

# Schallstreuung eines "Penrose-Diffusors"

Rafael Piscoya, Martin Ochmann

Beuth Hochschule für Technik Berlin, 13353 Berlin, E-Mail: [piscoya@beuth-hochschule.de](mailto:piscoya@beuth-hochschule.de)

## Einleitung

Auf der Basis eines zweidimensionalen Penrose-Musters wird ein dreidimensionaler Penrose-Diffusor erstellt, indem die Penrose-Kacheln senkrecht zur Musterebene extrudiert werden. Das Ergebnis ist ein Gebilde mit zahlreichen dünnen Wänden über einem flachen Boden. Diese Wände erzeugen Hohlräume mit unterschiedlichen Grundflächen, die aber jeweils die gleiche Höhe aufweisen. Wenn nun eine Schallwelle den Diffusor trifft, erzeugen die schallharten Böden und Wände Reflexionen in verschiedenen Richtungen und erhöhen damit die Diffusität des gestreuten Schalls. Das resultierende Schallfeld wird mit einer indirekten Randelementemethode berechnet, da die Seitenwände als unendlich dünn betrachtet werden. Da Diffusoren in der Praxis üblicherweise auf einer ebenen Fläche angebracht sind, werden diese entweder auf eine unendliche starre Wand gesetzt oder in eine solche fest eingebaut. Die Ergebnisse dieser beiden Konfigurationen werden mit den Ergebnissen der Diffusoren im Freifeld verglichen, weil die letztere Situation den meisten Messungen entspricht. Als einfallende Welle wird ein fokussierter Schallstrahl betrachtet. Der fokussierte Schallstrahl wird mittels eines komplexen Monopols generiert. Ein komplexer Monopol ist eine Punktquelle, deren Quellposition einen imaginären Anteil hat und die Helmholtzgleichung erfüllt.

## „Penrose-Diffusoren“

In Raumakustik werden oft akustische Elemente eingesetzt, „Diffusoren“ genannt, um die Diffusität eines Raumes zu verbessern. Periodische Diffusoren sorgen für angemessene Diffusität bei bestimmten Frequenzen. Die Periodizität erzeugt mehrere Keulen konstanter reflektierter Energie, aber die Energie ist räumlich nicht gleichverteilt. So ist zu vermuten, dass sich bei einem aperiodischen Diffusor eine gleichmäßigere Energieverteilung einstellen wird. In dieser Arbeit wird die Streuung eines aperiodischen Diffusors untersucht. Ein solcher aperiodischer Diffusor wurde auf der Basis eines Penrose-Musters erstellt. Dieser Diffusor, der als „Penrose-Diffusor“ bezeichnet wird, wurde durch das Extrudieren der Parkettierung senkrecht zur Ebene erzeugt. Zwei unterschiedliche Arten derartiger Diffusoren wurden untersucht, nämlich ein Rhombus und ein Stern (siehe Abb. 1).

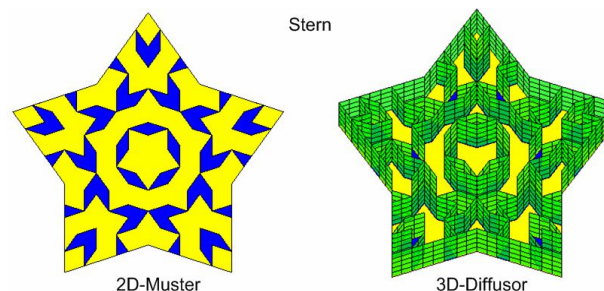


Abbildung 1: Modelle der Penrose-Diffusoren.

Ausgehend von einer Startgeometrie, zwei Robinson-Dreiecke für den Rhombus und zehn Robinson-Dreiecke für den Stern, wird das 2D-Muster durch konsequente Zerlegungen der Dreiecke generiert. Nachdem das 2D-Muster erzeugt worden ist, wird das 3D-Modell durch Extrudieren der Parkettierung erstellt. Details der Prozedur zur Erzeugung der Diffusoren werden in [1] erläutert.

