden, je nachdem ob man eine kohärente oder inkohärente Schallquelle verwendet.

Bei Simulationsrechnungen werden i. A. Punktschallquellen verwendet. Auch treten große Abweichungen zur Realität insbesondere für große Winkel und einzelne Frequenzen auf.

Werden in Schallausbreitungsrechnungen Interferenzen berücksichtigt, so ist zu Fragen, ob die Schallquellen richtig modelliert sind. So wird in der NORD 2000 bei der Reflexion mit Fresnelzonen gerechnet und bei SonRoad mit der Interferenz von direktem mit reflektierten Schallstrahl. Diese Konzepte sind streng nur bei kleinen Winkeln und niedrigen Frequenzen gültig. Es stellt sich die Frage, ob derlei aufwändige Berechnungen überhaupt notwendig sind.