

Akustische Diffusoren

Bachelorarbeit

zum Seminar

Elektro- und Raumakustik

verfasst von

Alexander Ulz

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation

Vorstand: *Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Kubin*

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr. techn. Franz Graf



Graz University of Technology

Inhaltsverzeichnis:

1) Einleitung.....	1
2) Theorie und Grundlagen	2
2.1) Diffusion, Streuung und diffuses Schallfeld.....	2
2.2) Diffusitätsgrad und Streugrad	2
2.3) Was ist ein perfekt diffuses Schallfeld?.....	3
2.4) Grundlagen der akustischen Diffusoren.....	4
3) Arten von akustischen Diffusoren.....	7
3.1) Einfache geometrische Strukturen	7
3.2) Akustische Diffusoren nach der Theorie von Schröder	11
3.3) Maximalfolgen – Diffusoren	12
3.4) Quadratic – Residue – Diffusoren (QRD).....	13
3.5) Primitive – Root – Diffusoren (PRD)	15
3.6) Phasengitter aus Helmholtz – Resonatoren.....	16
3.7) Mikroperforierte Diffusoren (MPD)	19
3.8) Aktive akustische Diffusoren	20
4) Designkriterien für akustische Diffusoren.....	23
4.1) Räumliche und zeitliche Schallstreuung.....	23
4.2) Diffusion von prismatischen Strukturen.....	24
4.3) Zu kurze Periodendauern bei zweidimensionalen Diffusoren	25
4.4) Einschränkung der Bandbreite zu tiefen Frequenzen und Konzentration des reflektierten Schalls auf wenige Hauptkeulen	26
4.5) Einschränkung der Bandbreite zu hohen Frequenzen	27
4.6) Kritische und diskrete Frequenzen	28
4.7) Absorption	29
5) Design – Möglichkeiten	30
5.1) Oberflächenstrukturen als akustische Diffusoren in alten Konzertsälen.....	30
5.2) Oberflächenstrukturen als akustische Diffusoren in modernen Konzertsälen.....	32
5.3) Strukturen mit unterschiedlicher Wandimpedanz.....	33
5.4) Integration bestehender Strukturen	34
5.5) Klassische Quadratic-Residue-Diffusoren (Schröder-Diffusoren)	36

5.6)	Weiterentwickelte und verbesserte Schröder-Diffusoren	38
5.7)	Schröder-Diffusoren mit facettierten Oberflächen (Fraktaldiffusoren).....	39
5.8)	Schröder-Diffusoren mit geschwungenen Oberflächen (Curved Diffusoren oder Wave Diffusoren)	41
5.9)	Akustische Diffusoren mit komplizierten Oberflächen	47
5.10)	Akustische Diffusoren nach architektonischen Aspekten	48
5.11)	Weitere Typen akustischer Diffusoren	49
6)	Messung und Simulation	50
6.1)	Wichtige physikalische Größen und Kennwerte	50
6.1.1)	Streugrad	51
6.1.2)	Absorptionsgrad	51
6.1.3)	Diffusitätsgrad	52
6.2)	Messung im Messraum.....	52
6.3)	Messung unter praktischen Bedingungen.....	55
6.4)	Computergestützte Simulation	55
6.5)	Darstellungsformen und Diagramme	57
6.5.1)	Einzahlwerte	57
6.5.2)	Frequenzbezogene Diagramme	57
6.5.3)	Polardiagramme, winkelbezogene Diagramme	59
6.5.4)	Weitere grafische Darstellungsformen	60
7)	Anwendung und praktischer Einsatz	62
7.1)	Ort der Anbringung und Anzahl.....	62
7.1.1)	Konzertsäle und Veranstaltungsräume	64
7.1.2)	Tonstudios und LEDE-Konzept	65
7.1.3)	Proberäume.....	66
7.1.4)	Private User	68
7.2)	Wahl der verwendeten akustischen Diffusoren.....	69
7.3)	Theorie und Praxis	70
7.4)	Endergebnis	71
8)	Kosten – Nutzen – Bewertung.....	73
9)	Zusammenfassung und kritische Betrachtung.....	74
10)	Anhang.....	75

Quellenverzeichnis:

Bücher und Skripten:

- [Everest et. al., 2009] F. A. Everest, K. C. Pohlmon; „*Master Handbook of Acoustics*“; Fifth Edition, 2009
- [Fasold et al., 1984] W. Fasold, W. Krad, W. Schirmer; „*Taschenbuch Technische Akustik Teil 2*“; 1984
- [Kuttruff, 2004] H. Kuttruff; „*Akustik – Eine Einführung*“; 2004
- [Graber, RA 2009] G. Graber; „*Skriptum zur VO Raumakustik*“; 2009
- [Graber, EA 2010] G. Graber; „*Skriptum zur VO und UE Elektroakustik*“; 2010
- [Graber, DAT 2009] G. Graber; „*Skriptum zur VO Digitale Audiotechnik*“; 2009

Veröffentlichungen und Papers:

- [Bolejko et al., 1998] R. Bolejko, P. Pruchnicki; „*Sound Diffusers Based on Number Theory with Random Variations of Surface Acoustic Impedance*“; 1998
- [Cox et. al. (1)] T. J. Cox, M. R. Avis, L. Xiao; „*The Potential for Room Acoustic Active Diffusers*“
- [Cox (2)] T. J. Cox; „*Acoustic Diffusers: The Good, the Bad and the Ugly*“
- [Cox et al. (3), 2005] T. J. Cox, P. D’Antonio; „*Thirty years since “Diffuse Sound Reflection by Maximum-Length Sequences”: Where are we now?*“; 2005
- [Kempe et al.] U. Kempe, C. Ferekidis; „*Praktische Gesichtspunkte bei der Dimensionierung von Diffusionsstrukturen für deren Anwendung in kleinen Abhörräumen*“

Persönliche Quellen:

- [VATTER, 2011] VATTER Acoustic Solutions in Gleisdorf, Geschäftsführer Klaus Höfer

Internetquellen:

- [Baunetzwissen, 2011] Online Fachlexikon; Homepage: www.baunetzwissen.de; Stand: 20. 2. 2011

[Hunecke, 2011] Dr. Jörg Hunecke, Raumakustiker; Homepage:
www.hunecke.de; Stand: 20. 2. 2011

[www.vatter.at, 2011] VATTER Acoustic Solutions; Homepage: www.vatter.at;
Stand: 1. 7. 2011

[Wiener Musikverein, 2011] Wiener Musikverein; Homepage: www.musikverein.at;
Stand: 15. 7. 2011

[Berliner Philharmonie, 2011] Berliner Philharmonie; Homepage:
www.philharmonie.com; Stand: 15. 7. 2011

Internetquellen nur für Abbildungen:

[Fairaudio, 2011]

[www.bonnibenrubi.com, 2011]

[www.wordpress.com, 2011]

[www.kenston.k12.oh.us, 2011]

[www.luxurylaunches.com, 2011]

[forum.audiofil.ro, 2011]

[www.studiosolutions.ie, 2011]

[www.acousticinnovations.com, 2011]

[recordingstudiolondon.co.uk, 2011]

[www.wikipedia.org, 2011]

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1: Streudiagramm eines guten Diffusors	5
Abb. 2: Reflexion an konkaver Oberfläche	7
Abb. 3: Reflexion an konvexer Oberfläche	7
Abb. 4: Schallstreuung an einer Sägezahnstruktur für drei Frequenzbereiche	8
Abb. 5: Richtungsverteilung nach dem Lambertschen Gesetz	9
Abb. 6: Einfache geometrische Oberflächenstrukturen	10
Abb. 7: Periodische Rechteckstruktur	11
Abb. 8: Periodische Dreieckprismenstruktur	11
Abb. 9: Periodische Halbzylinderstruktur	11
Abb. 10: 1D Maximalfolgen-Diffusor mit $N = 7$	12
Abb. 11: 2D Maximalfolgen-Diffusor mit $N = 7$	13
Abb. 12: Quadratische Residuenfolge mit $N = 7$	14
Abb. 13: 1D QRD mit $N = 7$	14
Abb. 14: Skizze eines 1D QRD	14
Abb. 15: 2D QRD mit $N = 7$	15
Abb. 16: 1D Primitive-Root-Diffusor	16
Abb. 17: Skizze eines Helmholtz-Resonators	17
Abb. 18: Abstimmung von Phasengittern aufgebaut aus Helmholtz-Resonatoren.....	18
Abb. 19: MPD mit sieben Streifen	19
Abb. 20: MPD aus Acrylglas vor dem Fenster eines Regieraums.....	20
Abb. 21: Passiver QRD mit $N = 7$	21
Abb. 22: Hybrid QRD mit $N = 7$ mit zwei aktiven Elementen	21
Abb. 23: Diffusion von passivem QRD, aktivem QRD (Hybrid) und glatter Oberfläche	22
Abb. 24: Streudiagramm eines Dreieckprismas mit 30° Seitenwinkeln	24
Abb. 25: „Zweidimensionaler“ akustischer Diffusor	25
Abb. 26: Streudiagramm des „zweidimensionalen“ Diffusors in x-Richtung.....	25
Abb. 27: Streudiagramm des „zweidimensionalen“ Diffusors in y-Richtung.....	25
Abb. 28: Streuwirkung von zwei Diffusoren aufgebaut aus Halbzylindern	26
Abb. 29: Streudiagramm QRD 1 im Vergleich mit glatter Oberfläche	27
Abb. 30: Streudiagramm QRD 2 im Vergleich mit glatter Oberfläche	27
Abb. 31: Absorptionskoeffizient von Schröder-Diffusoren.....	29
Abb. 32: Goldener Saal im Wiener Musikverein	31
Abb. 33: Kammermusiksaal in der Berliner Philharmonie	32
Abb. 34: Metropolitan Opera in New York.....	33
Abb. 35: Micro Wave Diffusor MWD 120-11	35
Abb. 36: Micro Wave Diffusor MWD 120-11 Nahansicht	35
Abb. 37: Integration von Deckenträgern im Bösendorfer Ausstellungsraum.....	36
Abb. 38: Numeric Wave Diffusor NWD 50/7/2	38
Abb. 39: Fraktaldiffusor zweiter Ordnung mit $N = 9$	40
Abb. 40: Facettierter Halbzylinder	40

Abb. 41: Diffusion eines Schröder-PRD	41
Abb. 42: Diffusion eines facettierten Halbzylinders.....	41
Abb. 43: Parabolic Wave Diffusor (PWD) Nahansicht.....	42
Abb. 44: Streugrad von Numeric Wave Diffusoren (NWD).....	43
Abb. 45: Streugrad von Parabolic Wave Diffusoren (PWD)	43
Abb. 46: Absorptionsgrad von Numeric Wave Diffusoren (NWD).....	44
Abb. 47: Absorptionsgrad von Parabolic Wave Diffusoren (PWD)	45
Abb. 48: Parabolic Wave Diffusor mit Rahmen.....	46
Abb. 49: Parabolic Wave Diffusor Halbschalen.....	46
Abb. 50: Entwurf einer zweidimensional geschwungenen Oberfläche	47
Abb. 51: Aufbau einer zweidimensional geschwungenen Oberfläche	47
Abb. 52: Sonic Diffusor Aluminium	48
Abb. 53: Sonic Diffusor Holz	48
Abb. 54: Pyramidendiffusor Bambus	48
Abb. 55: Polywood Diffusor	48
Abb. 56: Randomizing Diffusor Kunststoff	49
Abb. 57: Design Diffusor.....	49
Abb. 58: Messaufbau zur Bestimmung des Abstrahlverhaltens	54
Abb. 59: Grafische Darstellung des Schalldruckverlaufs vor einem PWD mit ANSYS.....	56
Abb. 60: Streugradverlauf und Mittelwert D	57
Abb. 61: Streugrad von Parabolic Wave Diffusoren	58
Abb. 62: Absorptionsgrad von Parabolic Wave Diffusoren.....	59
Abb. 63: Typisches Streudiagramm.....	60
Abb. 64: Schalldruckverteilung bei Einfallrichtung 0°	61
Abb. 65: Schalldruckverteilung bei Einfallrichtung -30°	61
Abb. 66: Zeitliche Verteilung der Schallenergie	62
Abb. 67: Deckenakustiksegel im Hauptsaal der Berliner Philharmonie.....	64
Abb. 68: Severance Hall in Ohio	65
Abb. 69: Rückwand (Live-End) eines Tonstudio-Abhörtraums mit NWDs	66
Abb. 70: Akustikdecke mit Numeric Wave Diffusoren.....	67
Abb. 71: Akustikdecke mit Parabolic Wave Diffusoren.....	67
Abb. 72: Deckenspiegel mit Parabolic Wave Diffusoren.....	68
Abb. 73: Grundriss einer Akustikdecke	71
Abb. 74: Seitenansicht einer Akustikdecke	72

Tabellenverzeichnis :

Tabelle 1: Streugrad von Numeric und Parabolic Wave Diffusoren	58
Tabelle 2: Absorptionsgrad von Numeric und Parabolic Wave Diffusoren	59

Kurzbeschreibung und Motivation:

Gemeinsam mit den verschiedensten Formen von akustischen Absorbern stellen akustische Diffusoren die wichtigsten Komponenten in der Raumakustik dar. Trotz ihres großen Einsatzbereiches und den vielfältigen Typen und Designmöglichkeiten wird den Diffusoren sowohl in der Literatur als auch in der Praxis wesentlich weniger Beachtung geschenkt als den Absorbern. So gibt es auch nur sehr wenige Unternehmen, welche sich mit der Planung und Herstellung beschäftigen. Auch in der Fachliteratur gibt es kaum ein Werk, das einen gesamten Überblick über akustische Diffusoren bietet, während akustische Absorber Thema unzähliger Bücher und Veröffentlichungen sind.

Diese Arbeit soll somit einen Überblick über die Theorie und Funktion, über die verschiedenen Typen und deren Designmöglichkeiten sowie über die praktischen Einsatzgebiete akustischer Diffusoren ermöglichen.

Abstract and Motivation:

Acoustic absorbers and acoustic diffusers are the most important components in the discipline of room acoustics. Although there is a big field of applications and there are a lot of different types and designs of diffusers they are less important in literature and even in practice than absorbers are. Just a few companies do plan and produce acoustic diffusers and even technical literature does hardly offer any useful overview about this topic while there are numberless books and papers about acoustic absorbers.

So this work should give an overview about the theory and function, the different types with their design possibilities and the practical applications of acoustic diffusers.

1) Einleitung

So umfassend und vielfältig das Gebiet der Raumakustik ist, so vielfältig sind auch die Anwendungsgebiete und Typen akustischer Diffusoren. Schon in vor Jahrhunderten erbauten Veranstaltungsräumen und Konzertsälen wurden die Eigenschaften der Schallstreuung an bestimmten Bauelementen genutzt, um diffuse Schallfelder zu erzeugen und Räume akustisch zu vergrößern, was einen wesentlichen Teil zur oftmals guten Akustik dieser Räume beigetragen hat.

Wurde dies früher mit viel Wissen und teilweise vielleicht auch durch Zufall erreicht, so gibt es heute moderne technische Methoden zur Berechnung, zur Planung und zur Herstellung von akustischen Diffusoren.

Ausgehend von der Theorie der Diffusion und somit der Grundlage der Funktion akustischer Diffusoren soll in dieser Arbeit ein umfassender Überblick über dieses Thema geschaffen werden. Dazu werden die verschiedenen Typen akustischer Diffusoren vorgestellt und ihre Funktionsweisen und die mathematischen Grundlagen erklärt, sowie die Gemeinsamkeiten und Unterschiede behandelt.

Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Behandlung der unterschiedlichen Designmöglichkeiten und damit verbunden die vielfältigen Möglichkeiten der Anbringung und des Einbaus akustischer Diffusoren zur Beeinflussung der Raumakustik.

Auch die Messmethoden und die Simulationsmöglichkeiten mit diverser Software werden beschrieben und verglichen.

Den Abschluss bilden eine Übersicht über typische Anwendungen und den Einsatz in der Praxis sowie eine Bewertung des Nutzens im Verhältnis zu den Kosten für akustische Diffusoren.

2) Theorie und Grundlagen

2.1) Diffusion, Streuung und diffuses Schallfeld

Die Diffusion oder Streuung von Schall ist ein Wellenphänomen. Das bedeutet, dass die Abmessungen von räumlichen Strukturen in der Größenordnung der Wellenlänge sein müssen, damit eine Streuung des einfallenden Schalls möglich wird. [Hunecke, 2011]

In der Raumakustik hat die Schallstreuung große Bedeutung. So ist es zum Beispiel bei einer zu starken Bildung von Raummoden notwendig, ein diffuseres Schallfeld zu erzeugen, um eben dieser Raummodenbildung entgegenzuwirken. Dabei ist es erstrebenswert, eine gleichmäßige Verteilung der Reflexionen in alle Richtungen zu erreichen. [Graber, RA 2009, S. 77]

Außerdem lassen sie durch die Erzeugung eines gleichmäßigen diffusen Schallfeldes auch kleine Räume akustisch vergrößern. Auf diese Anwendung wird in einem späteren Kapitel noch einmal genau Bezug genommen.

In bestimmten Abhörsituationen ist es unbedingt notwendig, ein diffuses Schallfeld vorzufinden. So wird beispielsweise im Tonstudio beim LEDE – Prinzip (Live End Dead End) im Raum hinter der Abhörposition – dem Live End – ein diffuses Schallfeld (Nachhallfeld) erzeugt, um keine störenden Einzelreflexionen von der Rückwand zu bekommen. Damit kann der Zuhörer den Direktschall der Lautsprecher besser beurteilen und wird von einem homogenen Schallfeld „umhüllt“. Außerdem wird die Ausbildung von stehenden Wellen deutlich reduziert und wichtige raumakustische Gütemaße können wesentlich verbessert werden.

Ähnliches gilt natürlich auch für Konzertsäle, Mehrzweckräume, Probenräume und selbst für Wohnräume, wo ein einigermaßen diffuses Schallfeld als die natürlichere und angenehmere akustische Umgebung empfunden wird.

2.2) Diffusitätsgrad und Streugrad

Der Inhalt dieses Abschnitts bezieht sich auf Informationen auf der Homepage des Raumakustikers Dr. Jörg Hunecke. [Hunecke, 2011]

Der Diffusitätsgrad kennzeichnet die Gleichmäßigkeit der Verteilung von reflektierten Schallstrahlen in den gesamten Raum. Dagegen wird der Streugrad verwendet, um zu beschreiben, in welchem Maße bestimmte Flächen zur Diffusität des Schallfelds beitragen. Der Streugrad ist definiert als Verhältnis der gestreuten Energie zur gesamten Energie.

Sowohl der Diffusitätsgrad als auch der Streugrad können Werte im Bereich von 0 bis 1 annehmen.

Alle reflektierten Schallstrahlen, die um mehr als $\pm 10^\circ$ vom Winkel bei geometrischer Reflexion abweichen, tragen zur gestreuten Schallenergie bei. Ein Streugrad von 1 bedeutet daher, dass es keine Reflexionen in Richtung der geometrischen Reflexion mehr gibt. Ist der Diffusitätsgrad 1, so liegt eine völlig gleichmäßige Verteilung der Reflexionen im Raum vor.

Bei rein geometrisch gerichteten Reflexionen wird sowohl der Diffusitätsgrad als auch der Streugrad gleich 0. In der Praxis liegen bei fast allen Strukturen und Räumen die Werte für beide Größen dazwischen.

2.3) Was ist ein perfekt diffuses Schallfeld?

Die Definition für ein perfekt diffuses Schallfeld wurde aus Kapitel 9 des „Master Handbook of Acoustic“ von F. A. Everest und K. C. Pohlmon entnommen. [Everest et. al., 2009, S.125]

In der Theorie wird zum Zweck der Vereinfachung von mathematischen Betrachtungen oft angenommen, dass ein total diffuses und damit homogenes Schallfeld vorherrscht. In solch einem Feld herrschen an jedem Punkt dieselben Gegebenheiten vor und der Schall kann von allen Richtungen eintreffen. Ein derartiges Feld ist in der Praxis vor allem in kleineren Räumen fast unmöglich zu erreichen.