## Fokussierter Schallstrahl

Die Diffusoren werden von einem fokussierten Schallstrahl beschallt. Ein solcher Strahl kann von einer Schallquelle mit einer komplexen Position generiert werden. Eine komplexe Position schreibt man als

$$\vec{r}_c = \vec{r}_0 - j\vec{\beta} \quad (1)$$

wobei  $j = \sqrt{-1}$  und  $\vec{r}_0$  und  $\vec{\beta}$  reelle Vektoren sind. Der Abstand zwischen Feldpunkt und Quellposition ist dann komplex.

$$R = \sqrt{|\vec{r} - \vec{r}_0|^2 - \beta^2 + j2(\vec{r} - \vec{r}_0) \cdot \vec{\beta}} \quad (2)$$

Setzt man (2) in die Greensche Funktion des Monopols ein, erhält man einen komplexen Monopol. Der abgestrahlte Schalldruck wird in der positiven Richtung von  $\vec{\beta}$  fokussiert - im Gegensatz zur gleichmäßigen Abstrahlung des üblichen Monopols (siehe Abb. 2).

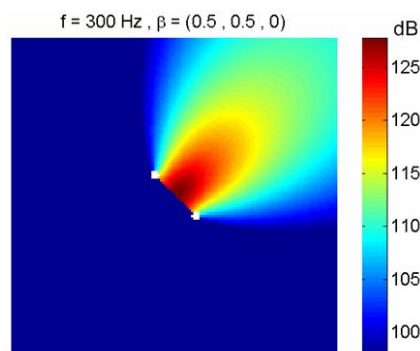
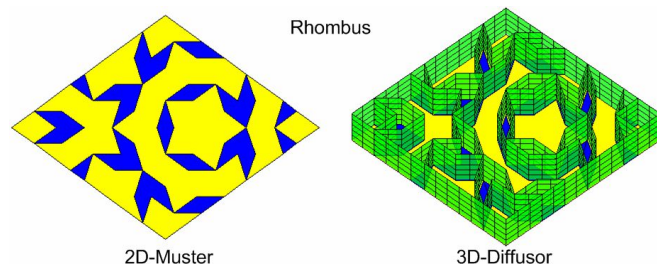


Abbildung 2: Schallabstrahlung eines komplexen Monopols.

Die Singularität dieser Art von Quellen ist nicht nur ein Punkt sondern ein Kreis senkrecht zu  $\vec{\beta}$ , mit Radius  $\beta$  und Mittelpunkt  $\vec{r}_0$ .

Allgemeine komplexe Multipole höherer Ordnung können durch fortgesetzte Differenziation nach den räumlichen Koordinaten erzeugt werden.

### Numerische Simulation

Die Simulation des gestreuten Schalldruckes wird mit einer indirekten BEM durchgeführt, da die Modelle unendlich dünne Wände haben. Alle Wände werden als schallhart betrachtet.

In dieser Arbeit wird untersucht, ob die Art der Anbringung die Streuung des Diffusors beeinflusst. Daher werden drei Konfigurationen simuliert: a) auf einer starren Wand; b) in eine starre Wand eingebaut und c) im Freien (siehe Abb. 3)

