

# Spielen Schallausbreitungseffekte durch die inhomogene Umströmung in der Fahrzeugaeroakustik eine Rolle?

Reinhard Blumrich

Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart, Email: reinhard.blumrich@fkfs.de

## 1. Einleitung

Die Umströmung von Fahrzeugen verursacht Geräusche, die im Innenraum den Komfort reduzieren und bei höheren Geschwindigkeiten nach außen hin ein Umweltproblem darstellen können. Diese aeroakustischen Phänomene sind weitgehend bekannt. Ein anderer Effekt ist, dass Schall sich in einer solch hochgradig inhomogenen Umströmung nicht geradlinig ausbreitet, sondern von dieser beeinflusst wird. Während beim Lärmschutz diese Schallausbreitungseffekte bekannt sind und z. T. berücksichtigt werden, finden sie in der Fahrzeugakustik bisher keine Beachtung (außer u.U. bei einer Außengeräuschmessung durch die Scherschicht in der offenen Messstrecke eines Windkanals). Deshalb wurde eine Abschätzung durchgeführt, inwieweit diese Effekte hier eine Rolle spielen. Dies betrifft i.d.R. aeroakustischen Schall, der sich über den Luftweg außen am Fahrzeug ausbreitet.

## 2. Theorie

Die Schallausbreitung in strömender Luft wird durch folgende verschiedene Prozesse beeinflusst:

- Absorption in der Luft,
- Brechung durch Gradienten im Geschwindigkeitsfeld,
- Brechung durch Temperaturgradienten,
- Streuung bzw. Phasen- und Amplitudenfluktuationen aufgrund von Turbulenzen.

Je nach Strömungsverhältnissen, Ausbreitungsstrecke und Frequenzbereich müssen diese Effekte beachtet werden.

Die Absorption wird durch Transportprozesse sowie durch Rotations- und Vibrationsrelaxation der Moleküle der Luft hervorgerufen (z.B. [1]). Diese Prozesse hängen von Temperatur, Luftdruck und relativer Feuchte ab. Die Gesamtaborption steigt quadratisch mit der Frequenz bis der Beitrag der Relaxationsprozesse konstant bleibt. Die Feuchte hat einen starken Einfluss, da die Relaxation der Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle hierdurch erleichtert wird.

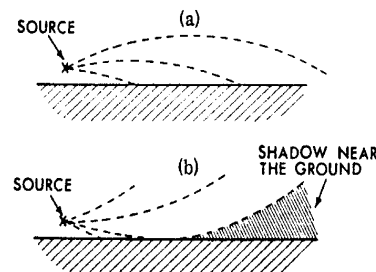
Das Geschwindigkeitsfeld der Luft hat einen direkten Einfluss auf die Schallausbreitung. Diese Geschwindigkeit muss lokal vektoriell zur Schallgeschwindigkeit addiert werden:

$$\frac{d\vec{r}(x,t)}{dt} = c \vec{n}(x,t) + \vec{v}(x,t) \quad \text{bzw.} \quad (1)$$

$$c_{\text{eff}}(x,t) = |c \vec{n}(x,t) + \vec{v}(x,t)| \quad (2)$$

$\vec{r}$ : Ortsvektor des Wellenfrontpunktes.  $c$ : Schallgeschwindigkeit.  $\vec{n}$ : Normalenvektor der Wellenfront.  $\vec{v}$ : Strömungsgeschwindigkeit.  $c_{\text{eff}}$ : effektive Schallgeschwindigkeit.

Für ein inhomogenes Strömungsfeld (z. B. Grenzschicht) ergeben sich somit Schallgeschwindigkeitsgradienten, die eine Brechung der Schallwellen bewirken. Wie bei einer (hier kontinuierlichen) Änderung des Brechungsindex wird die Ausbreitungsrichtung geändert (**Abbildung 1**).



**Abbildung 1:** Schallausbreitung mit Strömung von links. (a) Geschwindigkeit steigt mit der Höhe (Brechung zur Fläche hin). (b) sinkt mit der Höhe (Brechung von der Fläche weg) [1].

Temperaturgradienten bewirken eine Brechung in gleicher Form, da die Temperatur die Schallgeschwindigkeit in der Luft nach folgender Gleichung ändert:

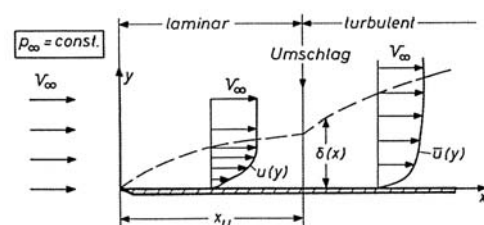
$$c(T) = \left( \frac{\kappa R T}{M} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$\kappa$ : Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten  $c_p/c_v$ ,  
 $R$ ,  $M$ : universelle Gaskonstante, Molekulargewicht.