In der Realität wird sich ein Schallfeld vor allem in Bezug auf die Position im Raum verändern. Oftmals ist das auch wünschenswert, da es vor allem bei der Lokalisation von Schallquellen hilfreich ist.

Soll aber der Schall in einem Raum gut verteilt werden, um damit ein gleichmäßigeres Schallfeld zu erzeugen und den Zuhörer besser in diesem einzuhüllen, so muss für eine genügend hohe Diffusität gesorgt werden. Vor allem im Bereich der tiefen Frequenzen ist dabei das schon oben erwähnte Problem der Raummoden hinderlich, das mit Abnahme der Raumgröße zunimmt.

Meist ist es das Ziel, die Energie des Schalls über den hörbaren Frequenzbereich gleichmäßig über einen Raum zu verteilen. Das zu erreichen, ist praktisch unmöglich, aber durch Diffusion lässt sich der Aufwand deutlich reduzieren.

Auch wenn es praktisch kein perfekt diffuses Schallfeld gibt, so wurden sechs Kriterien definiert, die ein derartiges Schallfeld erfüllen müsste:

- Sowohl räumlich als auch im Frequenzbereich sind Unregelmäßigkeiten bei Messung im stationären Zustand vernachlässigbar gering.
- Unregelmäßigkeiten in der Abklingcharakteristik sind vernachlässigbar gering.

- Der Verlauf der Abklingkurve verläuft genau exponentiell und ist damit eine Gerade bei logarithmischer Darstellung.
- Die Nachhallzeit ist an allen Positionen im Raum gleich.
- Die Dämpfung ist für alle Frequenzen gleich.
- Der Verlauf der Dämpfung ist unabhängig von der Richtcharakteristik des verwendeten Messmikrofons.

Diese sechs Faktoren sind einfach zu beobachten. Die theoretische Beschreibung eines diffusen Schallfelds erfolgt definitionsgemäß aber über die Begriffe Energieverteilung, Energiefluss und die Überlagerung einer unendlichen Anzahl ebener Wellen.

Trotzdem lassen sich mit Hilfe dieser sechs Kriterien die Eigenschaften eines diffusen Schallfelds in einem Raum recht gut einschätzen.

2.4) Grundlagen der akustischen Diffusoren

Der Inhalt dieses Abschnitts bezieht sich, falls nicht anders angegeben, auf Informationen auf der Homepage des Raumakustikers Dr. Jörg Hunecke. [Hunecke, 2011]

Der Einsatz von speziellen Wandstrukturen und damit verbunden die Auflösung von glatten Oberflächen ist ein einfaches und sehr bewährtes Mittel, um die Diffusität des Schallfeldes in einem Raum zu erhöhen. Diese Methode wird oft als „Akustischer Barock“ bezeichnet und wurde – wie die Bezeichnung schon vermuten lässt – schon in der Zeit des musikalischen Barock eingesetzt, als die ersten großen Konzertsäle der Geschichte errichtet wurden.

Diese Aufgabe erfüllten reiche Verzierungen, Rosetten und andere Strukturen an Wänden und Decken sowie Figuren an Wänden und Balkonen. Obwohl vermutlich ohne großes akustisches Know-How und ohne Möglichkeiten zur computergestützten Berechnung oder gar Simulation errichtet, zählen einige dieser Konzertsäle noch heute zu den besten der Welt und haben teilweise eine unerreichte akustische Qualität.

Durch die heute gängige Bauweise von Aufführungsräumen, die wesentlich moderner und meist dementsprechend schlichter ist, wurde die Verwendung von speziellen akustischen Diffusoren notwendig. So ist mittlerweile nicht nur in großen Sälen sondern auch in Tonstudios und Proberäumen der Einsatz von akustischen Diffusoren Standard und hat große Bedeutung.

Das Ziel ist es, ein möglichst diffuses Schallfeld zu erreichen. Das bedeutet, dass ein größtmöglicher Winkelbereich gleichmäßig abgedeckt werden muss. Daher werden die Strukturen von Diffusoren so entworfen, dass die Energie des reflektierten Schalls möglichst gut aus der Richtung der geometrischen Reflexion (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) herausfällt und sich auf alle anderen Richtungen verteilt.

Es gibt nun prinzipiell zwei Ansätze, um diffuse Reflexionen an Oberflächen zu erzielen. Einerseits wären das die schon oben genannten räumlichen Strukturen, die heute meist mit Halbkugeln, Halbzylindern oder Pyramiden realisiert werden und deren Abmessungen in etwa der Größenordnung der Wellenlänge des Schalls entsprechen müssen, der gestreut werden soll.

Die zweite gängige Methode ist das Verwenden von Materialien mit ortsabhängiger Wandimpedanz. Als Wandimpedanz wird das Verhältnis von Schalldruck zu Schallschnelle (was der Schallfeldimpedanz entspricht) direkt an der Wandoberfläche bezeichnet. Liegen nun zwei Materialien mit unterschiedlichen Wandimpedanzen nebeneinander, so wird die einfallende Welle teilweise diffus reflektiert.

Schallfeldimpedanz nach [Graber, RA 2009, S. 9]: $Z = \frac{p}{v} \quad \left[\frac{Ns}{m^3} \right] \quad (\text{Gl. 2.1})$

p ist dabei der Schalldruck, v die Normalkomponente der Schallschnelle.

Bedingung für die Funktion von Diffusoren mit ortsabhängiger Wandimpedanz ist, dass deren Änderung im interessierenden Frequenzbereich ausreichend groß sein muss.

Für die Herstellung von akustischen Diffusoren gibt es sehr viele Möglichkeiten. Sowohl die Auswahl der Materialien als auch die Designmöglichkeiten sind vielfältig. Gängig sind Diffusoren aus Holz, diversen Kunststoffen, Metallen oder Plexiglas. Diese sind in verschiedensten Größen und Formen und demnach auch in unterschiedlichen Qualitäten und Preiskategorien erhältlich. Darauf wird im Kapitel 5) über Designmöglichkeiten noch genauer eingegangen. Das charakteristische Streudiagramm eines akustischen Diffusors könnte zum Beispiel wie in Abb. 1 aussehen.

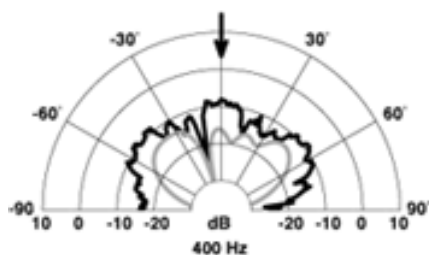


Abb. 1: Streudiagramm eines guten Diffusors
[Hunecke, 2011]

Wie sich aus diesem Streudiagramm ablesen lässt, wurde der vorliegende Diffusor mit einem 400 Hz Sinuston senkrecht zur Oberfläche beschallt (siehe Pfeilrichtung). Am Verlauf der schwarzen Linie lassen sich die Streueigenschaften des Diffusors gut erkennen.

Für einen Winkelbereich von etwas mehr als 120° kann eine einigermaßen gleichmäßige Verteilung des reflektierten Schalls angenommen werden. Die Energie des gestreuten Schalls liegt in diesem Bereich bei ungefähr -10 dB im Vergleich zum einfallenden Schall. Eine derart gleichmäßige Abdeckung eines recht großen Winkelbereichs spricht dabei für die guten Streueigenschaften des getesteten Diffusors in diesem Frequenzbereich.

Theorie und Grundlagen

Die etwas schlechteren Streueigenschaften in den Bereichen zwischen $\pm 60^\circ$ bis $\pm 90^\circ$ stellen für viele Anwendungen entweder kein Problem dar, da sich in diesem Bereich keine Zuhörer befinden (z.B. im Tonstudio) oder sie können durch Nebeneinanderplatzieren von mehreren Diffusorelementen ausgeglichen werden.

3) Arten von akustischen Diffusoren

Streuung von Schall und damit das Erzeugen eines diffusen Schallfeldes ist auf viele verschiedene Arten möglich. Demnach gibt es auch verschiedene Arten von akustischen Diffusoren, deren Funktion, Aufbau und Wirkungsweise unterschiedlich sind.

Von den ältesten Methoden der Schallstreuung an geometrischen Strukturen über die numerisch berechneten Diffusoren, die auf den Theorien von Schröder basieren, bis zu modernen aktiven Diffusoren haben alle Arten von akustischen Diffusoren ihre Vorteile und Nachteile.

3.1) Einfache geometrische Strukturen

Schon in Kapitel 2) wurde kurz über die Funktion von Wandverzierungen, Figuren und Balkonen in teilweise schon jahrhundertealten Konzertsälen gesprochen, die als akustische Diffusoren dienen. Das zugrunde liegende Prinzip ist dabei so einfach wie bewährt und kann am Beispiel von glatten gekrümmten Flächen einfach erklärt werden.

Konkave Schallflächen tendieren dazu, den Schall zu konzentrieren. Je flacher die konkave Oberfläche ist, desto weiter ist der Punkt entfernt, an dem der Schall konzentriert wird. Geht nun die konkave Fläche in eine konvexe über, so gibt es keinen Brennpunkt mehr und der Schall wird diffus gestreut. Während konkave Schallflächen in der Raumakustik eher Probleme verursachen und nur selten eingesetzt werden, sind konvexe Flächen eine einfache und billige Möglichkeit, um zum Beispiel mit sogenannten polyzyklischen Diffusoren für einen bestimmten Frequenzbereich schon eine recht passable Diffusion erreichen zu können. Die folgenden Abbildungen zeigen Reflexionen an gekrümmten Flächen – in Abb. 2 ist die Oberfläche konkav, in Abb. 3 konvex gekrümmt. [Everest et. al., 2009, S. 132-133]

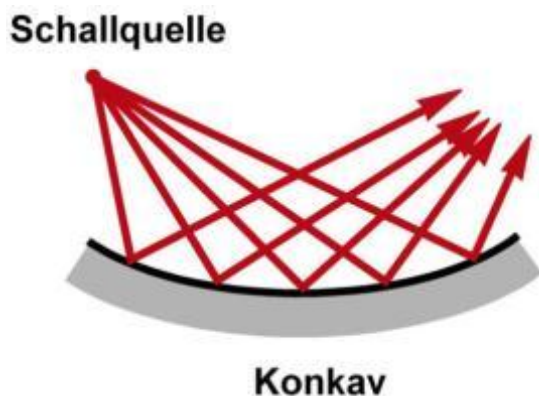


Abb. 2: Reflexion an konkaver Oberfläche
[Baunetzwissen, 2011]

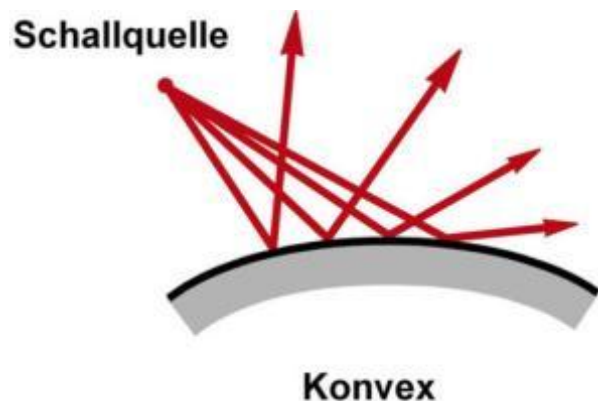


Abb. 3: Reflexion an konvexer Oberfläche
[Baunetzwissen, 2011]

Arten von akustischen Diffusoren

Als weiteres Beispiel soll dabei die Streuung des einfallenden Schalls an den Unregelmäßigkeiten einer Wand mit sägezahnförmigen Vorsprüngen betrachtet werden, wie dies in Abb. 4 dargestellt ist.

Der Inhalt der folgenden Absätze wurde, falls nicht anders angegeben, aus Kapitel 7 des Buches „Akustik – Eine Einführung“ von Heinrich Kuttruff entnommen. [Kuttruff, 2004, S. 130-131]

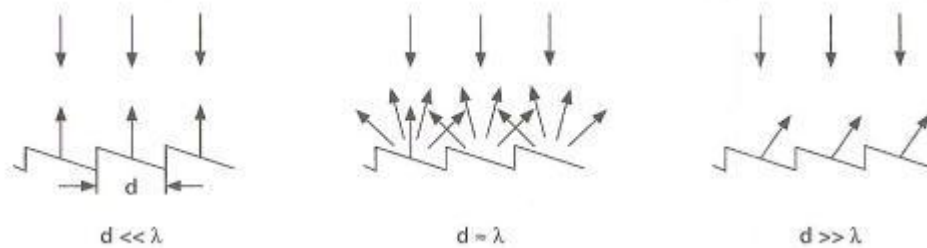


Abb. 4: Schallstreuung an einer Sägezahnstruktur für drei Frequenzbereiche (d : Länge eines Sägezahnelements, λ : Wellenlänge der einfallenden Schallwelle) [Kuttruff, 2004, S. 131]

Wie aus der obigen Abbildung (Abb. 4) zu erkennen ist, kann die einfallende Schallwelle auf drei verschiedene Arten reflektiert werden. Die jeweilige Form der Reflexion ist abhängig vom Verhältnis der Frequenz bzw. der Wellenlänge des einfallenden Schalls zu den Abmessungen der Strukturen an der Wand.

Die Wellenlänge in Metern der einfallenden Schallwelle berechnet sich aus dem Verhältnis der Schallgeschwindigkeit zur Frequenz der Schallwelle.

Wellenlänge nach [Graber, RA 2009, S. 17]:
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

Schallgeschwindigkeit in Luft bei 20°C nach [Graber, RA 2009, S. 7]:
$$c = 331 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

$d \ll \lambda$: Die Abmessungen der Wandelemente sind sehr klein gegen die Wellenlänge. Der einfallende Schall „ignoriert“ quasi die Unebenheiten an der Wand und wird wie von einer völlig glatten Fläche geometrisch reflektiert (Abb. 4, links).

$d \gg \lambda$: Die Abmessungen der Wandelemente sind sehr groß gegen die Wellenlänge. Die einzelnen Teilflächen wirken wie Spiegel und führen zu einer geometrischen Reflexion der einfallenden Schallwelle (Abb. 4, rechts). Dabei gilt dasselbe Gesetz wie in der Optik: Einfallswinkel = Reflexionswinkel.

Laut [Fasold et al., 1984, S. 1239] erfolgt eine geometrische Reflexion nur bis zu einer unteren Grenzfrequenz f_u .
$$f_u = \frac{c}{(b \sin \gamma)^2} \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2} \quad a_1, a_2, > b \quad (\text{Gl. 3.3})$$

Dabei ist γ der Schalleinfallswinkel, b der Durchmesser des Reflektors, a_1 die Entfernung des Reflektors von der Schallquelle und a_2 die Entfernung des Reflektors vom Hörer.

Arten von akustischen Diffusoren

$d \approx \lambda$: Sind die Abmessungen der Wandelemente in der Größenordnung der Wellenlänge, so kommt es zur diffusen Schallreflexion. Dabei ist jedes Wandelement Ausgangspunkt einer Beugungswelle, die den Schall annähernd über den ganzen Richtungsbereich streut. (Abb. 4, mitte)

Anhand des Cosinusetzes nach Lambert kann die Richtungsverteilung der gestreuten Energie an einer sehr stark streuenden Wand durch eine Modellverteilung ersetzt werden.

Lambertsches Gesetz nach [Kuttruff, 2004, S. 130-131]:

$$I(r, \theta) = B(1 - \alpha) \frac{\cos \theta}{r^2} dS \quad (\text{Gl. 3.4})$$

Dabei ist B die Bestrahlungsstärke, die der Energie, welche pro Sekunde auf 1 m² Wand trifft, entspricht, dS ist ein Flächenelement der Wand und α der dazugehörige Absorptionsgrad. $I(r, \theta)$ ist die Intensität des gestreuten Schalls im Abstand r vom Wandelement, der Winkel θ befindet sich zwischen der Wandnormalen und der jeweiligen Streurichtung. Der Absorptionsgrad α ist nach [Graber, RA 2009, S. 62] jener Teil der Schallenergie, welcher von Schallabsorptionsflächen absorbiert, d.h. nicht mehr reflektiert wird.

In der Praxis gibt es so gut wie keine völlig diffuse Schallreflexion, da an einer realen Wand immer sowohl geometrische als auch diffuse Reflexionen vorliegen. Deshalb stellt das Gesetz nach Lambert auch nur ein Modell für diese Richtungsverteilung dar, wie in Abb. 5 schematisch dargestellt ist.

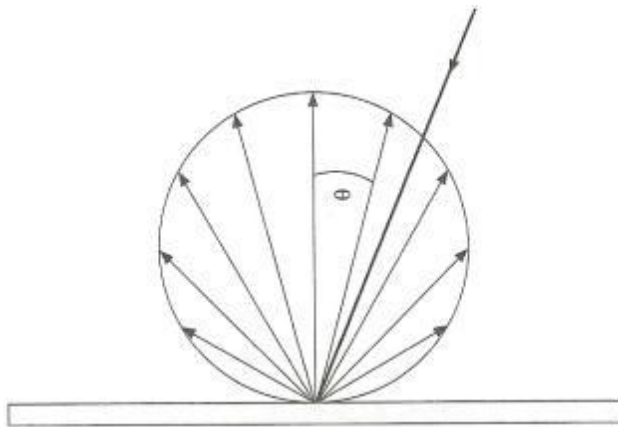


Abb. 5: Richtungsverteilung nach dem Lambertschen Gesetz
[Kuttruff, 2004, S. 131]

Zusätzlich zur Länge und Breite der Strukturelemente spielt auch deren Höhe eine Rolle. Werden zum Beispiel die Schieberegler und Knöpfe auf einem Mischpult mit einer Höhe von ca. 1 cm angenommen, so würden diese für einen Frequenzbereich um etwa 34 kHz als Diffusor wirken, was natürlich praktisch keine Relevanz hat, da diese Frequenzen weit außerhalb des Hörbereiches liegen. [Hunecke, 2011]

Die am häufigsten verwendeten einfachen geometrischen Strukturen zur Erzeugung diffuser Reflexionen zeigt folgende Abbildung (Abb. 6) im Querschnitt.

Arten von akustischen Diffusoren

Es sind dies rechteckige, prismatische und zylindrische bzw. halbkugelförmige Strukturen. Gängige Materialien für die Herstellung dieser Strukturen sind unter anderem Holz, Kunststoff, Blech oder diverse Gips- oder Steinelemente.