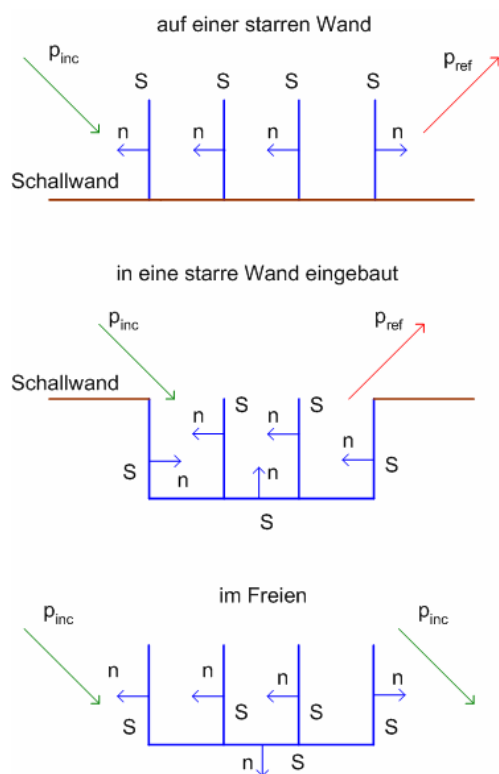


Abbildung 3: Konfigurationen der Diffusoren für die Simulation.

Für die ersten beiden Konfigurationen benötigt die BEM die Greensche Funktion des Halbraumes, um die Diskretisierung der Schallwand zu vermeiden. Für die dritte Konfiguration wird die übliche Greensche Funktion des freien Raumes benutzt.

### Diffusionskoeffizient

Um die Wirksamkeit des Diffusors zu bewerten, wird der Diffusionskoeffizient bestimmt [2]. Dafür wird die Schallintensität auf einer Halbkugel ermittelt. Wenn die Halbkugeloberfläche in  $n$  Flächenelemente unterteilt ist (siehe Abb. 4) und  $I_i$  und  $A_i$  der Intensität und der Fläche

des  $i$ -ten Elements entsprechen, definiert man den "Richtungs-Diffusionskoeffizient"  $d_\theta$ , d.h. den Diffusionskoeffizient beim Schalleinfallswinkel  $\theta$  als:

$$d_\theta = \frac{\left( \sum_{i=1}^n I_i N_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n I_i^2 N_i}{\left( \sum_{i=1}^n N_i - 1 \right) \sum_{i=1}^n I_i^2 N_i}, \quad N_i = \frac{A_i}{A_{\min}} \quad (3)$$

wobei  $A_{\min}$  die Fläche des kleinsten Elements ist.

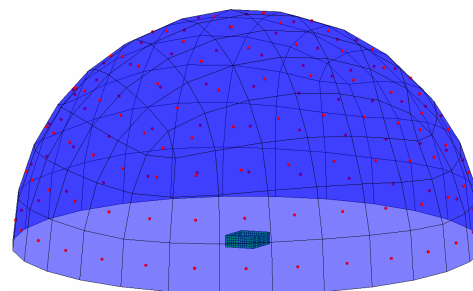


Abbildung 4: Halbkugel zur Intensitäts-Ermittlung.

Der Richtungs-Diffusionskoeffizient hat als Extremwerte:  $d_\theta = 1$  bei perfekter Diffusion, d.h. die Intensität ist konstant auf der Halbkugel und  $d_\theta \rightarrow 0$  bei fehlender Diffusion, d.h. eine von Null verschiedene Intensität erfasst man nur an wenigen Messpunkten.

In praktischen Anwendungen erreichen die Diffusoren Schallwellen aus verschiedenen Richtungen. Daher ist es sinnvoll, einen "Diffusionskoeffizienten bei zufälligem Schalleinfall ( $d$ )" aus Mittelung der  $d_\theta$  über diverse Einfallswinkel zu ermitteln.

### Ergebnisse

Der gestreute Schalldruck und der Diffusionskoeffizient im Frequenzbereich zwischen 340 Hz und 1600 Hz wurden für Penrose-Diffusoren mit Rhombus- bzw. Stern-Kontur berechnet. Die Diffusoren haben eine maximale Länge von 1 m und eine Höhe von 0.25 m.