Da Luft für Schall nicht dispersiv ist, sind diese Brechungsvorgänge theoretisch nicht frequenzabhängig. Bei der kontinuierlichen Brechungsindexänderung sind jedoch nur diejenigen Schallwellen betroffen, deren Wellenlänge klein gegenüber dem Kehrwert des relativen Schallgeschwindigkeitsgradienten sind:

$$\lambda \ll c_{\text{eff}} \left( \frac{dc_{\text{eff}}}{dz} \right)^{-1}, \Rightarrow \left| \frac{dc_{\text{eff}}}{dz} \right| \ll f \quad (4)$$

Turbulenzen entstehen durch Um- bzw. Überströmung von Hindernissen und durch innere Reibungskräfte. Sie äußern sich in Fluktuationen von z.B. Geschwindigkeit und Dichte. Diese Fluktuationen erzeugen im Prinzip über eine Vielzahl von Brechungsvorgängen eine Streuung des Schalls. Ein Beispiel für die Entstehung einer turbulenten Grenzschicht durch innere Reibung ist in **Abbildung 2** skizziert.

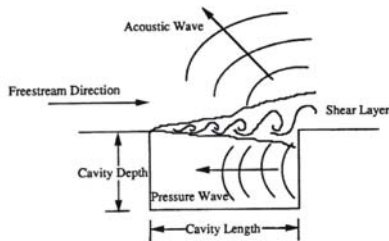


**Abbildung 2:** Entstehung einer turbulenten Grenzschicht durch Umschlag von laminar zu turbulent [2].

Trifft Schall auf eine Oberfläche mit endlicher Impedanz, ist noch ein weiterer Effekt zu beachten. Bei Reflexion kommt es neben einer Dämpfung des Schalls auch zu Phasenschiebungen. Diese können durch destruktive Interferenzen zu einer zusätzlichen Schallreduktion am Empfängerort führen, vor allem bei einer Ausbreitung entlang der Oberfläche.

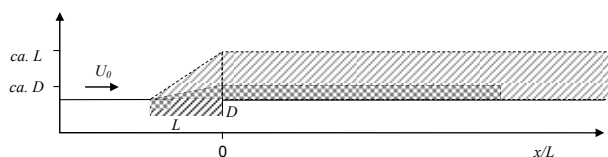
### 3. Relevanz für die Fahrzeugakustik

In der Fahrzeugakustik werden normalerweise der Nahbereich des Fahrzeugs und vor allem die Auswirkung auf das Innengeräusch betrachtet. Hierfür können Absorptionseffekte aufgrund der kurzen Ausbreitungswege vernachlässigt werden. Auch Temperaturgradienten können im Vergleich zu den Geschwindigkeitsgradienten vernachlässigt werden (nicht im Motorraum und an der Abgasanlage). Oberflächen mit endlicher Impedanz müssen ebenfalls nicht beachtet werden, da die Fahrzeugoberfläche als ideal reflektierend angesehen wird. Im Wesentlichen sind also Brechung durch Geschwindigkeitsgradienten und Streuung an Turbulenz zu beachten. Im Folgenden wird deren Auswirkung diskutiert. Es kann hier nur beispielhaft auf zwei typische Fahrzeuggeometrien eingegangen werden (Fuge, A-Säule).



**Abbildung 3:** Überströmung einer Kavität bzw. Fuge mit entsprechender Schallentstehung [3].

Die typische Überströmung einer Fuge bzw. Kavität mit entsprechender Schallentstehung ist in **Abbildung 3** dargestellt. Die stromab konvektierten Wirbel haben eine Höhe von maximal der Kavitätstiefe  $D$ . Die Grenzschicht ist bis zu einer Höhe von ca. einer Kavitätstiefe  $L$  beeinflusst. Über die Länge dieses Bereiches lässt sich hier keine Aussage machen, sie dürfte jedoch die Höhe um eine Größenordnung übertreffen. Die Schallausbreitung wird im Wesentlichen durch turbulente Streuung beeinflusst. Direkt hinter der Kavität in der Wirbelstraße (bis zur Höhe  $D$ ) treten deutliche Streueffekte für Wellenlängen  $\lambda \leq D$  auf (**Abbildung 4**, doppelt schraffiertes Gebiet). Schall mit Wellenlängen von  $\lambda \leq L$  wird in dem Gebiet hinter der Kavität bis zu einer Höhe  $L$  (einfach schraffiertes Gebiet) geringer beeinflusst.