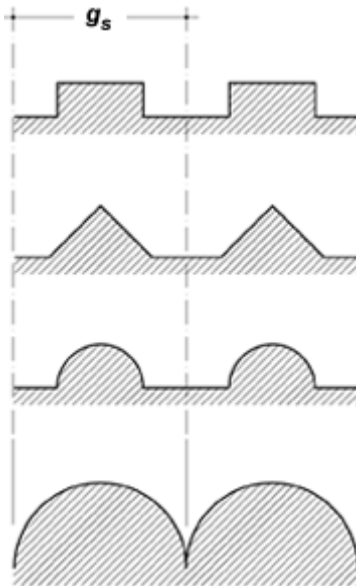


Abb. 6: Einfache geometrische Oberflächenstrukturen (g_s : Strukturperiode)
[Hunecke, 2011]

Als Strukturperiode wird jene Länge bezeichnet, nach der sich die Struktur wiederholt. Diffusoren, die nach diesem Prinzip aufgebaut sind, wirken allerdings nur in einem eher schmalen Frequenzbereich zufriedenstellend. Bei Verhältnissen der Strukturen wie in Abb. 6 wird ein maximaler Streugrad bei jenen Wellenlängen erreicht, die einer halben bis ganzen Strukturperiode entsprechen. Das heißt, dass der wirksame Frequenzbereich ungefähr eine Oktave umfasst. Zylindrische und prismatische Strukturen wirken dabei breitbandiger als rechteckige. [Hunecke, 2011]

Ist die akustische Wirkung also relativ schmalbandig, kann sich damit auch ein recht unangenehmer akustischer Nebeneffekt einstellen, der sich durch eine starke Klangfärbung des Streuschalls bemerkbar macht und für den Hörer als unangenehmes Zischen oder Schwirren zu hören ist. Der wirksame Frequenzbereich lässt sich allerdings vergrößern, in dem zum Beispiel auf verschiedene Schallwellenlängen abgestimmte Strukturen miteinander kombiniert werden. [Fasold et al. 1984, S. 1240-1241]

Für eine hohen Streugrad häufig verwendeter periodischer Oberflächenstrukturen für diffuse Schallreflexion wie in Abb. 7, Abb. 8 und Abb. 9 wurden von Meyer und Bohn folgende Bemessungsregeln erarbeitet: [Fasold et al., 1984, S. 1241]

g ist dabei die Strukturperiode, b die Breite eines Strukturelements und d die Höhe eines Strukturelements.

$$\text{Rechteckstruktur:} \quad d/b = 1; \quad g \approx \lambda \dots 2\lambda; \quad d \approx g/5 \quad (\text{Gl. 3.5})$$

Arten von akustischen Diffusoren

Prismatische Struktur: $d/b = 1/2$; $g \approx \lambda \dots 2\lambda$; $d \approx g/3 \dots g/4$ (Gl. 3.6)

Halbzylinderstruktur: für $b/g = 1/2 \dots 1/6$ sei $g \approx \lambda \dots 2\lambda$; $d \approx g/4$ (Gl. 3.7)

bei engliegenden Zylindern ($b = g$) sei $d \approx g/2$ (Gl. 3.8)

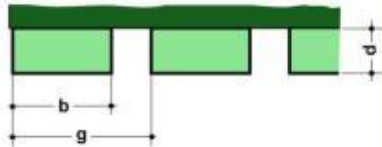


Abb. 7: Periodische Rechteckstruktur
[Baunetzwissen, 2011]

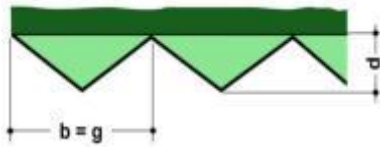


Abb. 8: Periodische Dreieckprismenstruktur
[Baunetzwissen, 2011]

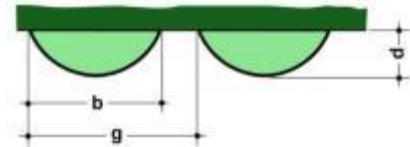


Abb. 9: Periodische Halbzylinderstruktur
[Baunetzwissen, 2011]

Der große Nachteil bei der Anwendung von geometrischen Strukturen als akustische Diffusoren ist, dass diese für eine gute Wirksamkeit bei tiefen Frequenzen sehr große Abmessungen der Strukturen und große Höhen haben müssen. Deshalb ist ihr Einsatzbereich auch eingeschränkt, da derart große Elemente unhandlich und auch optisch nicht ansprechend sind.

In den nächsten Abschnitten werden daher einige Arten von Diffusoren besprochen, deren Funktionsweisen auf anderen Prinzipien beruhen und deren wirksamer Frequenzbereich größer ist.

3.2) Akustische Diffusoren nach der Theorie von Schröder

Für die akustischen Diffusoren nach dem Prinzip der geometrischen Strukturen gibt es keine wirklich exakte Möglichkeit, die akustischen Eigenschaften mathematisch zu berechnen, was im Bereich der raumakustischen Planung natürlich nachteilig ist, da die jeweiligen Vorgaben möglichst genau erreicht werden sollen.

Das Prinzip der heute meist verwendeten modernen akustischen Diffusoren stammt aus den 1970er Jahren, als Manfred R. Schröder die Theorie der auf numerischer Berechnung basierenden Diffusoren („number-theoretic diffusors“) veröffentlichte.

Damit ließen sich erstmals mit Hilfe von bestimmten mathematischen Operationen die Eigenschaften akustischer Diffusoren schon im Voraus relativ exakt und schnell berechnen. Diese mathematischen Operationen bilden noch heute die Grundlage zur Berechnung und Dimensionierung, wobei die Genauigkeit durch den Einsatz von Computern noch wesentlich verbessert wurde.

Einige auf den Theorien von Schröder basierende Arten von akustischen Diffusoren werden in den nächsten Abschnitten behandelt. Die dabei verwendeten Oberflächenstrukturen wiederholen sich zwar auch hier periodisch, aber innerhalb der Periode gibt es eine pseudostochastische Anordnung nach verschiedenen Prinzipien.

3.3) Maximalfolgen – Diffusoren

Die Beschreibung der Maximalfolgen-Diffusoren beruht, falls nicht anders angegeben, auf Informationen auf der Homepage von Raumakustiker Dr. Jörg Hunecke. [Hunecke, 2011]

Die Konstruktion von akustischen Diffusoren nach der Maximalfolgenmethode beruht auf der Zahlentheorie der Maximalfolgen. Eine Maximalfolge (MLS – Maximum Length Sequence) ist eine Abfolge einer endlichen Anzahl N (Primzahl) binärer Werte, in diesem Fall $+1$ und -1 , die periodisch wiederholt wird. Eine Folge dieser Art wird auch als pseudostochastische Folge bezeichnet, da das durch Fourier-Transformation (siehe Gl. 3.9) erhaltene Spektrum weiß ist. Auch das Spektrum einer stochastischen Folge – das heißt, z.B. von weißem Rauschen – ist, wie der Name schon sagt, weiß.

Fourier-Transformation nach [Graber, DAT 2009, S. 20]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (\text{Gl. 3.9})$$

Diese Eigenschaft lässt sich für die Konstruktion von akustischen Diffusoren gut nützen, da die Streueigenschaften eines Diffusors mathematisch ähnlich beschrieben werden können wie die Fourier-Transformation. Durch Aufbau einer Struktur mit Streifen gleicher Breite und zwei verschiedener Tiefen, wird der einfallende Schall gleichmäßig in alle Richtungen einer Ebene senkrecht zu den Streifen reflektiert.

Die höherliegenden Streifen haben dabei einen Reflexionsgrad von $+1$, während die tieferliegenden Streifen so an das Schallfeld angekoppelt werden, dass sie einen Reflexionsgrad von -1 aufweisen. [Fasold et al., 1984, S. 1241]

Abb. 10 zeigt einen eindimensionalen Maximalfolgen-Diffusor basierend auf einer Folge mit $N = 7$ im Querschnitt.



Abb. 10: 1D Maximalfolgen-Diffusor mit $N = 7$
[Hunecke, 2011]

Meist werden zur Verbesserung der Schallstreuung bei schrägem Schalleinfall zwischen zwei nebeneinanderliegenden tiefen Streifen noch dünne senkrechte Trennwände angebracht.

Der Nachteil von Maximalfolgen-Diffusoren ist wiederum ihre niedrige Bandbreite, die nur ca. eine Oktave umfasst. Die beste Streuwirkung wird dabei bei jener Frequenz erreicht, deren Wellenlänge viermal der Streiftiefe entspricht (Gl. 3.10). Die Breite der Streifen sollte am besten kleiner oder gleich der halben Wellenlänge sein (Gl. 3.11).

Dimensionierung: $d = \lambda/4$ (Gl. 3.10)

$b \leq \lambda/2$ (Gl. 3.11)

Ein Aufbau wie in Abb. 10 mit streifenförmiger Wandstruktur wirkt nur in der senkrecht zu den Streifen stehenden Richtung schallstreuend, was für viele Anwendungen allerdings ausreichend ist. Diese Diffusoren werden als eindimensionale Diffusoren bezeichnet.

Soll eine streuende Wirkung in zwei Richtungen vorhanden sein, so werden zweidimensionale Diffusoren notwendig. Dabei werden zwei unabhängige Maximalfolgen miteinander multipliziert und es entsteht ein Muster aus Quadraten, die wiederum zwei verschiedene Tiefen haben. Der in Abb. 11 gezeigte zweidimensionale Diffusor basiert auf der Multiplikation von zwei Maximalfolgen der Länge $N = 7$.

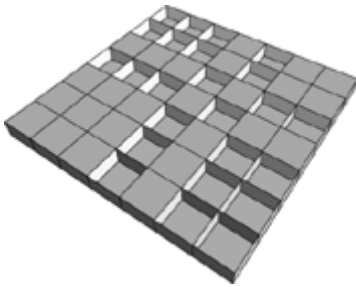


Abb. 11: 2D Maximalfolgen-Diffusor mit $N = 7$
[Hunecke, 2011]

Der Vorteil der akustischen Maximalfolgen-Diffusoren ist ihre Einfachheit sowohl in der Berechnung als auch in der Herstellung. Aufgrund des relativ schmalen wirksamen Frequenzbereichs von nur ca. einer Oktave, werden sie heute aber nur noch selten eingesetzt.

3.4) Quadratic – Residue – Diffusoren (QRD)

Die Beschreibung der Quadratic-Residue-Diffusoren beruht, falls nicht anders angegeben, auf Informationen auf der Homepage von Raumakustiker Dr. Jörg Hunecke. [Hunecke, 2011]

Wie die Maximalfolgen-Diffusoren werden auch die Quadratic-Residue-Diffusoren zu den pseudostochastischen Diffusoren gezählt und die Funktion beruht auch hier auf den Theorien von Schröder, weshalb diese Diffusoren oft schlicht als Schröder-Diffusoren bezeichnet werden.

Die Oberfläche besteht aus Flächen, deren Höhen durch eine bestimmte Folge ganzer Zahlen – eine quadratische Residuenfolge der elementaren Zahlentheorie – festgelegt werden. Durch die stochastische Veränderung der Phase der reflektierten Schallstrahlen an jeder Teilfläche entsteht über die gesamte Fläche eine diffuse Reflexion des Schalls. [Fasold et al., 1984, S. 1242]

Als einfaches Beispiel zeigt Abb. 12 eine quadratische Residuenfolge basierend auf der Primzahl $N = 7$ im Querschnitt.

Arten von akustischen Diffusoren

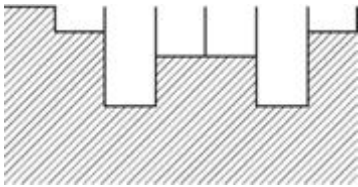


Abb. 12: Quadratische Residuenfolge mit $N = 7$
[Hunecke, 2011]

Der Aufbau der Diffusoren erfolgt mit einzelnen, unterschiedlich tiefen Streifen aus einem schallharten Material. Die Streifentiefen berechnen sich dabei aus einer pseudostochastischen Quadratic-Residue-Folge, die auf der Basis einer Primzahl gebildet wird. Die gewählte Primzahl N bestimmt dabei auch die Länge, nach der die Folge periodisch wiederholt wird und damit die Anzahl der einzelnen Streifen eines QRDs. Gängige Primzahlen zum Design von QRDs sind zum Beispiel 7, 11, 13 und 17, wobei der wirksame Frequenzbereich des Diffusors mit der Anzahl der Streifen steigt. Ein eindimensionaler QRD mit sieben Streifen ($N=7$) ist in Abb. 13 zu sehen. [Hunecke, 2001]

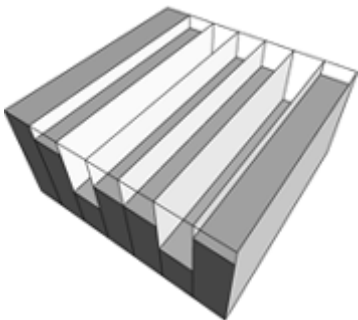


Abb. 13: 1D QRD mit $N = 7$
[Hunecke, 2011]

Die Grundlage zur Berechnung der Struktur eines QRDs ist immer die größte Schallwellenlänge λ_0 , welche noch diffus reflektiert werden soll. Ist $\lambda > \lambda_0$, so geht die diffuse Reflexion immer mehr in eine geometrische über.

Die Breite b einer einzelnen Stufe beträgt im Idealfall: $b = 0,137\lambda_0$ (Gl. 3.12)

Die Stufentiefe d_n jeder einzelnen Stufe ergibt sich zu: $d_n = \frac{\lambda_0 s_n}{2N}$ (Gl. 3.13)

n nimmt dabei Werte von 1 bis N an.

Abb. 14 zeigt die Skizze eines QRD mit Bezeichnung der Strukturabmessungen.

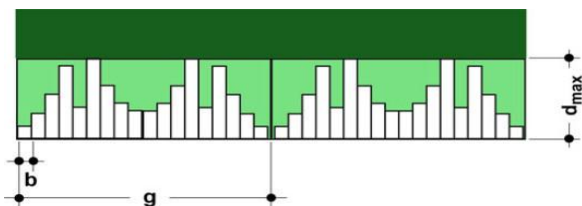


Abb. 14: Skizze eines 1D QRD (g : Strukturperiode)
[Baunetzwissen, 2011]

Arten von akustischen Diffusoren

N ist dabei die gewählte Länge der Zahlenfolge und s_n der Wert der durch die quadratische residuale Zahlenfolge festgelegten Zahl. Wird beispielsweise $N = 17$ als Basis für die Zahlenfolge gewählt, so ergeben sich folgende Werte: 0, 1, 4, 9, 16, 8, 2, 15, 13, 13, 15, 2, 8, 16, 9, 4, 1, 0. Die größte Tiefe d_{\max} beträgt für $s_n = 16$ und $N = 17$ fast $\lambda_0/2$. [Fasold et al., 1984, S. 1242]

Man benötigt also in etwa eine Bautiefe, die der halben Wellenlänge der unteren Grenzfrequenz entspricht.

Die einzelnen, unterschiedlich tief liegenden Reflexionsflächen werden durch dünne senkrechte Trennwände voneinander abgeteilt, um jede Teilfläche einzeln an das Schallfeld anzukoppeln, wobei diese dabei aus akustischer Sicht wie $\lambda/4$ -Hohlraumresonatoren wirken. Dadurch ergibt sich eine wesentliche Vergrößerung der Bandbreite für diffuse Reflexion. Unter der Voraussetzung von $\lambda > 2b$ ergibt sich eine wirksame Bandbreite von ca. $\lambda_0/N < \lambda < 2 \lambda_0$. [Fasold et al., 1984, S. 1242]

Eindimensionale Quadratic-Residue-Diffusoren wie zum Beispiel in Abb. 13 streuen den Schall nur in einer senkrecht zu den Streifen verlaufenden Ebene. Eine zweidimensionale Struktur zur Streuung von Schall aus jeder beliebigen Einfallsrichtung lässt sich durch Rotation einer eindimensionalen Struktur um eine vertikale Achse, z.B. um 45° oder meist 90° erreichen. Eine so erhaltene zweidimensionale Diffusorstruktur basierend auf $N = 7$ und daher mit 49 Feldern zeigt Abb. 15.

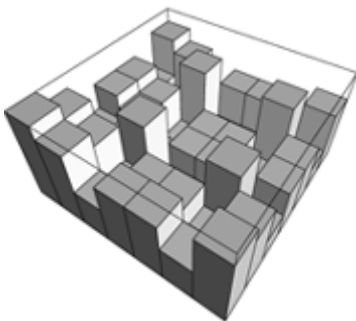


Abb. 15: 2D QRD mit $N = 7$
[Hunecke, 2011]

3.5) Primitive – Root – Diffusoren (PRD)

Die Beschreibung der Primitive-Root-Diffusoren beruht, falls nicht anders angegeben, auf Informationen auf der Homepage von Raumakustiker Dr. Jörg Hunecke. [Hunecke, 2011]

Ebenfalls zu den pseudostochastischen Diffusoren zählen die Primitive-Root-Diffusoren, welche ebenfalls auf den Theorien von Schröder beruhen. Sie sind den QRDs in Funktion und Aufbau sehr ähnlich, wie an der Skizze eines eindimensionalen Primitive-Root-Diffusors in Abb. 16 zu erkennen ist.

Die Streifentiefen von PRDs berechnen sich – wie der Name schon vermuten lässt – aus einer Primitivwurzel-Folge. Wie die Quadratic-Residue-Diffusoren haben auch die PRDs eine gleichmäßige Streuwirkung über einen breiten Frequenzbereich, allerdings ist diese in Richtung der geometrischen Reflexionen etwas reduziert. Daher werden diese Diffusoren eher selten eingesetzt, da sich ein QRD mit demselben Aufwand und mit besseren akustischen Eigenschaften herstellen lässt.



Abb. 16: 1D Primitive-Root-Diffusor
[Fairaudio, 2011]

3.6) Phasengitter aus Helmholtz – Resonatoren

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von diffuser Schallreflexion bilden die sogenannten Phasengitter. Dabei wird eine Oberfläche in streifenförmige (1D) oder schachbrettartige (2D) Teilflächen unterteilt, so dass immer Teilflächen mit unterschiedlicher Impedanz aneinander gereiht sind, welche sich ebenfalls wieder periodisch wiederholen. Diese Phasengitter reflektieren den Schall diffus, wobei die aneinandergrenzenden Flächen unterschiedlicher Impedanz durch unterschiedlich abgestimmte Platten- oder Lochschwinger oder durch nebeneinander angeordnete reflektierende und absorbierende Flächen realisiert werden.
[Fasold et al., 1984, S. 1242]

Die Streuwirkung wird dabei aber immer nach dem Prinzip der unterschiedlichen Impedanzen erzielt. Daher wird in diesem Abschnitt nur auf den gängigsten Typ, der aus Phasengittern aus Helmholtz-Resonatoren aufgebaut wird, eingegangen.

Die akustischen Eigenschaften einer Oberfläche können neben der Wandimpedanz auch noch über den Reflexionsfaktor beschrieben werden, der ebenfalls eine komplexe Größe ist und für diese Anwendung eine anschaulichere Darstellung ermöglicht. Bei lokal wirksamen Oberflächen (wie sie hier vorliegen) lassen sich Wandimpedanz und Reflexionsfaktor einfach ineinander umrechnen (siehe Gl. 3.14). [Hunecke, 2011]

Reflexionsfaktor nach [Graber, RA 2009, S. 30]:
$$r_0 = \frac{W - Z_{01}}{W + Z_{01}} \quad (\text{Gl. 3.14})$$

r_0 ist der im Allgemeinen komplexe Reflexionsfaktor an der Oberfläche des Diffusors, W die im Allgemeinen komplexe Wandimpedanz des Diffusors und Z_{01} die Schallfeldimpedanz des Ausbreitungsmediums (hier: Luft).

Der Inhalt der folgenden Absätze bezieht sich, falls nicht anders angegeben, auf Informationen auf der Homepage von Raumakustiker Dr. Jörg Hunecke. [Hunecke, 2011]

Arten von akustischen Diffusoren

Das Verhältnis der Amplitude der reflektierten Welle zur Amplitude der einfallenden Welle ergibt den Betrag des Reflexionsfaktors. Dieser kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 1 einer vollständigen Reflexion der einfallenden Wellen entspricht und 0 daher einer vollständigen Absorption. Die Phase des Reflexionsfaktors ergibt sich aus dem Phasensprung zwischen reflektierter und einfallender Welle an der Oberfläche des Diffusors.

Verständlicherweise sollen bei der Anwendung als akustischer Diffusor die unterschiedlichen Wandbereiche einen möglichst großen Anteil des einfallenden Schalls diffus streuen. Daher ist der Reflexionsfaktor ebenso idealerweise groß wie die Phasendifferenz der reflektierten Wellen. Um diese Voraussetzungen zu erfüllen, eignet sich die Verwendung von dementsprechend abgestimmten Resonatoren nach dem Helmholtz-Prinzip sehr gut. Abb. 17 zeigt die Skizze eines einfachen Helmholtz-Resonators.