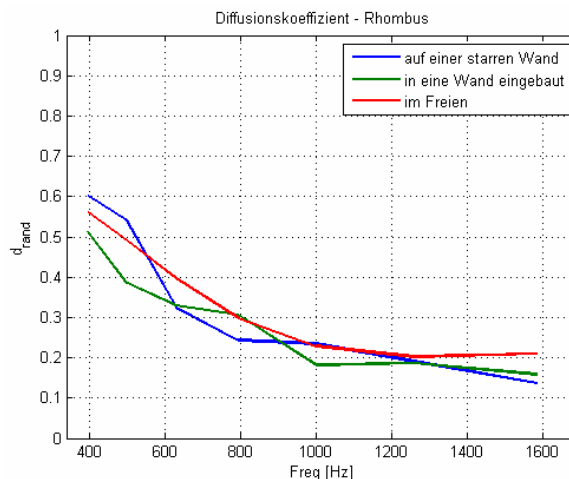


Abbildung 5: Diffusionskoeffizient bei zufälligem Einfallswinkel - Rhombus Diffusor.

Abb. 5 und Abb. 6 zeigen die Diffusionskoeffizienten der Diffusoren für die drei untersuchten Konfigurationen. Die Kurven haben einen ähnlichen Verlauf für die unterschiedlichen Konfigurationen. Die Differenzen ändern sich von Terz zu Terz, aber die Unterschiede sind klein. Der Rhombus-Diffusor weist eine leicht höhere Diffusität als der Stern-Diffusor auf. Bei beiden Diffusoren zeigt die Kurve für „den freien Fall“ die höchsten Werte für praktisch alle Frequenzen. Somit bewirken die beiden untersuchten Diffusoren nur eine relativ geringe Diffusität.

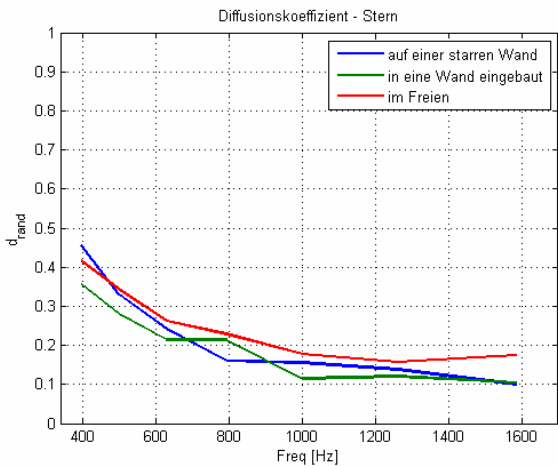


Abbildung 6: Diffusionskoeffizient bei zufälligen Einfallswinkel - Stern Diffusor.