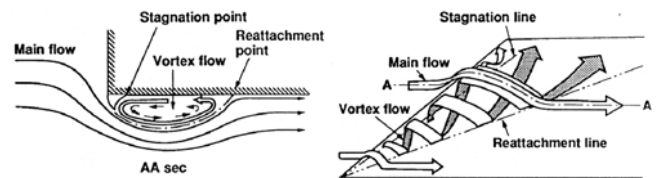


**Abbildung 4:** Gebiet der akustisch relevanten Strömungseffekte bei Überströmung einer Fuge (schraffierte Flächen, Abschätzung für Öffnungslänge zu -tiefe  $L/D = 4$ ).

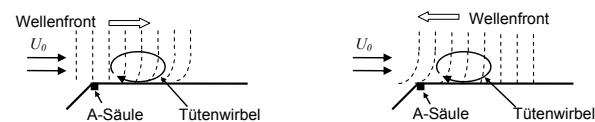
An der A-Säule eines Pkw treten Wirbel auf, deren Form Drehrichtung und Lage in **Abbildung 5** skizziert sind. Die Drehrichtung des Wirbels ist an der Unterseite zum Fenster hin gerichtet (Rezirkulation an der Scheibe). Die laterale Ausdehnung in Drehebene des Wirbels beträgt wenige cm bis zu wenigen 10 cm. In der Länge kann der Wirbel von der A-Säule bis in den Nachlauf des Fahrzeuges reichen. Mittelklasse-Pkws zeigen eine Geschwindigkeitsüberhöhung von ca.  $1,2 U_0$  (Messung ohne Außenspiegel, Anströmwinkel  $0^\circ$ , bis 120 km/h). Die Turbulenzgrade betragen ca. 4 – 12 % unter diesen Bedingungen.

Die Auswirkung des A-Säulenwirbels auf die Schallausbreitung ist in **Abbildung 6** skizziert. Für Wellenlängen die

kleiner oder gleich dem Wirbeldurchmesser sind erfolgt bei Schallausbreitung senkrecht zur Wirbelachse in Strömungsrichtung eine Brechung zum Fahrzeug hin, entgegen der Strömungsrichtung eine Brechung vom Fahrzeug weg. Bei Schallausbreitung längs des Wirbels sollte es keine signifikanten Brechungsvorgänge geben, da die Strömungsgeschwindigkeit in Ausbreitungsrichtung keine Gradienten zeigt. Turbulenz dürfte jedoch für Wellenlängen kleiner als der Wirbeldurchmesser zu Streueffekten führen. Dies gilt auch für die Ausbreitungsrichtungen quer zum Wirbel (Streu- und Brechungseffekte überlagern hier). Bei realen A-Säulenwirbeln muss berücksichtigt werden, dass die Wirbelachse schräg zur Hauptströmungsrichtung verläuft. Die schrägen Komponenten führen zu einem kleinen Versatz der Schallwelle beim Wirbeldurchgang, der normalerweise gegenüber den Brechungseffekten gering ist.



**Abbildung 5:** Skizze eines A-Säulenwirbels auf der Seitescheibe [4].



**Abbildung 6:** Brechungseffekte für  $\lambda \leq$  Wirbeldurchmesser bei einer Ausbreitung quer zum Wirbel mit der Hauptströmung (links) bzw. entgegen der Hauptströmung (rechts).

### 4. Zusammenfassung

In einer Studie wurde untersucht, inwieweit strömungsbedingte Schallausbreitungseffekte in der Fahrzeugakustik eine Rolle spielen. Dies betrifft Schall, der außen am Fahrzeug entsteht und sich über den Luftweg ausbreitet. An Hand von typischen Geometrien wurde die Relevanz der Ausbreitungseffekte für die Fahrzeugakustik abgeschätzt. Im Normalfall sind nur die Geschwindigkeitsgradienten und die Turbulenz relevant. Bei kleinen Strukturen (z.B. Wasserfangleiste) sind nur Wellenlängen der gleichen Größenordnung und kleiner betroffen. Schallausbreitungseffekte können in solchen Fällen also für Frequenzen von einigen kHz und darunter vernachlässigt werden. Für größere Strömungsstörungen wie z.B. die A-Säule sind auch tiefere Frequenzen betroffen.

### Literatur

- [1] A. D. Pierce: Acoustics - An Introduction to Its Physical Principles and Applications. Woodbury NY: Acoustical Society of America, 1991.
- [2] W. H. Hucho (Hrsg.): Aerodynamik des Automobils – Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort. Wiesbaden: Vieweg; ISBN 3-528-33114-3.
- [3] K. K. Ahuja, J. Mendoza: Effects of Cavity Dimensions, Boundary Layer, and Temperature on Cavity Noise. NASA Contractor Report 4653, 1995.
- [4] A. R. George: Automobile Aerodynamic Noise. SAE Technical Paper Series, Nr. 900315, 1990.