Im Bereich der Resonanzfrequenz, hier oft auch als Helmholtz-Frequenz bezeichnet, beträgt die Phasendifferenz zwischen reflektierter und einfallender Welle bis zu 180 Grad, was die Forderung nach größtmöglicher Phasendifferenz erfüllt. Je weniger ein Helmholtz-Resonator bedämpft ist, umso weiter wird der Frequenzbereich, über den sich die Phasendrehung erstreckt. Ebenso nimmt das Absorptionsvermögen immer weiter ab.

Werden nun zwei nebeneinanderliegende Resonatoren auf verschiedene Frequenzen abgestimmt, lässt sich die geforderte große Phasendifferenz zwischen benachbarten Wandbereichen realisieren.

Die Resonanzfrequenz oder Helmholtz-Frequenz eines Helmholtz-Resonators berechnet sich nur aus seinen Abmessungen (siehe Gl. 3.15 bis Gl. 3.17).

Helmholtz-Frequenz nach [Graber, EA 2010, S. 118]: $f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A_H}{V_H l_{H,eff}}}$ (Gl. 3.15)

$$l_{H,eff} = l_H + 2\Delta l_H \quad (\text{Gl. 3.16})$$

$$\Delta l_H \approx 0,85r_H \quad (\text{Gl. 3.17})$$

A_H entspricht der Querschnittfläche des Halses, $l_{H,eff}$ der Halslänge erweitert um den zweifachen Längenzuschlag und V_H dem Luftvolumen des Resonators.

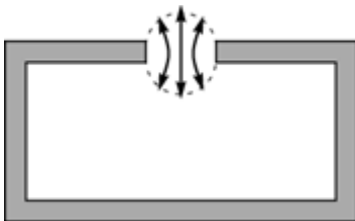
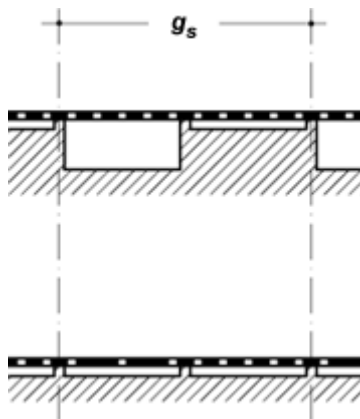


Abb. 17: Skizze eines Helmholtz-Resonators
[Hunecke, 2011]

Auf eine genaue Erklärung der Funktion eines Helmholtz-Resonators wird hier verzichtet und auf einschlägige Fachliteratur verwiesen.

Arten von akustischen Diffusoren

Der Aufbau eines Diffusors mit Phasengittern aus Helmholtz-Resonatoren erfolgt nun also mit streifenförmig angeordneten Strukturen. Dabei werden im Normalfall zwei auf verschiedene Resonanzfrequenzen abgestimmte Resonatoren verwendet, die aus einer gelochten Platte mit angekoppeltem Luftvolumen bestehen. In der Praxis werden die unterschiedlichen Resonanzfrequenzen durch Aneinanderreihen von entweder Streifen mit gleichem Lochmuster und unterschiedlichen Luftvolumina oder unterschiedlichen Lochmustern mit gleichem Luftvolumen erreicht. Die so entstehenden Phasengitter aus unterschiedlich abgestimmten Helmholtz-Resonatoren sind in Abb. 18 im Querschnitt dargestellt. [Hunecke, 2011]



Oben: Unterschiedliche Resonanzfrequenzen durch gleiche Lochung und unterschiedliche Hohlraumtiefen.

Unten: Unterschiedliche Resonanzfrequenzen durch unterschiedliche Lochung und gleiche Hohlraumtiefen.

Abb. 18: Abstimmung von Phasengittern aufgebaut aus Helmholtz-Resonatoren (g_s : Strukturperiode) [Hunecke, 2011]

Die Abstimmung der beiden Resonatoren erfolgt auf zwei Resonanzfrequenzen, die meist etwa drei bis vier Terzen auseinander liegen. Eine gute Streuwirkung wird dabei für einen Frequenzbereich von ca. einer Terz unterhalb der niedrigeren Resonanzfrequenz bis zu einer Terz oberhalb der höheren Resonanzfrequenz erreicht, was in etwa einem Umfang von zwei Oktaven entspricht. Teilweise werden auch Phasengitterdiffusoren nach diesem Prinzip mit einem wirksamen Frequenzbereich von bis zu drei Oktaven erzeugt. [Hunecke, 2011]; [Fasold et al., 1984, S. 1242]

Die verwendeten Materialien sind meist Holz, aber auch Kunststoffe, da diese billiger sind. Die höchsten Streugrade ergeben sich, wenn die unterschiedlichen Streifen gleich breit sind. [Hunecke, 2011]

3.7) Mikroperforierte Diffusoren (MPD)

Die Beschreibung der Mikroperforierten Diffusoren beruht, falls nicht anders angegeben, auf Informationen auf der Homepage von Raumakustiker Dr. Jörg Hunecke. [Hunecke, 2011]

Auf demselben Prinzip wie die Diffusoren mit Phasengittern aus Helmholtz-Resonatoren, nämlich auf nebeneinanderliegenden Bereichen unterschiedlicher Wandimpedanz, beruht auch die Funktion von mikroperforierten akustischen Diffusoren.

Ein MPD besteht aus streifenförmigen, nebeneinanderliegenden mikroperforierten Resonatoren. Durch deren unterschiedliche Wandimpedanzen kommt es wiederum zur diffusen Streuung des einfallenden Schalls. Gängig ist zum Beispiel eine Bauweise mit sieben Streifen wie in Abb. 19.

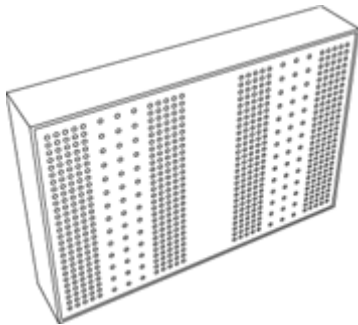


Abb. 19: MPD mit sieben Streifen
[Hunecke, 2011]

Die Berechnung der Resonanzfrequenzen der einzelnen Streifen bei MPDs basiert – wie bei den Schröder-Diffusoren – auf pseudostochastischen Zufallsfolgen. Akustisch betrachtet stellen die unterschiedlich tiefen Streifen der Schröder-Diffusoren jeweils $\lambda/4$ -Hohlraumresonatoren dar, deren Tiefe eben dem Viertel der Schallwellenlänge bei der Resonanzfrequenz des jeweiligen Resonators entspricht. Anstatt dieser $\lambda/4$ -Hohlraumresonatoren werden beim MPD mikroperforierte Resonatoren mit den gleichen Resonanzfrequenzen eingesetzt.

Im Vergleich mit den Schröder-Diffusoren haben die mikroperforierten Diffusoren etwas schlechtere Streueigenschaften, sie kommen aber mit einer wesentlich geringeren Bautiefe aus und können schon um einen vergleichsweise recht geringen Preis hergestellt werden. Sie können aus verschiedenen Materialien bestehen. Oft werden sie aus Acrylglas gefertigt und vor Fenstern in Tonstudios oder Regieräumen platziert. Das hat den Vorteil, dass diese schallharten Glasflächen, die zu dementsprechend störenden Reflexionen führen können, verbaut werden können und das Acrylglas trotzdem licht- und blickdurchlässig ist (z. B. wie in Abb. 20). Ein weiterer Vorteil der MPDs ist, dass sie durch geschicktes Anordnen von z.B. verschiebbaren Abdeckungen in ihren akustischen Eigenschaften noch verändert werden können. Dies kann beispielsweise durch Verdecken von Löchern oder Verändern der Durchmesser von Löchern geschehen.

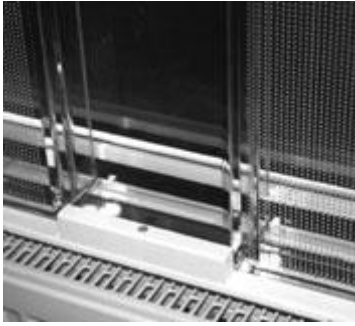


Abb. 20: MPD aus Acrylglas vor dem Fenster eines Regieraums
[Hunecke, 2011]

3.8) Aktive akustische Diffusoren

Die Funktion der aktiven akustischen Diffusoren in diesem Abschnitt beruht auf einem völlig anderen Prinzip als die bisher besprochenen Arten. Die Diffusoren in den vorherigen Abschnitten haben eines gemeinsam. Sie sind allesamt passiv und die akustischen Eigenschaften können im laufenden Betrieb eigentlich nicht vernünftig verändert bzw. auf eine gewünschte Performance eingestellt werden.

Genau in diesen Punkten haben die aktiven akustischen Diffusoren ihre Stärken und Vorteile. Ein weiterer Vorteil ist, dass aktive Diffusoren bei gleicher Bandbreite mit wesentlich geringeren Bautiefen auskommen als passive Diffusoren nach den Theorien von Schröder. Außerdem können mit dieser Technik selbst glatte Fläche schallstreuend wirken, was auch in architektonischer Hinsicht oft gewünscht wird.

Trotzdem werden in der Praxis auf Grund des hohen technischen Aufwands und der Kosten noch selten aktive Diffusoren eingesetzt und darum wird dieses Thema hier auch nur relativ kurz abgehandelt.

Die Beschreibung von aktiven akustischen Diffusoren wurde aus dem Paper „The Potential for Room Acoustic Active Diffusers“ von Trevor J. Cox, Mark R. Avis und Lejun Xiao der University of Salford entnommen. [Cox et. al. (1)]

Die wirksame Bandbreite kommerzieller, das heißt passiver, akustischer Diffusoren ist meist zu den tiefen Frequenzen hin durch die Baugröße limitiert. Wie schon in den vorherigen Abschnitten erklärt, sind die Bautiefen von z.B. Schröder-Diffusoren proportional zur Wellenlänge des zu streuenden Schalls. Dabei kann es recht oft zu Problemen mit fehlendem Platz und ästhetischen Nachteilen kommen, was nicht selten zu einem Kompromiss zwischen akustischen Eigenschaften und Architektur führt.

In diesem Punkt setzt also die relativ neue Technik der aktiven Diffusoren an, die mit Hilfe einer aktiven Impedanzkontrolle an der Oberfläche die Bandbreite zu tiefen Frequenzen hin

Arten von akustischen Diffusoren

vergrößert und zusätzlich ein Verändern der Eigenschaften eines Diffusors im laufenden Betrieb möglich werden lässt.

Die aktive Kontrolle der Impedanz an der Oberfläche des Diffusors stellt auch das Kernstück der Funktion dieser Technik dar. Auf die verschiedenen Ansätze zur Realisierung wird hier auf Grund des großen Umfangs nicht näher eingegangen und auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen. Die gängige Variante ist es, Lautsprecher in die Oberfläche einzubauen und diese mit Hilfe von elektronischen Schaltungen zu steuern. So kann mittels Kontrolle der Bewegungen der Lautsprechermembranen deren Impedanz für einfallende Schallwellen beeinflusst werden.

Untersuchungen haben ergeben, dass eine sehr gute Wirksamkeit mit sogenannten Hybrid-Diffusoren erreicht werden kann. Dabei werden bei Schröder-Diffusoren eine oder mehrere Vertiefungen durch aktive Elemente ersetzt. Im hohen Frequenzbereich ist dabei der passive Teil für die Diffusion verantwortlich, zu tiefen Frequenzen hin übernehmen diese Aufgabe die gesteuerten Lautsprecher.

Somit wird auf eine bewährte Technik vertraut, deren Eigenschaften gut bekannt sind, und diese wird mit den aktiven Komponenten kombiniert. Beide Systeme arbeiten in den für sie jeweils optimalen Frequenzbereichen und führen in Kombination zu einer guten Performance. So kann ohne allzu großen finanziellen und technischen Aufwand die Bandbreite im Vergleich zu einem rein passiven Diffusor wesentlich vergrößert werden.

Als praktisches Beispiel wird hier ein passiver Quadratic-Residue-Diffusor nach Schröder basierend auf der Primzahl $N = 7$ angeführt (siehe Abb. 21).

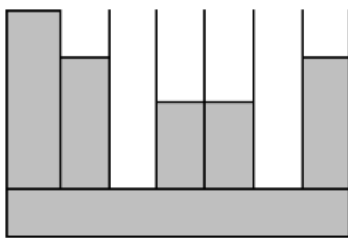


Abb. 21: Passiver QRD mit $N = 7$
[Cox et. al. (1)]

Die beiden tiefsten Abschnitte werden nun durch zwei Lautsprecher ersetzt, womit die notwendige Tiefe beim QRD mit zwei aktiven Elementen bei vergleichbarer Performance auf ca. die Hälfte sinkt (siehe Abb. 22).

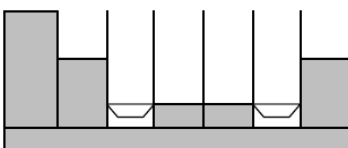


Abb. 22: Hybrid QRD mit $N = 7$ mit zwei aktiven Elementen
[Cox et. al. (1)]

Arten von akustischen Diffusoren

Umgekehrt bedeutet das, dass bei gegebener Tiefe eine Wirksamkeit für eine wesentlich höhere Bandbreite erreicht werden kann. Die Aufgabe der aktiven Elemente ist dabei, die Vertiefungen für einfallende Schallwellen akustisch tiefer „aussehen“ zu lassen als diese tatsächlich sind.

Abb. 23 stellt die Diffusion (Streugrad) des passiven QRDs mit $N = 7$ und des Hybrid-QRDs mit den beiden eingebauten Lautsprechern gegenüber. Als Vergleich ist die Diffusion einer glatten Oberfläche angegeben. Die Designfrequenz der Diffusoren beträgt jeweils 500 Hz.

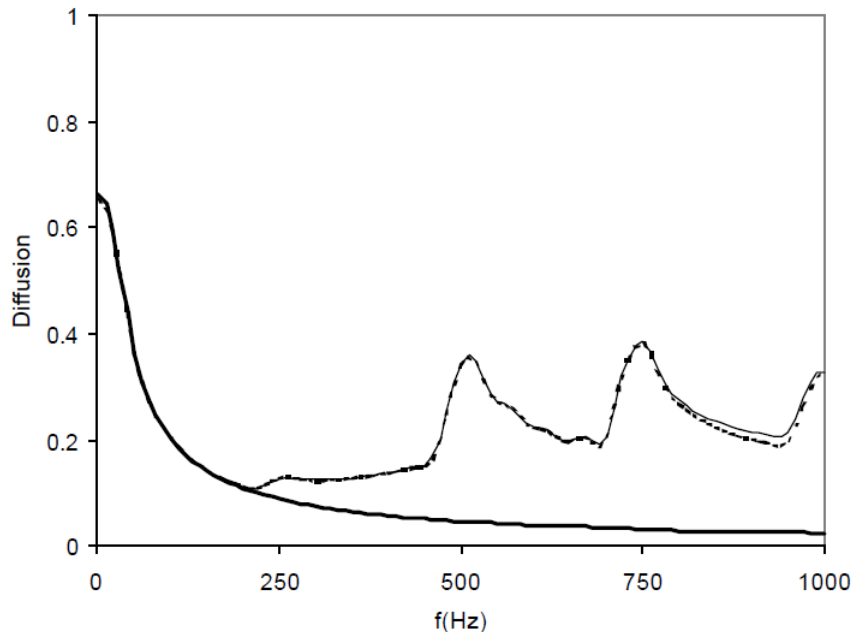


Abb. 23: Diffusion von passivem QRD, aktivem QRD (Hybrid) und glatter Oberfläche [Cox et. al. (1)]

Je höher der Streugrad ist, desto gleichmäßiger ist die Schallverteilung in die Raumrichtungen (siehe Abschnitt 2.2)). Es ist zu erkennen, dass der passive und aktive Diffusor beinahe über den gesamten betrachteten Frequenzbereich dasselbe Verhalten zeigen. Die etwas niedrigeren Werte des aktiven QRD oberhalb von etwa 800 Hz resultieren aus einer Resonanzfrequenz der Steuerelektronik bei 875 Hz, die das Verhalten in diesem Bereich negativ beeinflusst.

Aus diesen Betrachtungen lässt sich der wahrscheinlich größte Vorteil des Einsatzes aktiver Diffusoren einfach zusammenfassen. Bei gegebener Einbautiefe kann durch die virtuelle Tiefenvergrößerung die Performance bei tiefen Frequenzen deutlich verbessert werden und so eine wesentlich vergrößerte Bandbreite erreicht werden. Damit wird diese Technik in Zukunft eine wertvolle Alternative und Erweiterung zur Verwendung passiver akustischer Diffusoren darstellen.

4) Designkriterien für akustische Diffusoren

Die in Kapitel 3) besprochenen Arten von Diffusoren haben je nach Typ ihre Nachteile und Vorteile und ihre entsprechenden Anwendungsgebiete. Obwohl die dahintersteckenden Theorien bewährt sind, gibt es einige Aspekte, die teilweise bei der Entwicklung wahrscheinlich nicht bedacht wurden, die aber mit dem heutigen Wissen und der heutigen Technik aufgezeigt und verbessert werden können.

Wichtig sind dabei zum Beispiel die Berücksichtigung der Form der Schallstreuung, Einschränkungen in der Bandbreite bzw. Wirkung für diskrete Frequenzen und das Auftreten von Absorption. Diese Punkte wurden von Trevor J. Cox von der Salford University untersucht und in einigen Papers ausgeführt, auf die sich dieses Kapitel im Großen und Ganzen stützt. Dabei bezieht sich Cox in den Untersuchungen auf Diffusoren aus geometrischen Oberflächenstrukturen und auf Diffusoren nach den Schröder-Theorien, da diese annähernd den gesamten Anwendungsbereich abdecken und in der Praxis die häufigste Verwendung finden.

Die Designkriterien für akustische Diffusoren in den Abschnitten von Kapitel 4) wurden, falls nicht anders angegeben, aus folgenden beiden Papers entnommen: „Acoustic Diffusers: The Good, the Bad and the Ugly“ von Trevor J. Cox [Cox (2)] und „Thirty years since “Diffuse Sound Reflection by Maximum-Length Sequences“: Where are we now?“ von Trevor J. Cox und Peter D’Antonio [Cox et al. (3), 2005]

4.1) Räumliche und zeitliche Schallstreuung

In den Originalarbeiten von Schröder wurde hauptsächlich der räumlichen Verteilung des Schalls durch akustische Diffusoren Beachtung geschenkt. Mittels Polardiagrammen wurde dargestellt, wie der Schall bei bestimmten Frequenzen keulenartig verteilt wird. Die räumliche Streuung des Schalls ist - wie schon in Kapitel 2) erwähnt - eine wesentliche Aufgabe akustischer Diffusoren, um vor allem in kleineren Räumen wie Abhörplätzen in Tonstudios Raummoden und starke einzelne Reflexionen zu unterdrücken.

Sollen akustische Diffusoren allerdings keine zu großen Klangfärbungen bewirken, so ist die räumliche Streuung des Schalls alleine nicht ausreichend. In Studien mit geometrisch strukturierten Oberflächen wurde anhand der Betrachtung der Streuwirkung von Halbzylinderelementen gezeigt, dass deren Auswirkungen auf die Raumakustik von vielen Zuhörern als negativ und unangenehm beschrieben werden. Diese Halbzylinder verursachen (fast) ausschließlich räumliche Schallstreuung, da die Abmessungen keine wesentlichen Unterschiede der Weglängen bewirken.

Ein guter akustischer Diffusor muss daher sowohl räumliche als auch zeitliche Diffusion bieten. Obwohl Schröder-Diffusoren ursprünglich ebenfalls nur für räumliche Schallstreuung

entwickelt wurden, bieten diese bei entsprechend großen Tiefen auch eine recht gute zeitliche Streuung des einfallenden Schalls, weshalb sie auch eine natürlichere akustische Umgebung erzeugen als die Diffusoren mit geometrisch strukturierten Oberflächen.