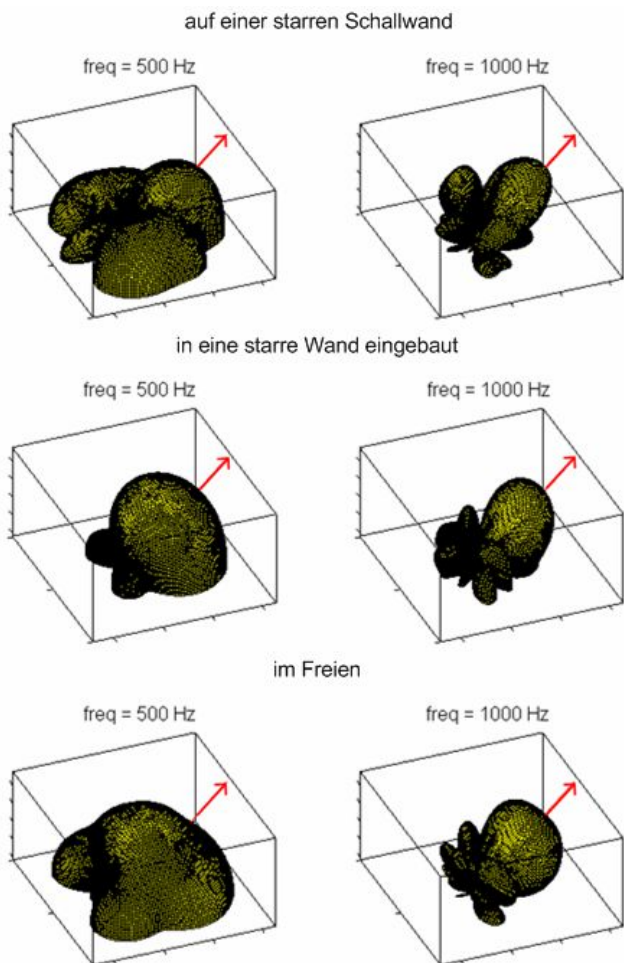


Abbildung 7: Polardiagramme des gestreuten Schalldruckes für den Rhombus-Diffusor.

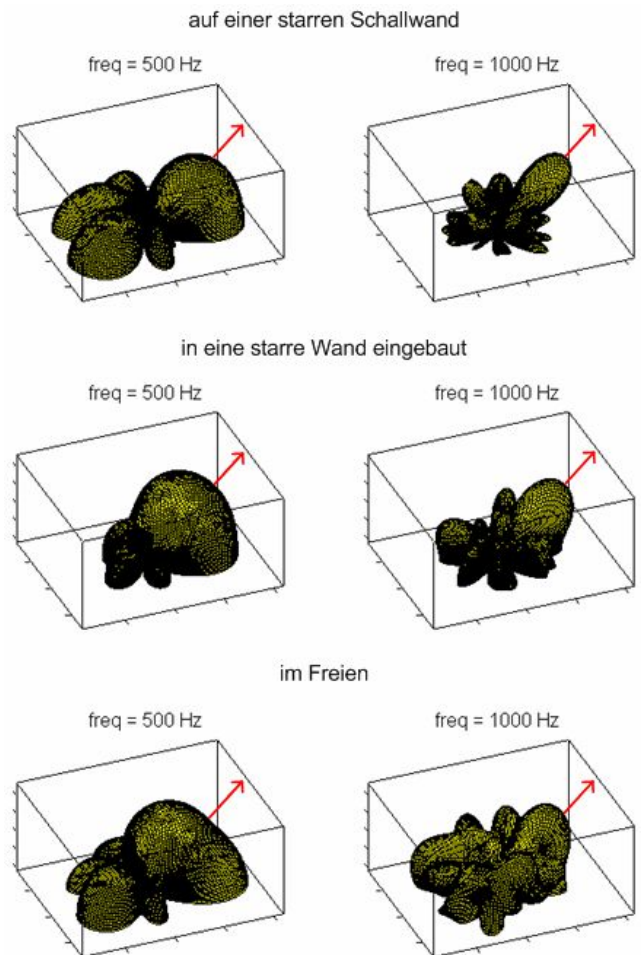


Abbildung 8: Polardiagramme des gestreuten Schalldruckes für den Stern-Diffusor.

Abb. 7 und Abb. 8 zeigen die 3D-Polardiagramme des von den Diffusoren gestreuten Schalldruckes. Der Einfallswinkel ist 45°. Der rote Pfeil zeigt die Richtung der Spiegelreflektion. Man kann die Hauptkeule des gestreuten Schalles in der Richtung der Spiegelreflektion erkennen sowie mehrere Nebenkeulen insbesondere bei höheren Frequenzen.

### Danksagung

Diese Arbeit wurde durch die DFG im Rahmen des Projektes "Theorie und Anwendung akustischer Multipolstrahler mit komplexen Singularitäten" gefördert.

### Literatur

- [1] Piscocya R., Ochmann M.: Numerical simulation of the scattering of a "Penrose-diffuser". Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibrations, Florence, 2015
- [2] D'Antonio P., Cox T.: AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems – Characterization and measurement of surface scattering uniformity. J. Audio Eng. Soc. Vol. 49 No. 3, 2001