Vor allem in Versuchen mit Musikern wurden diese Ergebnisse bestätigt. Dabei wurden die seitlichen und oberen Begrenzungsflächen von Bühnen einmal als glatte Wände ausgeführt, einmal mit Halbzylindern und beim dritten Versuch mit Schröder-Diffusoren bestückt. Die Wirkung der Halbzylinder wurden dabei von den Testpersonen als unangenehmer empfunden als die glatten Wände, während die Akustik mit den Schröder-Diffusoren als natürlich beschrieben wurde.

4.2) Diffusion von prismatischen Strukturen

Die akustischen Eigenschaften von prismatischen Oberflächenstrukturen sind einer besonderen Betrachtung zu unterziehen, da sich die Form der Reflexionen stark mit dem Einfallswinkel ändern kann. Es kann zu spiegelnden Reflexionen kommen, zu einer Konzentration auf einige Hauptrichtungen und zur gleichmäßigen Streuung.

Prismatische Strukturen finden vor allem auf Grund der Einfachheit der Herstellung häufig Anwendung als Diffusoren in Konzertsälen oder anderen Aufführungsstätten. Meist sind aber die Winkel der Dreiecke (oder Pyramiden) so gewählt, dass die räumliche und zeitliche Schallstreuung nur in einem begrenzten Raumbereich gleichmäßig ist.

Als Beispiel wird in Abb. 24 die Streuwirkung eines Dreieckprismas mit Seitenwinkeln von 30° zur Wandfläche betrachtet. Auf die Messmethoden zur Ermittlung dieser Streudiagramme wird in Kapitel 6) noch näher eingegangen.

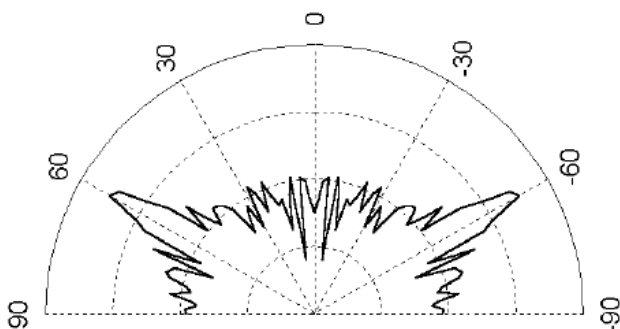


Abb. 24: Streudiagramm eines Dreieckprismas mit 30° Seitenwinkeln [Cox (2)]

Ganz deutlich zu erkennen sind die beiden stark ausgeprägten Keulen bei $\pm 60^\circ$, deren Auftreten bestimmt nicht erwünscht ist. Das Verhalten über den Rest des Bereichs entspricht den Erwartungen. Es lässt sich eine recht gleichmäßige Streuung und eine Symmetrie um die 0° -Achse erkennen.

4.3) Zu kurze Periodendauern bei zweidimensionalen Diffusoren

Der akustische Diffusor in Abb. 25 ist nach bisherigem Verständnis ein zweidimensionaler Diffusor und wird demnach auch als solcher bezeichnet. Das heißt, dass sowohl in die x-Richtung als auch in die y-Richtung eine annähernd gleich gute Schallstreuung vorliegen müsste, was hier in Wirklichkeit aber nicht der Fall ist.

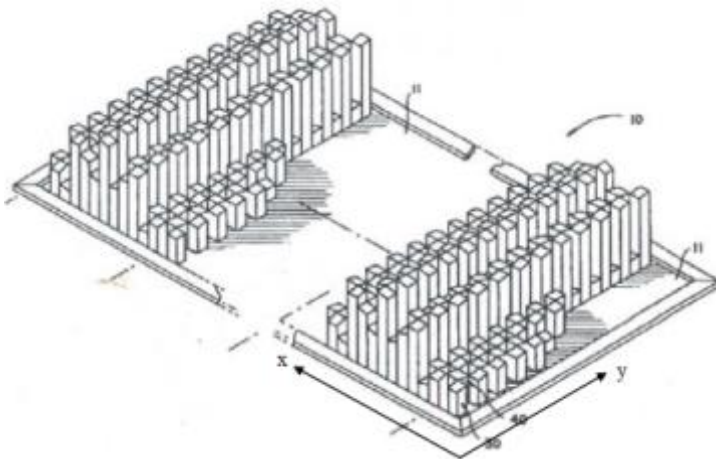


Abb. 25: „Zweidimensionaler“ akustischer Diffusor
[Cox (2)]

Wie aus der Abbildung sichtbar ist, befindet sich in x-Richtung eine genügend große Anzahl unterschiedlich tiefer Abstufungen. In y-Richtung ist die Anzahl der unterschiedlichen Abstufungstiefen allerdings sehr gering und die Strukturperiodenlänge daher relativ kurz. Das bedeutet also, dass die Oberfläche in y-Richtung keine guten Streueigenschaften aufweisen kann (siehe Abschnitt 3.4)), wie auch aus dem Streudiagramm in y-Richtung (siehe Abb. 27) ablesbar ist. Dieser akustische Diffusor dürfte also strenggenommen nicht als zweidimensionaler Diffusor bezeichnet werden, da die Streuwirkung nur in x-Richtung zufriedenstellend ist (siehe Abb. 26).

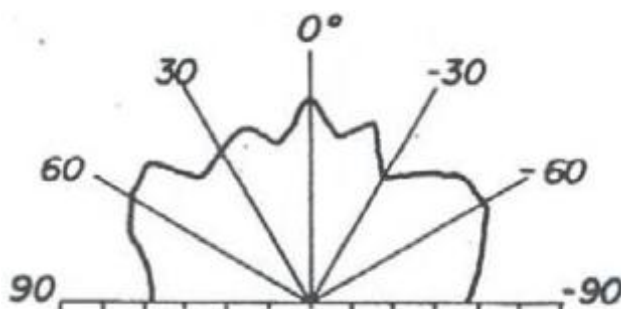


Abb. 26: Streudiagramm des „zweidimensionalen“ Diffusors
in x-Richtung
[Cox (2)]

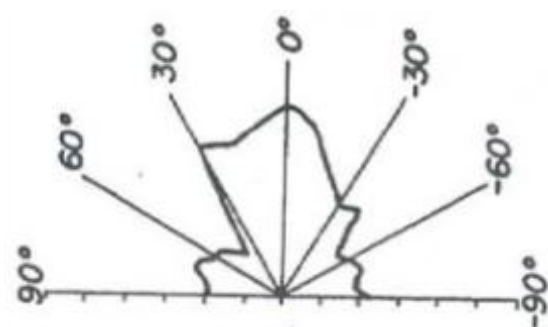


Abb. 27: Streudiagramm des „zweidimensionalen“
Diffusors in y-Richtung
[Cox (2)]

Während im linken Streudiagramm (x-Richtung) eine relativ gleichmäßige Schallstreuung über einen großen Winkelbereich sichtbar ist, tritt im rechten Streudiagramm eine

Konzentration im Bereich von $\pm 30^\circ$ auf und daher keine zufriedenstellende Verteilung des reflektierten Schalls über einen großen Winkelbereich.

4.4) Einschränkung der Bandbreite zu tiefen Frequenzen und Konzentration des reflektierten Schalls auf wenige Hauptkeulen

Bei ungünstigem Zusammenfallen der Periodenlänge von Oberflächenstrukturen und „passender“ Wellenlänge kann es dazu kommen, dass sich der reflektierte Schall auf einige wenige Hauptkeulen verteilt. Wird solch ein Diffusor nun zum Beispiel zur Unterdrückung von Raumechos verwendet, kann dies unter Umständen in einigen Bereichen zu keinen vernünftigen Ergebnissen führen.

Im folgenden Diagramm (Abb. 28) sind die Streuwirkungen von zwei Diffusoren aufgebaut aus Halbzylindern verschiedener Größe dargestellt.

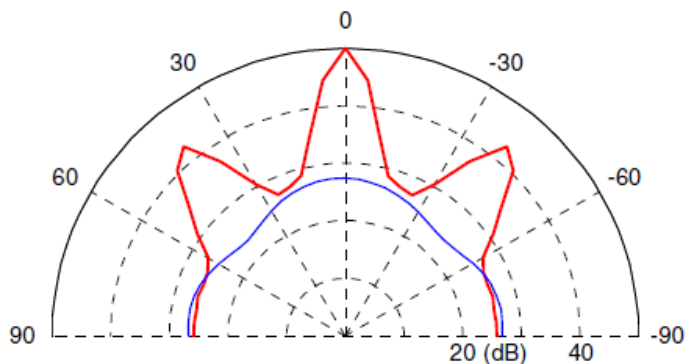


Abb. 28: Streuwirkung von zwei Diffusoren aufgebaut aus Halbzylindern [Cox (2)]

Die rote Kurve zeigt die Streuwirkung von zwölf gleich großen Halbzylinderelementen. Die Wellenlänge des einfallenden Schalls ist dabei in derselben Größenordnung wie die Periodenlänge des Diffusors und es ergeben sich drei stark ausgeprägte Keulen (0. Ordnung) im Streudiagramm.

Idealerweise sollte die Periodenlänge des Diffusors jedoch größer als die Wellenlänge sein. Das bedeutet, dass sich möglichst wenige Strukturelemente auf derselben Länge befinden sollen, z.B. nur ein entsprechend größerer Halbzylinder, wie in diesem Beispiel. Dies führt damit zum Auftreten von Keulen höherer Ordnung und zu einem glatteren Verlauf der Streukurve, wie ihn die blaue Kurve darstellt.

Natürlich gelten diese Voraussetzungen auch für Schröder-Diffusoren, was noch am Beispiel von QRDs gezeigt werden soll. Wird eine zu kurze Periodenlänge verwendet, so ist die Streuwirkung hin zu tiefen Frequenzen stark begrenzt und es dominieren wiederum einzelne gerichtete Keulen niedriger Ordnung das Streudiagramm, was bedeutet, dass keine gute Energieverteilung über einen großen Winkelbereich gegeben ist. [Cox et al. (3), 2005]

Die folgenden beiden Streudiagramme (Abb. 29 und Abb. 30) zeigen die Streuwirkung von zwei Quadratic-Residue-Diffusoren (dicke Linien) mit unterschiedlicher Periodenlänge jeweils im Vergleich mit einer glatten Oberfläche (dünne Linie) gemessen bei einer Frequenz von 1 kHz.

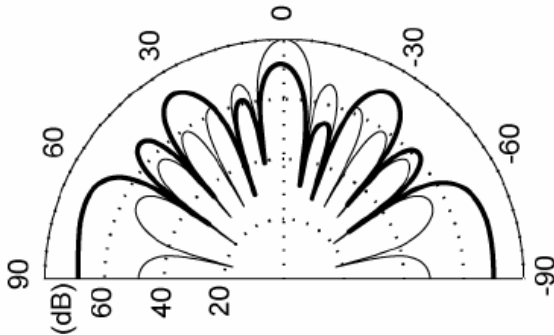


Abb. 29: Streudiagramm QRD 1 im Vergleich mit glatter Oberfläche
[Cox et al. (3), 2005]

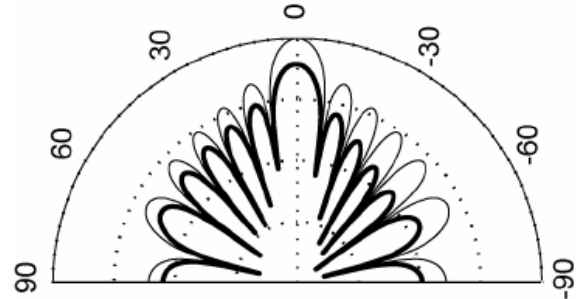


Abb. 30: Streudiagramm QRD 2 im Vergleich mit glatter Oberfläche
[Cox et al. (3), 2005]

Dabei ist die Strukturperiode des QRDs im linken Diagramm dreimal so lang wie jene des Diffusors im rechten Diagramm und dementsprechend ist auch die Verteilung der Energie über den Winkelbereich wesentlich gleichmäßiger. [Cox et al. (3), 2005]

4.5) Einschränkung der Bandbreite zu hohen Frequenzen

Nach der Theorie der Schröder-Diffusoren herrscht in den Vertiefungen eines Diffusors ebene Wellenausbreitung. Die obere Grenzfrequenz von Schröder-Diffusoren wird durch die Breite der einzelnen Vertiefungen bestimmt. Trotzdem wirken die meisten Diffusoren auch oberhalb dieser Frequenz noch schallstreuend, wobei sich das Verhalten nicht mehr genau voraussagen lässt.

Um die obere Grenzfrequenz zu erhöhen, müsste also nach den zur Berechnung herangezogenen Gleichungen einfach die Breite der Vertiefungen immer weiter verringert werden. Dies ist allerdings nur theoretisch sinnvoll, denn sehr schmale und gleichzeitig aber tiefe Vertiefungen führen in der Praxis zu zwei Problemen.

Die Oberfläche des Diffusors wirkt immer mehr als Absorber, was meist nicht erwünscht ist. Außerdem nimmt die Streuwirkung zu tiefen Frequenzen hin ab, da der Abstand zwischen den unterschiedlich großen Pfadlängen zu klein wird.

Eine elegante Lösung für diese Probleme stellt die Verwendung von Fraktal-Diffusoren höherer Ordnung dar, die in Abschnitt 5.7) noch genauer besprochen werden.

4.6) Kritische und diskrete Frequenzen

Schröder beschrieb in seinen Theorien, dass die Wirkung von Maximallängen-Diffusoren auf den Bereich von etwa einer Oktave beschränkt sei. Der Grund dafür ist, dass eine Oktave oberhalb der kritischen Frequenz die Oberfläche des Diffusors wie eine glatte Oberfläche wirkt, da die Reflexionskoeffizienten aller Vertiefungen gleich 1 sind.

Diffusoren nach der numerischen Zahlentheorie basieren auf Sequenzen aus Integerzahlen, daher hängen auch die Verhältnisse der unterschiedlichen Tiefen über Integerzahlen zusammen. Daraus folgt, dass es ein Set von diskreten Frequenzen (Vielfache der Designfrequenz) gibt, wo alle Reflexionskoeffizienten gleich 1 sind und es daher zur Reflexion einer ebenen Welle kommt.

Eine einfache Lösung für dieses Problem ist die Verwendung von großen Primzahlen als Basis für das Design. Die Berechnung solcher Strukturen ist heute durch die Verwendung von Computern keine große Herausforderung mehr. Allerdings sind Diffusoren basierend auf kleinen Primzahlen trotzdem einfacher und billiger herzustellen und decken deshalb den größten Teil des Einsatzgebietes ab.

Durch die computerbasierte Berechnung ist es auch möglich, Sequenzen zu verwenden, welche nicht auf Integerzahlen basieren. Daher stehen auch die Tiefen nicht in den entsprechenden Intergerverhältnissen zueinander.

Ein heute oft gewählter Ansatz ist die Verwendung von optimierten numerischen Algorithmen zur Verhinderung des Problems diskreter Frequenzen. Daraus entstehen die sogenannten Curved-Diffusoren, deren Oberflächen gekrümmt sind und kontinuierlich verlaufen, so dass es keine einzelnen Stufen mehr gibt. Eine genaue Beschreibung dazu befindet sich in Abschnitt 5.8). Damit ist auch das Problem der diskreten Frequenzen gelöst.

Genau genommen kann die Wirkung von auf numerischen Berechnungen basierenden Schröder-Diffusoren nur für diskrete Frequenzen vorausgesagt werden. Obwohl Schröder-Diffusoren eine zufriedenstellende Schallstreuung zwischen diesen diskreten Frequenzen bieten, gibt es also streng genommen keine definierte Streuwirkung über die gesamte Designbandbreite.

Besonders problematisch ist dies bei Primitive-Root-Diffusoren, da diese so entworfen werden, dass sie spiegelnde Reflexionen in bestimmte Richtungen unterdrücken. Diese Unterdrückung ist damit nur bei bestimmten diskreten Frequenzen gegeben.

4.7) Absorption

Der Hauptgrund für Absorption von Schröder-Diffusoren ist der hohe Energiefluss zwischen Vertiefungen in Resonanz und Vertiefungen außerhalb der Resonanz. Das wird als sogenannte $\lambda/4$ -Resonanz bezeichnet und die Absorption ist umso größer, je schmaler die einzelnen Vertiefungen der Absorber sind.

Zwei Dinge sind bei der Herstellung und beim Einbau von Schröder-Diffusoren unbedingt zu vermeiden, wenn die absorbierende Wirkung möglichst gering sein soll.

Erstens sollte die Oberfläche unbedingt frei liegen und nicht mit zum Beispiel Stoffen bespannt werden. Am Eingang der Vertiefungen ist die Teilchengeschwindigkeit am höchsten. Wird genau an diesen Stellen Material mit einer hohen akustischen Impedanz platziert, so können sich unerwünscht sehr hohe Werte für die Absorption ergeben, wie die Verläufe der Absorptionskoeffizienten von Schröder-Diffusoren in Abb. 31 zeigen.

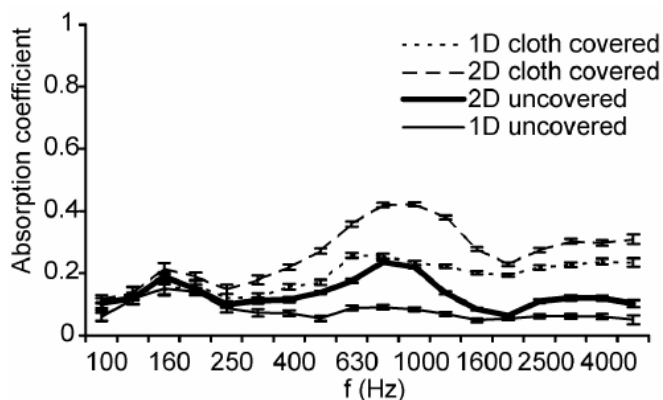


Abb. 31: Absorptionskoeffizient von Schröder-Diffusoren
[Cox et al. (3), 2005]

Betrachtet werden jeweils ein eindimensionaler und ein zweidimensionaler QRD, dessen Oberfläche einmal frei liegt (durchgezogene Linien) und einmal mit Stoff abgedeckt ist (unterbrochene Linien). Deutlich zu erkennen ist die wesentlich größere absorbierende Wirkung bei Stoffbespannung im Bereich ab etwa 300 Hz.

Ein zweiter Grund für hohe Absorption eines Schröder-Diffusors kann schlechte und ungenaue Herstellung sein. Sind die Einzelteile der unterschiedlichen Stufen nicht fest und dicht miteinander verbunden, so können durch Spalten Luftvolumina hinter dem Diffusor angekoppelt und somit akustisch wirksam werden. Vor allem am Grund der Vertiefungen kann dies zu überraschend hohen Werten für die Absorption führen. In diesem Fall ist es vernünftig, eher auf gute Verarbeitungsqualität zu setzen als danach aufwändige Fehlersuchen und Reparaturen durchführen zu müssen.

5) Design – Möglichkeiten

In diesem Kapitel werden sowohl die unterschiedlichen Bauarten, die verwendeten Materialien und ästhetischen Aspekte akustischer Diffusoren behandelt als auch spezielle Formen einiger in Kapitel 3) besprochener Arten von Diffusoren.

Dabei wird auch auf die in Kapitel 4) aufgezählten Schwächen von traditionellen Diffusoren eingegangen und es werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie diese Probleme bei modernen akustischen Diffusoren behoben werden können.

Wie in jedem Bereich der Technik hat auch in der Raumakustik der Computer einen großen Fortschritt ermöglicht. Die Berechnungs- und Messmethoden sind heute viel detaillierter und die numerischen Methoden zur Planung sind wesentlich genauer und zugleich schneller möglich. Außerdem kann die Wirkung von akustischen Bauelementen schon vor der Produktion in Computersimulationen betrachtet und so eine bessere Anpassung an Design und Anwendung vorgenommen werden.

Zusätzliche spielt mittlerweile in fast allen Anwendungen die Architektur eine gewichtige Rolle. In die modernen Formen von Gebäuden und Räumen müssen sich auch die raumakustischen Komponenten wie eben die akustischen Diffusoren einpassen. Daher sind die Formen moderner Diffusoren oft sehr vielfältig und haben mit den traditionellen Formen von z. B. Schröder-Diffusoren optisch wenig gemeinsam. Vielfach werden die einfachen Algorithmen mittels Computerberechnungen optimiert und auf die jeweilige Anwendung adaptiert.

5.1) Oberflächenstrukturen als akustische Diffusoren in alten Konzertsälen

Einige der akustisch besten Konzertsäle der Welt wurden bereits vor Jahrzehnten oder gar Jahrhunderten erbaut. Obwohl ohne exakt berechnete Raumakustik oder Möglichkeiten zur Simulation und ohne aufwändige akustische Elemente erbaut, bieten diese Konzertsäle teilweise unübertroffene akustische Bedingungen.

Auch wenn sich die Vorstellungen von einer guten Raumakustik über die Zeit maßgeblich verändert haben, so erfüllen einige dieser Konzertsäle noch heute viele der modernen Kriterien. Dazu gehören natürlich auch das Unterdrücken von Raummoden, Echos und späten direkten Reflexionen und ebenso das Sicherstellen eines möglichst guten diffusen Schallfeldes aus dem Raum hinter den Zuhörern.

Diffuse Schallreflexionen an Begrenzungsflächen werden hier nicht mit speziellen akustischen Bauteilen wie Diffusoren erzeugt.

Design – Möglichkeiten

Verschiedene aufwändige Verzierungen an Wänden und Decken aus Holz oder Gips, Figuren und Säulen sowie Bögen und Balkone übernehmen hier vielfach die Aufgabe der Schallstreuung. Abhängig von deren Abmessungen haben diese Bauelemente Auswirkungen auf die Reflexion des einfallenden Schalls verschiedener Frequenzen bzw. Wellenlängen.

Somit erfüllen diese nach ästhetischen Idealen der jeweiligen Zeit der Entstehung – Barock, Klassik, Romantik usw. – gestalteten Komponenten nicht nur den Zweck einer ansprechenden Optik sondern beeinflussen auch die Raumakustik positiv.



Abb. 32: Goldener Saal im Wiener Musikverein
[Wiener Musikverein, 2011]

Der Goldene Saal im Wiener Musikverein (Abb. 32), der als wahrscheinlich bester Konzertsaal der Welt bekannt ist, verdankt seine besondere Akustik vielen verschiedenen Faktoren. Dazu gehören zum Beispiel die Abmessungen und Proportionen oder die Ausstattung des Saals. Auch hier finden sich natürlich schallstreuende Elemente an Wänden und Decken. Die feinen Strukturen aus Holz (an der Decke sehr gut sichtbar) sind dabei im hohen Frequenzbereich wirksam, diverse Figuren und Statuen an den Seitenwänden im mittleren Frequenzbereich und der Bereich der tieferen Frequenzen wird von Balkonen, Vorsprüngen und Nischen abgedeckt.

Das Gebäude des Wiener Musikvereins wurde im Jahr 1870 fertiggestellt und starke Ähnlichkeiten in Form und bei raumakustischen Besonderheiten finden sich bei vielen anderen in dieser Zeit entstandenen Konzertsälen wieder.

Als weitere Beispiele seien hier der Stephaniensaal in Graz (erbaut 1883 – 1885), welcher ebenfalls eine hervorragende Akustik aufweist oder der Große Saal des Mozarteums in Salzburg (erbaut Mitte des 19. Jh.) genannt.

5.2) Oberflächenstrukturen als akustische Diffusoren in modernen Konzertsälen

Vor allem bei Veranstaltungsräumen und Konzertsälen, die in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts geplant und erbaut wurden, lassen sich sofort starke architektonische Unterschiede im Vergleich mit älteren Konzertsälen (Abschnitt 5.1)) erkennen.

Die diffuse Verteilung von Schall im Raum geschieht zwar oftmals besonders auf Grund der Größe der Räume weiterhin mit Hilfe verschiedener Oberflächenstrukturen an Decken und Wänden, jedoch haben sich die Formen und verwendeten Materialien stark verändert.

Feine Verzierungen, Stuckteile, Figuren und oft auch Balkone sind schlichten Formen und geraden Linien gewichen. Trotzdem müssen die akustische Funktion und somit auch die Schallstreuung an Begrenzungsflächen nach wie vor gewährleistet sein.

Dabei werden verschiedenste Konstruktionen eingesetzt, um auch ohne spezielle Diffusorelemente wie zum Beispiel Schröder-Diffusoren auszukommen und im Einklang mit der vorgegebenen Architektur zu sein.

Weiterhin spielt natürlich der Einsatz von verschiedenen Wandstrukturen eine wesentliche Rolle beim Erzeugen eines diffusen Schallfeldes. Geschwungene Strukturen an Wänden oder Decken oder auch diverse abgehängte und geschwungene Segel finden häufig Anwendung.

Am Beispiel der Konzertsäle in der Berliner Philharmonie (erbaut 1960 – 1963) lassen sich diese Konstruktionen gut erkennen (z. B. Abb. 33: Kammermusiksaal).



Abb. 33: Kammermusiksaal in der Berliner Philharmonie
[Berliner Philharmonie, 2011]

Die von Lothar Cremer geplante Raumakustik zählt zu den besten der Welt und weist einige Besonderheiten auf. Zusätzlich zur asymmetrischen Raumform, die vor allem

Modenprobleme reduziert, fällt die spezielle Form der Decke auf. Parabolische Hyperboloide dienen dazu, den Schall gleichmäßig im gesamten Raum zu verteilen und auch die Nachhallzeit zu optimieren. Diese gleichmäßige Schallverteilung im Raum ermöglicht sowohl im oben abgebildeten Kammermusiksaal als auch im Großen Saal eine Anordnung der Zuhörerränge rund um die Bühne, was auch bei modernen Konzertsälen eine Besonderheit darstellt. [*Berliner Philharmonie, 2011*]

Ähnliche Decken- und Wandkonstruktionen finden sich auch in anderen großen Konzertsälen auf der ganzen Welt, welche in jüngere Zeit erbaut wurden. Als Beispiel seien hier noch die Metropolitan Opera in New York (eröffnet 1966; Abb. 34) mit ihren aufwändigen Decken- und Balkonkonstruktionen, die Walt Disney Concert Hall (eröffnet 1993) und die Severance Hall des Cleveland Symphonic Orchestra in Ohio (Abb. 68) erwähnt.



Abb. 34: Metropolitan Opera in New York
[www.bonnibenrubi.com, 2011]

5.3) Strukturen mit unterschiedlicher Wandimpedanz

Eine häufig angewandte Technik zur Erzeugung von diffusen Schallreflexionen an Wänden und Decken ist der Einsatz von Regionen mit unterschiedlicher Wandimpedanz.

Meist in Form von Streifen aber auch in Rastern werden dabei Bereiche unterteilt, deren Wandimpedanzen für verschiedene Frequenzbereiche unterschiedliche Werte aufweisen. Das Funktionsprinzip dieser Konstruktionen ist in den Abschnitten 3.6) bzw. 0 beschrieben.

Den häufigsten Einsatz finden dabei Phasengitter aus Helmholtz-Resonatoren oder mikroperforierte Diffusoren.

Die Vorteile liegen dabei auf der Hand. Auf Grund der Einfachheit lassen sich diese Konstruktionen einfach und daher vor allem auch billig herstellen. Einen weiteren großen Vorteil stellt der niedrige Platzbedarf dar, da bereits mit einem relativ kleinen Luftvolumen hinter der Verkleidung und durch unterschiedliche Lochanordnungen eine zufriedenstellende Funktion gewährleistet werden kann. Außerdem können so auch die sichtbaren Oberflächen stufenlos gestaltet werden, was eine erhebliche Aufwandsersparnis beim Einbau bewirkt und auch praktisch und optisch Vorteile hat.

Vor allem in kleineren Räumen wie Tonstudios, Mehrzweckräumen oder Proberäumen werden Strukturen mit unterschiedlicher Wandimpedanz daher gerne eingesetzt. Auch der nachträgliche Einbau ist dabei oftmals einfacher und billiger zu bewerkstelligen als zum Beispiel beim Einsatz von Schröder-Diffusoren.

5.4) Integration bestehender Strukturen

Bei nachträglichen raumakustischen Optimierungen oder manchmal auch bei Neubauten gibt es immer wieder für die Statik oder Architektur wesentliche Bauelemente, die auf den ersten Blick für die Raumakustik nicht förderlich oder vielleicht sogar störend sein können.

Mauervorsprünge oder Nischen, Säulen oder hervorstehende Träger an der Decke können aber mit etwas Fantasie und Geschick oftmals intelligent in die Planung integriert und sogar zur Verbesserung der Raumakustik verwendet werden.

So ist es zum Beispiel möglich, Nischen in Wänden oder Decken als Luftvolumen für mikroperforierte Diffusoren zu verwenden. Auch bei Fenstern ist dies möglich, da für die gelochten Platten von MPDs auch licht- und blickdurchlässiges Acrylglas eingesetzt werden kann.

Der in den folgenden Abbildungen (Abb. 35 und Abb. 36) dargestellte mikroperforierte Diffusor, von VATTER als Micro Wave Diffusor bezeichnet, besteht aus einer Holzverkleidung und drei Abschnitten mit unterschiedlich dichter Lochanordnung, wie in der rechten Abbildung sichtbar wird.



Abb. 35: Micro Wave Diffusor MWD 120-11
[VATTER, 2011]

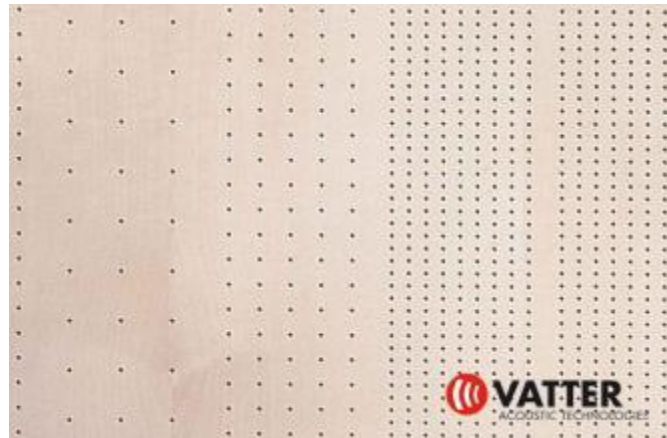


Abb. 36: Micro Wave Diffusor MWD 120-11 Nahansicht
[VATTER, 2011]

Die Fertigung mit CNC-Maschinen sorgt sowohl optisch als auch akustisch für die notwendige Präzision. Das abgebildete Modell ist aus Holz hergestellt, es gibt aber auch die Möglichkeit zur Fertigung aus transparenten Materialien, um zum Beispiel im Tonstudio herkömmliche Glasfenster akustisch zu entschärfen. Der Vorteil liegt dabei bei allen Modellen in der geringen Bautiefe. Die Abmessungen betragen beim obigen Modell zum Beispiel 120 x 120 x 15 cm (B x H x T) bei einem Gewicht von ca. 35 kg, das bei der Acrylglasausführung natürlich wesentlich geringer ist. [VATTER, 2011]

Säulen an Wänden oder hervorstehende Träger an der Decke (wie in Abb. 37) können verwendet werden, um großflächige diffus streuende Fläche aufzubauen. Dies kann zum Beispiel so realisiert werden, dass um diese Bauteile quasi große QRDs gebaut werden und die Säulen oder Träger Stufen dieser Diffusorstrukturen darstellen.

Mauervorsprünge können genutzt werden, in dem sie durch Verkleiden mit geschwungenen oder schrägen Formen zur Schallstreuung beitragen. Bei größeren Abmessungen können derartige Strukturen auch im tieffrequenten Bereich wirksam werden.

Somit werden die baulichen Besonderheiten eines Raumes mitintegriert, um das raumakustische Planungsziel zu erreichen.

Abb. 37 zeigt den Ausstellungsraum des Klavierherstellers Bösendorfer in Wiener Neustadt. Die Raumakustik dieses Ausstellungsraums wurde von VATTER Acoustic Technologies in Gleisdorf geplant. Sichtbar sind die stufenförmigen Holzverkleidungen an Decke und Wänden. Die Wirkung dieser Strukturen kann mit der eines großflächigen Quadratic-Residue-Diffusors verglichen werden.



Abb. 37: Integration von Deckenträgern im Bösendorfer Ausstellungsraum [VATTER, 2011]

5.5) Klassische Quadratic-Residue-Diffusoren (Schröder-Diffusoren)

Der Inhalt dieses Abschnitts bezieht sich, wenn nicht anders angegeben, auf Informationen von VATTER Acoustic Technologies in Gleisdorf und Geschäftsführer Klaus Höfer. [VATTER, 2011]

Sehr häufige Anwendung finden heute natürlich noch immer die sogenannten Schröder-Diffusoren, wobei damit fast immer die Diffusorstrukturen basierend auf einer quadratischen Residuenfolge, wie in Abschnitt 3.4) beschrieben, gemeint werden.

Für die Berechnung der Abmessungen werden die in Abschnitt 3.4) angeführten Formeln herangezogen. Dabei bestimmt die untere Grenzfrequenz bzw. die dementsprechend größte Wellenlänge die Bautiefe des Diffusors. Nach oben hin ist der Frequenzbereich durch die minimale Breite der Kammern begrenzt. Diese können sowohl vom bautechnischen Aufwand her als auch aus Gründen einer möglichst geringen Absorption nicht beliebig eng gebaut werden (siehe Abschnitt 4.5)).

Design – Möglichkeiten

In der Praxis wird für die untere Grenzfrequenz meist ein Wert von etwa 400 bis 450 Hz gewählt. Die theoretische obere Grenzfrequenz ergibt sich meist im Bereich von etwa 4000 Hz.

Ein wesentlicher Faktor beim Design ist auch die Wahl der Primzahl. Je nach Primzahl ergeben sich unterschiedliche Bautiefen. Als Standard gilt die Wahl von $N = 11$, da damit ein sehr guter Kompromiss von relativ geringer Einbautiefe und großer Bandbreite erreicht werden kann. Außerdem üblich sind die Primzahlen 7 (etwa 20 cm Tiefe für 450 Hz) oder 17, welche beide gute Eigenschaften im Bassbereich bewirken. Als Sonderform und daher sehr selten verwendet wird die Primzahl 23 als Designgrundlage, da sich eine vielstufige und komplizierte Form ergibt und dies meist nicht sinnvoll ist.

In vielen Fällen muss das Design eines akustischen Diffusors ohnehin an vorgegebene Einbautiefen angepasst werden und die jeweiligen Designparameter ergeben sich daraus. Doch wird in der Praxis trotzdem meist mit den Primzahlen 7 oder 11 und relativ flachen zweistufigen Strukturen gearbeitet.

Die Berechnung der notwendigen Stufentiefen- und breiten kann heute mit Hilfe jedes einfachen mathematischen Computerprogramms (z.B. MS Excel) schnell durchgeführt werden.

Der Aufbau erfolgt meist mit ca. 10 mm starken furnierten Sperrholzplatten oder auch mit Massivholzplatten aus zum Beispiel Buche oder Birke, welche auf eine Art Skelett montiert und verleimt werden. In diesem Skelett sind zur Versteifung der Konstruktion im Abstand von ca. 25 bis 30 cm Querstreben eingebaut, um ein Schwingen der Platten und damit ein unkontrollierbares akustisches Verhalten zu verhindern. Billigere Modelle können von einigen Herstellern auch aus Kunststoff und in unterschiedlichen Farben bezogen werden.

Die Abmessungen von klassischen QRDs mit Rahmen – zum Beispiel eines Numeric Wave Diffusors von VATTER (Abb. 38) - liegen meist bei Breiten von 50 bis 60 cm, bei Höhen von 100 bis 120 cm und bei Tiefen von 15 bis 27 cm. In der Ausführung aus Holz oder Sperrholz ergibt sich daraus pro Diffusorelement mit Rahmen ein Gewicht zwischen 15 und 20 kg.



Abb. 38: Numeric Wave Diffusor NWD 50/7/2
[VATTER, 2011]

Die Hauptkriterien bei der Herstellung von QRDs, die von VATTER als Numeric Wave Diffusoren bezeichnet werden, liegen in der exakten Verarbeitung. Die hundertprozentige Dichtheit muss durch exakte Passform der Einzelteile und präzises Verleimen gewährleistet sein, um zu verhindern, dass eventuell durch Spalten Luftvolumina hinter dem Diffusor akustisch angekoppelt werden und die Wirkung empfindlich stören. Hauptsächlich für die Optik entscheidend ist, dass die möglichst schmalen Trennstege zwischen den Vertiefungen gerade und parallel angeordnet sind, was vor allem bei Verwendung von Holz eine sorgfältige Arbeitsweise verlangt.

Im Allgemeinen werden die Schröder-Diffusoren fast ausschließlich mit eindimensionaler Streuwirkung gefertigt, da dies in den meisten Fällen ausreichend ist. In Kapitel 7) wird noch genauer darauf eingegangen, welche Möglichkeiten es gibt, eine Streuwirkung in zwei Dimensionen zu erzielen.

5.6) Weiterentwickelte und verbesserte Schröder-Diffusoren

In Kapitel 4) wurde auf einige Vernachlässigungen und Schwächen der klassischen Schröder-Diffusoren (QRD und PRD) eingegangen und erklärt, wie diese zu Stande kommen.

Mit Hilfe der computergestützten Berechnung und Entwicklung von akustischen Diffusoren ist es heute möglich, bei modernen Diffusoren auf diese Schwächen Rücksicht zu nehmen und sie durch verschiedene Weiterentwicklungen und Verbesserungen auszugleichen.

Die nächsten Abschnitte behandeln daher einige Ansätze, um wichtige Eigenschaften wie zum Beispiel das Frequenzverhalten oder die Absorption von Schröder-Diffusoren zu verbessern.

5.7) Schröder-Diffusoren mit facettierten Oberflächen (Fraktaldiffusoren)

Der Inhalt in diesem Abschnitt beruht, falls nicht anders angegeben, auf Informationen aus dem AES Convention Paper „Sound Diffusers Based on Number Theory with Random Variations of Surface Acoustic Impedance“ von Romuald Bolejko und Piotr Pruchnicki. [Bolejko et al., 1998]

Schröder-Diffusoren auf der Basis von quadratischen Residuenfolgen werden in der Fachliteratur auch teilweise als Fraktaldiffusoren bezeichnet, wobei allerdings ein kleiner Unterschied zu beachten ist. Wie schon in Abschnitt 3.4) beschrieben, bestehen Quadratic-Residue-Diffusoren aus Streifen (1D) oder Rechteckflächen (2D), deren unterschiedliche Höhen aus einer quadratischen Residuenfolge mit einer Primzahl N bestimmt werden. Die Oberflächen der einzelnen Abschnitte sind bei diesen Modellen glatt, allerdings wird bei Fraktaldiffusoren meist auf die Trennstege zwischen den Vertiefungen, die eine verbesserte Streuwirkung bei seitlich einfallendem Schall bewirken, verzichtet.

Wie schon in Kapitel 4) beschrieben, weisen die einfachen Formen des QRDs einige Nachteile auf. Spezielle Beachtung verdienen dabei die Probleme mit diskreten Frequenzen, die teilweise zu niedrigen oberen Grenzfrequenzen und die besonders im unteren Frequenzbereich manchmal problematische hohe absorbierende Wirkung.

Der Einsatz von Fraktaldiffusoren höherer Ordnung bietet nun Verbesserungen in einigen dieser Problembereiche.

Das zu Grunde liegende Prinzip ist einfach. Bei einem QRD zweiter Ordnung werden die glatten Oberflächen jedes einzelnen Segmentes durch eine maßstäblich verkleinerte Kopie der Diffusorstruktur erster Ordnung ersetzt. Ein QRD dritter Ordnung wird realisiert, indem die glatten Oberflächen durch eine Struktur zweiter Ordnung ersetzt werden und so weiter. Mit dieser Methode lassen sich somit theoretisch beliebig hohe Ordnungen erreichen. Praktisch ist auf Grund des erhöhten Fertigungsaufwands keine Herstellung mit einer Ordnung größer als drei sinnvoll.

Mit diesen Konstruktionen können bereits zwei Nachteile von Diffusoren mit klassischen Strukturen erster Ordnung behoben werden. Da die obere Grenzfrequenz von den Breiten der einzelnen Segmente abhängig ist, kann diese durch die wesentlich schmäleren Anordnungen bei Konstruktionen zweiter oder gar dritter Ordnung wesentlich erhöht werden, so dass sie je nach Feinheit der Struktur sogar bis in Bereiche außerhalb der hörbaren Frequenzen geschoben werden kann.

Auch das Problem der diskreten Frequenz (siehe Abschnitt 4.6)) wird in einen höheren Frequenzbereich verschoben, da sich die Produkte aus den quadratischen Residuenfolgen zu viel kleineren Wellenlängen verlagern.

Anhand von Abb. 39 lässt sich nun die Struktur der Oberfläche eines Fraktaldiffusors zweiter Ordnung basierend auf einer quadratischen Residuenfolge gut erkennen. Damit kann also die Streuwirkung zu hohen Frequenzen hin ausgedehnt und über den Frequenzbereich gleichmäßig gemacht werden.

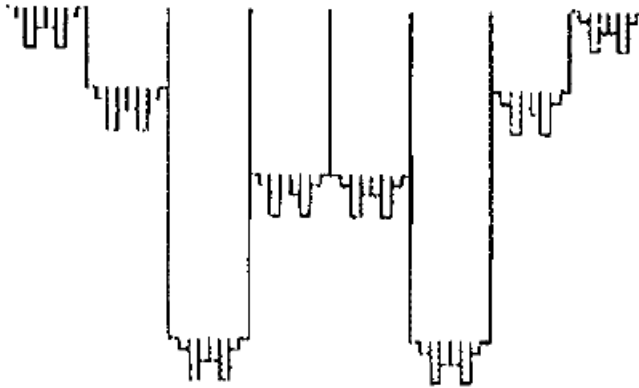


Abb. 39: Fraktaldiffusor zweiter Ordnung mit $N = 9$
[Bolejko et al., 1998]

Auffallend an der obigen Abbildung ist, dass zwischen den einzelnen Segmenten keine Trennstufe mehr vorhanden sind. Mit dieser Maßnahme wird zwar eine etwas geringere Streuwirkung für seitlich einfallenden Schall hingenommen, aber der Absorptionsgrad für tiefe Frequenzen (unterhalb der Designfrequenz) wird verbessert. Außerdem übernehmen die feinen Strukturen höherer Ordnung bis zu einem gewissen Grad auch eine Art Trennwirkung.

Eine weitere Möglichkeit, die an denselben Problempunkten von Schröder-Diffusoren erster Ordnung ansetzt und in der Wirkung den Fraktaldiffusoren sehr ähnlich ist, ist die Verwendung von facettierten Halbzylindern anstatt von glatten Segmentoberflächen. Dabei werden wiederum die Segmentoberflächen zum Beispiel eines QRDs erster Ordnung durch angenäherte Halbzylinder ersetzt.

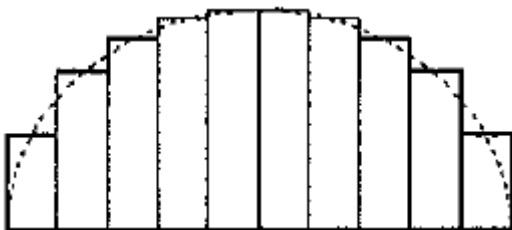


Abb. 40: Facettierter Halbzylinder
[Bolejko et al., 1998]

Wie in Abb. 40 erkennbar, wird hierbei die Oberfläche eines Halbzylinders durch feine Stufen angenähert.

Während der Verlauf des Streumaßes (Diffusion in dB) beim Schröder-Diffusor relativ flach ist, zeigt das facettierte Halbzyylindermodell ein stark unterschiedliches Verhalten über den Frequenzbereich. Besonders bei tiefen Frequenzen ist die Schallstreuung sehr gut, zu hohen Frequenzen hin jedoch schlechter als beim Schröder-Diffusor (vgl. Abb. 41 und Abb. 42). Die Absorption im tiefen Frequenzbereich ist bei Fraktaldiffusoren gegenüber vergleichbaren QRDs deutlich niedriger.

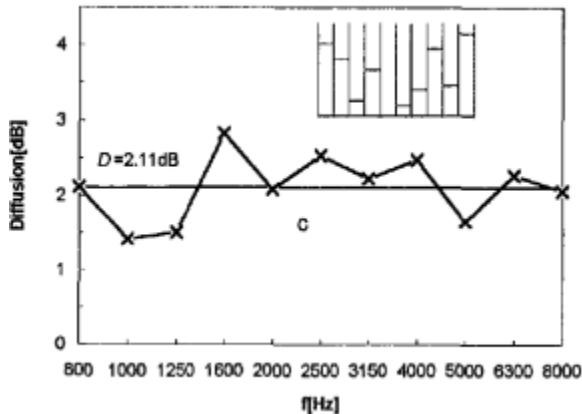


Abb. 41: Diffusion eines Schröder-PRD
[Boljeko et al., 1998]

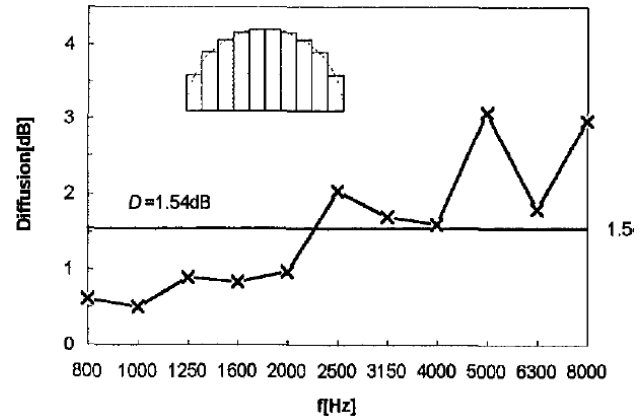


Abb. 42: Diffusion eines facettierten Halbzyinders
[Boljeko et al., 1998]

Die Anwendung von Diffusoren mit facettierten Oberflächen beschränkt sich zurzeit noch auf einen sehr kleinen Bereich. Zwar ist eine computergestützte Planung dieser Strukturen nicht wesentlich aufwändiger, allerdings ist die Produktion ungleich komplizierter und umfangreicher und daher auch um ein Vielfaches teurer als zum Beispiel für QRDs erster Ordnung.

5.8) Schröder-Diffusoren mit geschwungenen Oberflächen (Curved Diffusoren oder Wave Diffusoren)

Der Inhalt dieses Abschnitts bezieht sich, wenn nicht anders angegeben, auf Informationen von VATTER Acoustic Technologies in Gleisdorf und Geschäftsführer Klaus Höfer zum Modell des Parabolic Wave Diffusors (PWD). [VATTER, 2011]

Eine weitere Designmöglichkeit basierend auf Schröder-Diffusoren sind die sogenannten geschwungenen Diffusoren oder auch Curved oder Wave Diffusoren, die mittlerweile auch in der Praxis schon eine häufige Anwendung finden.

Im Prinzip bauen Diffusoren dieser Art – wie zum Beispiel der Parabolic Wave Diffusor – auf der Oberflächenstruktur eines einfachen QRDs auf. Wiederum wird als Grundlage eine Berechnung eines QRDs mit einer unteren Grenzfrequenz von meist 400 oder 450 Hz und einer theoretischen oberen Grenzfrequenz von 4 kHz herangezogen. Die gängigen

Primzahlen für die quadratische Residuenfolge sind wiederum 11, 7 oder seltener 17 oder 23.

Die sich ergebende Struktur hätte dann die schon bekannte Stufenform. Hierbei werden aber keine Trennstege eingesetzt und die einzelnen Stufenhöhen interpoliert, sodass sich parabelförmige Oberflächen wie in Abb. 43 ergeben.



Abb. 43: Parabolic Wave Diffusor (PWD) Nahansicht
[VATTER, 2011]

Damit wird wiederum das Problem von diskreten Frequenzen stark verringert und die obere Grenzfrequenz ist nur mehr theoretisch vorhanden, da sich durch das Interpolieren der QRD-Struktur quasi unendlich schmale Stufen ergeben. Die Streuwirkung eines solchen Diffusors ist über den gesamten Frequenzbereich gleichmäßiger. Der theoretisch etwas geringere Streugrad im Vergleich mit einem einfachen QRD stellt sich in der Praxis als nicht relevant heraus.

Folgende Diagramme stellen die Streugrade eines klassischen Quadratic-Residue-Diffusors (Abb. 44), hier als Numeric Wave Diffusor bezeichnet, und eines Parabolic Wave Diffusors mit geschwungener Oberfläche (Abb. 45) gegenüber. Die verglichenen Modelle weisen natürlich dieselben Designfrequenzen, sowie dieselbe zu Grunde liegende Residuenfolge und dieselben Abmessungen auf.

Die Messung erfolgt für jeweils vergleichbare Modelle, wobei der Streugrad beim jeweils ersten Modell (60/11/1) für Winkel von 0° bzw. 30° aus Normalen und beim zweiten Modell (60/11/2) nur für einen Winkel von 30° ermittelt wurde.

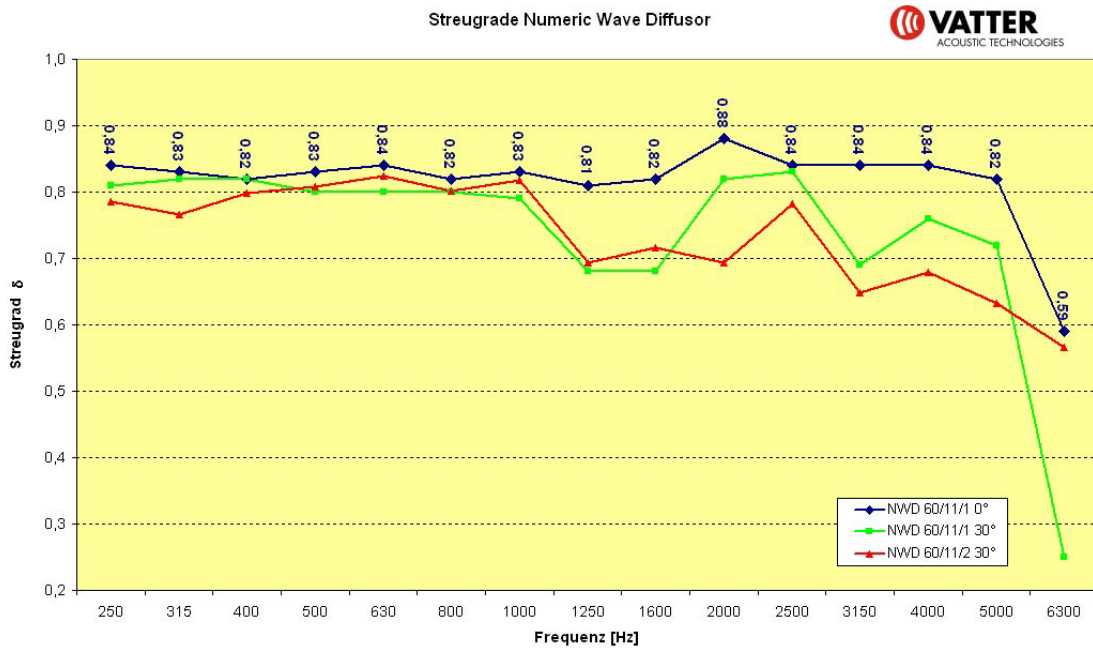


Abb. 44: Streugrad von Numeric Wave Diffusoren (NWD)
[VATTER, 2011]

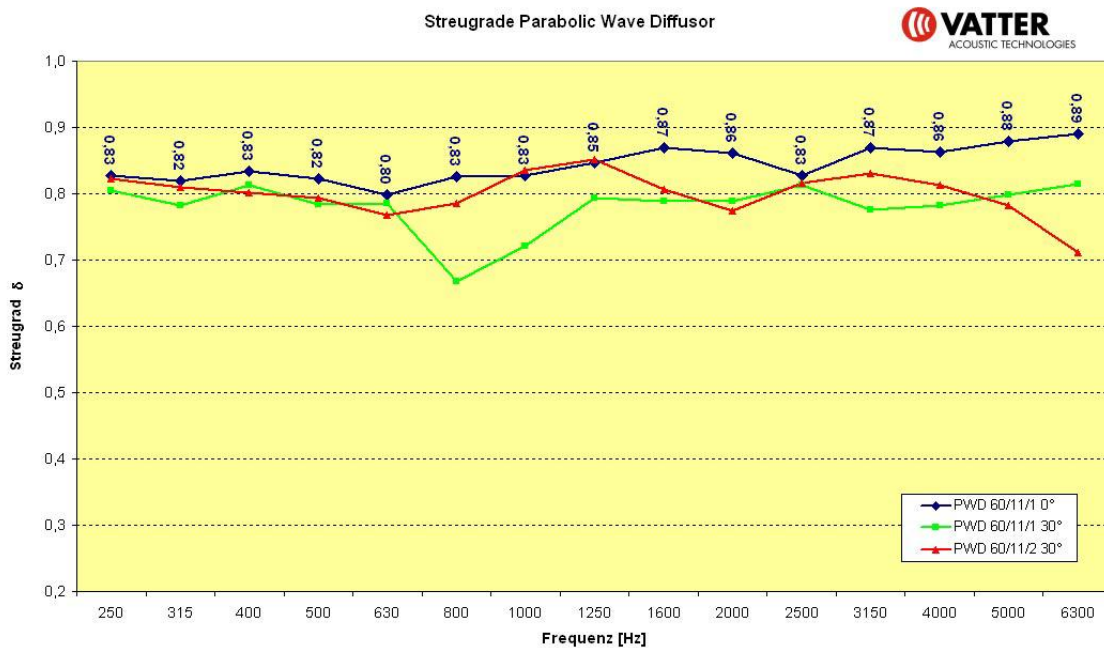


Abb. 45: Streugrad von Parabolic Wave Diffusoren (PWD)
[VATTER, 2011]

Aus dem Vergleich der beiden Diagramme ist zu erkennen, dass der Verlauf des Streugrades über den Frequenzbereich bei den Parabolic Wave Diffusoren deutlich gleichmäßiger ist als bei den vergleichbaren Numeric Wave Diffusoren. Während die Streuwirkung des NWD zu hohen Frequenzen stark abnimmt, sind hier die Werte beim PWD annähernd gleich bzw. teilweise sogar größer als im unteren und mittleren Frequenzbereich. Vor allem im Bereich

oberhalb der theoretischen oberen Grenzfrequenz von 4000 Hz ergeben sich signifikante Unterschiede. Außerdem fällt auf, dass sich der theoretisch etwas niedrigere Streugrad des PWD gegenüber dem NWD in der Praxis nicht feststellen lässt.

Der Einbruch im Kurvenverlauf bei der Messung unter einem Winkel von 30° beim PWD (grüne Kurve) ist auch bei wiederholten Messungen reproduzierbar und ergibt sich aus der Geometrie des Diffusors, ist aber in der Praxis auch bei genauem Hinhören nicht wahrnehmbar.

Ein weiterer wichtiger Kennwert akustischer Diffusoren ist die Absorption, die ja meist nicht erwünscht ist und daher so gering wie möglich sein soll. In den folgenden beiden Diagrammen werden die Absorptionsgrade von jeweils zwei NWDs (Abb. 46) und vergleichbaren PWDs (Abb. 47) gegenübergestellt.

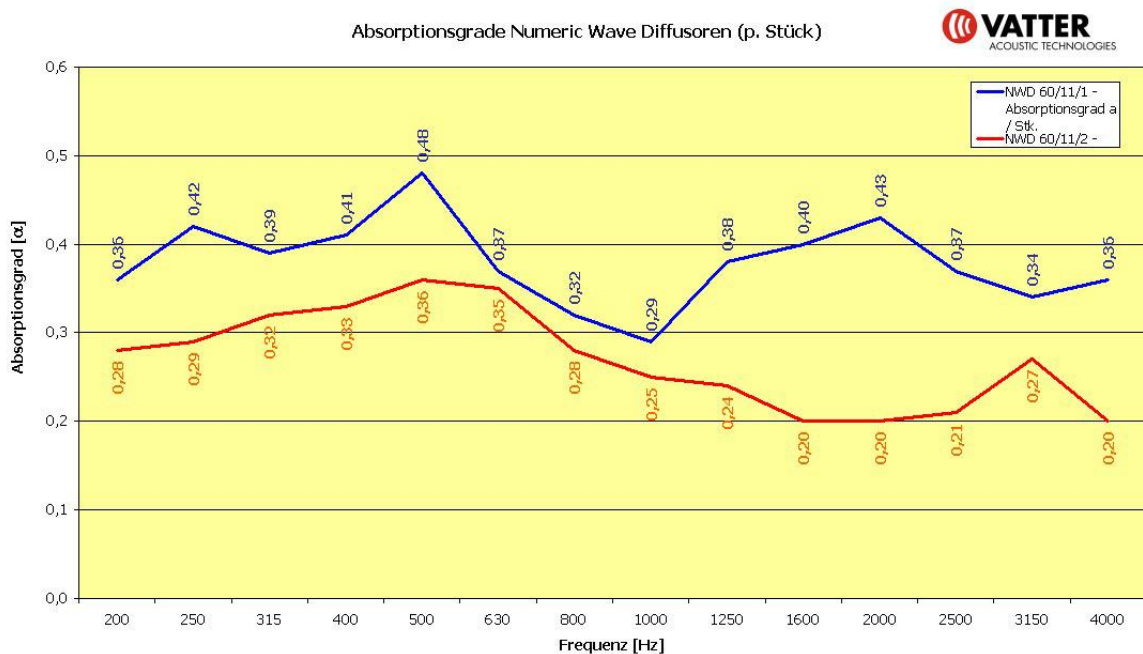


Abb. 46: Absorptionsgrad von Numeric Wave Diffusoren (NWD)
[VATTER, 2011]

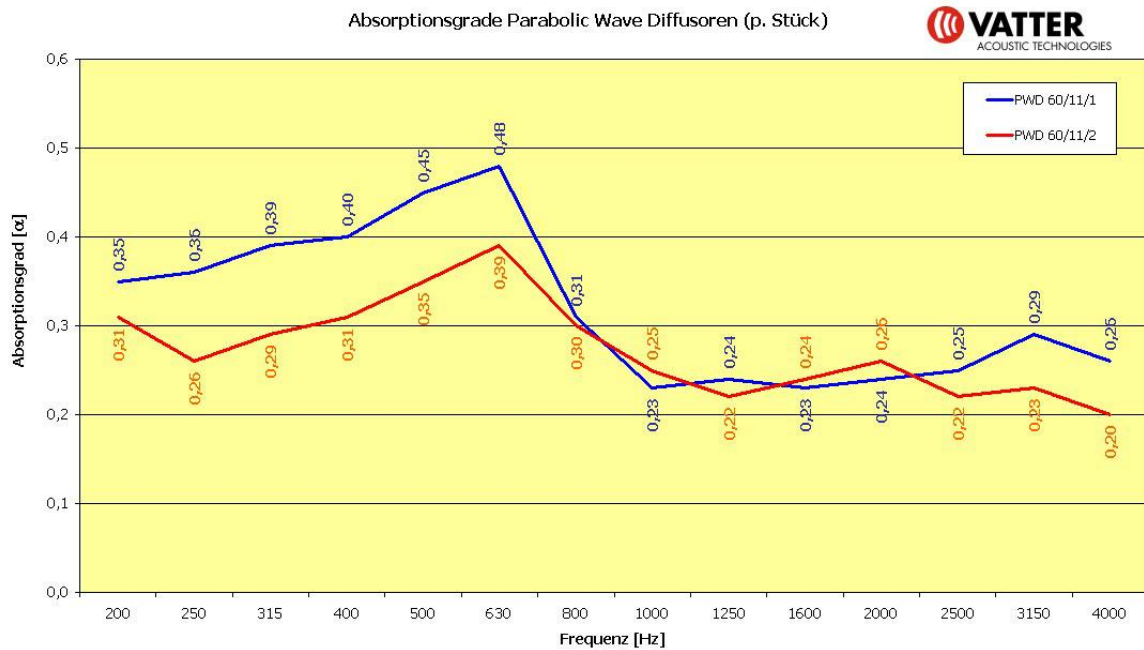


Abb. 47: Absorptionsgrad von Parabolic Wave Diffusoren (PWD)
[VATTER, 2011]

Wie aus den beiden Diagrammen ersichtlich, ist die Absorption im tief- bis mittelfrequenten Bereich bis etwa 600 Hz sowohl beim NWD als auch beim PWD ungefähr gleich und relativ hoch, was aber in der Praxis kein Problem darstellt, da in diesen Frequenzbereich ohnehin meist viel Energie enthalten ist. Oberhalb von etwa 800 Hz wird ein deutlicher Unterschied zwischen den verschiedenen Typen erkennbar. Während die Kurve des PWD sich konstant bei niedrigen Werten zwischen 0,2 und 0,3 einstellt, werden mit dem NWD auch noch Werte über 0,4 erreicht. Das heißt, dass die geschwungene Oberfläche auch bezüglich des Absorptionsgrades gewisse Vorteile gegenüber der klassischen Kammerform eines Schröder-Diffusors aufweist.

Der Aufwand bei der Herstellung eines akustischen Diffusors mit geschwungener Oberfläche ist verglichen mit jenem für die Herstellung eines einfachen Schröder-Diffusors etwas niedriger. Den Unterbau bildet wiederum eine Art Skelett aus Holz, das durch Querverstrebungen versteift wird. Die Verkleidung erfolgt mit leichten und biegsamen MDF - Platten (mitteldichte Faserplatten), welche dann aus optischen Gründen mit diversen Hölzern furniert werden können. Teilweise werden auch andere Werkstoffe wie Kunststoff oder Metall von Kunden gewünscht und verwendet, jedoch hat sich gezeigt, dass das Eigenschwingverhalten von Holz am besten ist und auch die Vorteile in der Verarbeitung gegenüber anderen Materialien überwiegen. Geachtet werden muss beim Aufbau mit Holz wiederum auf exakte Verarbeitung und geringe Toleranzen, um das Entstehen von Spalten zu vermeiden.

Die Parabolic Wave Diffusoren sind beispielsweise als einzelne Halbschalen (Abb. 49) mit unterschiedlichen Breiten und Höhen erhältlich, welche einfach in gewünschter Stückzahl an

Wänden oder Decke angebracht werden können, aber auch als komplette Diffusorelemente in einem Rahmen (Abb. 48). Diese Modelle werden von VATTER beispielsweise mit Abmessungen von 60 x 120 x 16,2 cm (B x H x T) und einem Gewicht von 24 kg oder mit 60 x 120 x 31,5 cm (B x H x T) und einem Gewicht von 29,5 kg und in Ausführungen mit verschiedenen Holzoberflächen wie Buche oder Birke angeboten.

In der Praxis werden ausschließlich Strukturen mit eindimensionaler Streuwirkung eingesetzt, da dies für die gängigen Anwendungen meist ausreicht und einen wesentlich geringeren Herstellungsaufwand verursacht als das bei 2D – Diffusoren der Fall wäre.



Abb. 48: Parabolic Wave Diffusor mit Rahmen
[VATTER, 2011]

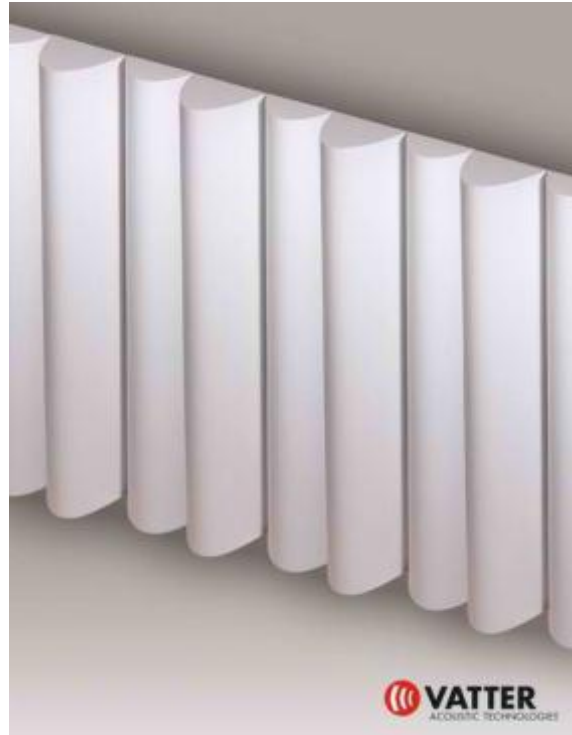


Abb. 49: Parabolic Wave Diffusor Halbschalen
[VATTER, 2011]

Die beiden Modelle werden meist basierend auf den Primzahlen 11 oder 7 designt und haben wie besonders bei den einzelnen Halbschalen erkennbar ist eine zweistufige Bautiefe. Auch die Form im Rahmen ist so konstruiert, dass sich durch Nebeneinanderplatzieren von mehreren gleichen Elementen die Struktur gleichmäßig fortsetzen lässt.

Neben den akustischen Aspekten hat die geschwungene Oberfläche gegenüber einer Stufenanordnung oder gar Kammern auch praktische Vorteile. Die Gesamtoberfläche ist geringer und glatt und verschmutzt daher weniger stark und ist auch bedeutend einfacher zu reinigen, was in Praxis oft ein wichtiges Argument ist.

5.9) Akustische Diffusoren mit komplizierten Oberflächen

Der Inhalt dieses Abschnitts beruht auf dem Paper „Acoustic Diffusers: The Good, the Bad and the Ugly“ von Trevor J. Cox. [Cox (2)]

Mit Hilfe von Computerberechnungen ist es möglich, auch fast beliebig komplizierte Oberflächen für akustische Diffusoren zu entwerfen, die in alle Raumrichtung die gleichen guten Streueigenschaften aufweisen. Als Beispiel sei hier der Entwurf einer geschwungenen Oberflächenstruktur mit zweidimensionaler Streuwirkung genannt, die aus der Multiplikation von zwei quadratischen Residuenfolgen mit den Primzahlen $N_1 = 5$ bzw. $N_2 = 7$ entsteht. Die daraus entstandene Struktur aus rechteckigen Vertiefungen wird dabei interpoliert und es entsteht eine zweidimensional geschwungene Oberfläche, wie aus Abb. 50 ersichtlich ist.

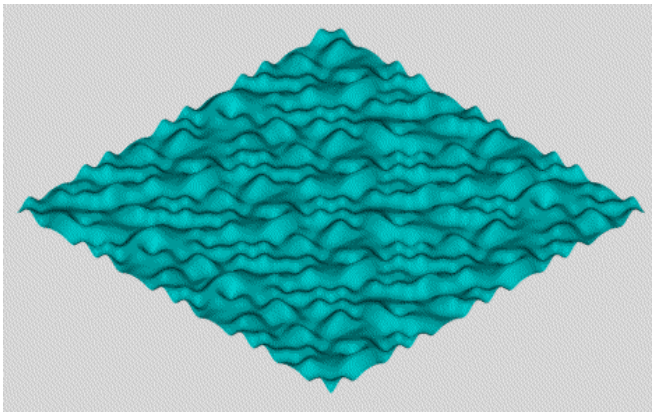


Abb. 50: Entwurf einer zweidimensional geschwungenen Oberfläche
[Cox (2)]

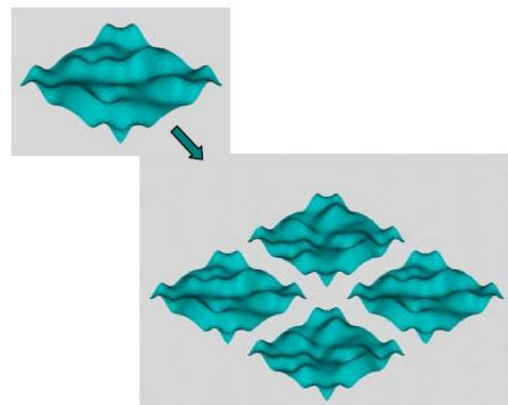


Abb. 51: Aufbau einer zweidimensional geschwungenen Oberfläche
[Cox (2)]

Die großflächige Struktur in der linken Abbildung entsteht mittels Aneinanderreihen von zum Beispiel vier kleineren identen Elementen, wie in der rechten Abbildung (Abb. 51) erkennbar ist. Dabei ist die Wirkung umso besser, je größer die einzelnen Elemente sind, da somit auch die Strukturperiode vergrößert wird.

Oberflächen dieser Art bieten zwar in der Simulation äußerst gute Eigenschaften, werden aber wegen des extrem hohen Aufwands zur Herstellung und des daraus resultierenden hohen Preises praktisch nicht eingesetzt und liegen nur als Prototypen vor.

5.10) Akustische Diffusoren nach architektonischen Aspekten

In manchen Fällen werden von der raumakustischen Planung spezielle Lösungen gefordert. Dies ist besonders dann der Fall, wenn zu einem bestehenden architektonischen Konzept die Raumakustik gestaltet werden soll.

Vor allem das Design von akustischen Diffusoren mit geometrischen Strukturen kann sehr vielfältig ausfallen. Ausgehend von einfachen Strukturen wie sie zum Beispiel in Abschnitt 3.1) vorgestellt wurden, können sehr individuelle Formen entworfen werden.

Dabei steht oftmals das Design und das Einfügen ins Konzept des Architekten im Vordergrund und es werden eventuell schlechtere akustische Eigenschaften in Kauf genommen.

Die so entstehenden akustischen Diffusoren können so unübliche Formen haben, dass sie teilweise gar nicht mehr als solche erkannt werden, was aber auch so erwünscht sein kann.

Die folgenden Abbildungen (Abb. 52 bis Abb. 57) zeigen diverse Bauformen von akustischen Diffusoren in verschiedensten Ausführungen. Allen gemeinsam ist der Aufbau mit einem möglichst schallharten Material, um den Großteil der eintreffenden Schallenergie wieder zu reflektieren. Am häufigsten finden verschiedene Hölzer, Pressspanplatten, Kunststoffe und Metalle Anwendung.



Abb. 52: Sonic Diffusor Aluminium
[www.luxurylaunches.com, 2011]



Abb. 53: Sonic Diffusor Holz
[www.luxurylaunches.com, 2011]



Abb. 54: Pyramidendiffusor Bambus
[forum.audiophil.ro, 2011]



Abb. 55: Polywood Diffusor
[www.studiosolutions.ie, 2011]



Abb. 56: Randomizing Diffusor Kunststoff
[www.acousticinnovations.com, 2011]



Abb. 57: Design Diffusor
[recordingstudiolondon.co.uk, 2011]

5.11) Weitere Typen akustischer Diffusoren

Die bisher in Kapitel 5) vorgestellten Arten von akustischen Diffusoren stellen den größten Teil der in der Praxis eingesetzten Produkte dar. Je nach Anwendung kann die Bauform, Qualität oder auch der Preis für die Wahl des richtigen Diffusors den Ausschlag geben. Jedes dieser Produkte bietet Vorteile und Nachteile und hat Stärken und Schwächen, aber der praktisch relevante Anwendungsbereich lässt sich mit diesen Modellen sehr gut abdecken.

Natürlich gibt es in manchen Fällen ganz spezielle Anwendung, die auch nach individuellen Lösungen verlangen. Daher gibt es auch noch unzählige andere Typen von akustischen Diffusoren. Einige davon sind den bisher genannten ähnlich, andere wiederum weisen sehr große Unterschiede auf.

Viele dieser Produkte liegen auch nur als Prototyp vor oder sind im Handel nicht erhältlich. Beispiele dafür sind die sogenannten „Lücke and Power Residue Sequence Diffusoren“ oder verschiedene volumetrische Diffusoren. Auf eine Beschreibung dieser Diffusoren wird hier verzichtet und auf die einschlägige Fachliteratur und verschiedene Papers verwiesen.

6) Messung und Simulation

Wie in vielen anderen Bereichen der Technik kommt es auch in der raumakustischen Planung und daher auch bei den akustischen Diffusoren meist zu Unterschieden zwischen Theorie und Praxis. Obwohl die Methoden zur Planung und Berechnung mittlerweile sehr ausgereift sind und viele Parameter berücksichtigt werden können, verhalten sich die Endprodukte meist nicht genau wie vorhergesagt.

Hier muss somit auf Messungen an fertigen Produkten oder Prototypen zurückgegriffen werden, um diese Unterschiede zu erkennen und die Planungsvorgänge dementsprechend adaptieren zu können.

Auch zur Angabe von diversen Kenngrößen akustischer Bauelemente zum Beispiel in Datenblättern müssen diese Werte messtechnisch ermittelt werden. Bei hochqualitativen und daher meist auch hochpreisigen Produkten werden die Daten teilweise sogar für jedes einzelne Element separat gemessen und angegeben und nicht zum Beispiel für eine ganze Serie. Diese Messungen geschehen dabei fast ausschließlich in Messräumen und unter ganz genau reproduzierbaren Messbedingungen.

Die Messung unter praktischen Bedingungen hat ebenfalls große Bedeutung, da die akustischen Diffusoren meist ja nur ein Teil eines raumakustischen Konzepts sind und mit dem Raum und anderen akustischen Bauteilen zusammenwirken. Daher werden oft Räume in diversen Ausbaustadien vermessen, um so die Auswirkungen auf die Raumakustik ermitteln zu können.

Durch die Entwicklung von leistungsstarken Computersystemen und dementsprechender Software wird heute praktisch keine raumakustische Planung ohne verschiedene Simulationen durchgeführt. Unzählige Programme bieten eine Fülle an Möglichkeiten zur Simulation verschiedenster Formen, Materialien und Messumgebungen. Aufwand und Kosten für Messungen lassen sich somit verringern und schon in der Planungsphase können mit Simulationen die akustischen Eigenschaften besser abgeschätzt werden.

In den nächsten Abschnitten werden verschiedene Möglichkeiten zur Messung und Simulation vorgestellt und es wird ein Überblick über den Aufwand, die wichtigsten physikalischen Messgrößen und die unterschiedlichen Darstellungsformen gegeben.

6.1) Wichtige physikalische Größen und Kennwerte

Die wesentlichen Größen zur Beschreibung der Eigenschaften akustischer Diffusoren lassen sich im Allgemeinen alle recht einfach ermitteln, da sowohl bei der Messung mit Messmikrofonen als auch bei der Simulation fast ausschließlich mit dem Schalldruck bzw. Schalldruckverteilungen- und unterschieden gearbeitet wird.

Der Schalldruck wird in der Fachliteratur mit dem Buchstaben p (pressure) abgekürzt und ist eine skalare Größe. Die Angabe des Schalldrucks erfolgt praktisch immer logarithmisch bezogen auf den Bezugsschalldruck p_0 und wird als Schalldruckpegel L in Dezibel (dB) bezeichnet. [Graber, RA 2009, S. 5]

Definition von physikalischen Größen und deren Einheiten nach [Graber, RA 2009, S. 5]:

Definition des Schalldrucks p :
$$p = \frac{F}{A} \quad \left[\frac{N}{m^2} = Pa \right] \quad (\text{Gl. 6.1})$$

Bezugsschalldruck p_0 :
$$p_0 = 20 \mu Pa \quad (\text{Gl. 6.2})$$

Schalldruckpegel L :
$$L = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (\text{Gl. 6.3})$$

Aus Messungen des Schalldrucks leiten sich nun die verschiedenen Kennwerte ab, wobei hier die wichtigsten kurz zusammengefasst sind.

6.1.1) Streugrad

Die wichtigste Kenngröße eines akustischen Diffusors ist der schon in Abschnitt 2.2) erwähnte Streugrad. Er berechnet sich aus dem Verhältnis von gestreuter Energie zu gesamter Energie, wobei alle Reflexionen mit einer Winkelabweichung von $\pm 10^\circ$ und mehr aus der Richtung einer geometrischen Reflexion als gestreute Energie bezeichnet werden.

Der Streugrad kann einen Wertebereich von 0 bis 1 annehmen, wobei 0 auf rein geometrische Reflexionen hinweist. Wünschenswert ist ein Streugrad möglichst nahe an 1. Die Angabe des Streugrades kann für verschiedene Winkel separat erfolgen oder gemittelt über die gesamte Oberfläche. Die Auswertung erfolgt je nach Hersteller durch Messungen über einen unterschiedlich großen Frequenzbereich bei einer bestimmten Anzahl von diskreten Frequenzen.

6.1.2) Absorptionsgrad

Das Hauptaugenmerk beim Design von akustischen Diffusoren liegt darauf, einen Großteil der einfallenden Schallenergie diffus zu reflektieren. Daher ist die ideale Oberfläche eines Diffusors schallhart, so dass die gesamte einfallende Schallenergie reflektiert wird und es also keine Absorption am Diffusor gibt.

In der Praxis absorbiert jedoch jeder akustische Diffusor zumindest einen kleinen Teil der einfallenden Schallenergie. Die Größe dieses Absorptionsgrades hängt stark von der Bauform des Diffusors und vom betrachteten Frequenzbereich ab. In der Fachliteratur wird der Absorptionsgrad üblicherweise mit α abgekürzt.

Nach [Graber, RA 2009, S. 26 ff.] erfolgt die Berechnung des Schallabsorptionsgrades α mit Hilfe des Reflexionsfaktors r , der messtechnisch einfach erfasst werden kann.

$$\text{Schallabsorptionsgrad } \alpha: \quad \alpha = 1 - |r^2| \quad (\text{Gl. 6.4})$$

$$\text{Dabei ist } r \text{ der Reflexionsfaktor:} \quad r = \frac{p_r}{p_h} \quad (\text{Gl. 6.5})$$

p_r ist der Schalldruck des reflektierten Schalls und p_h der Schalldruck des einfallenden Schalls. Die Größen werden meist durch Messung ermittelt.

$|r^2|$ wird in der Literatur meist als Reflexionsgrad R bezeichnet und die Berechnung des Schallabsorptionsgrades daher auch wie folgt angegeben. $\alpha = 1 - R$ (Gl. 6.6)

6.1.3) Diffusitätsgrad

Der ebenfalls schon in Abschnitt 2.2) erwähnte Diffusitätsgrad kennzeichnet die Diffusität eines Schallfelds im Raum und wird daher nicht als Kennzahl zur Beschreibung eines Diffusors sondern zur Charakterisierung der Raumakustik verwendet. Der Wertebereich beträgt ebenfalls 0 bis 1, wobei 1 ein perfekt diffuses Schallfeld kennzeichnen würde, was in der Praxis nicht realisierbar ist.

6.2) Messung im Messraum

Die Messung an akustischen Bauelementen in einem dafür vorgesehenen Messraum bringt einige Vorteile mit sich. Die akustischen Eigenschaften der Messumgebung sind genau bekannt und können daher in der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Außerdem ist die Beeinflussung der Messung in einem Messraum so gering wie nur möglich. Ein weiterer Vorteil ist die meist gute akustische Dämmung von Messräumen, so dass auch keine Schallereignisse von außerhalb des Raumes die Messung stören.

Auf Grund dieser Bedingungen ist es möglich, dass Messungen in einem Messraum beliebig oft unter exakt den gleichen Voraussetzungen wiederholt werden können, was in anderen Messumgebungen quasi unmöglich ist.

Im Folgenden wird eine Methode zur messtechnischen Ermittlung der Eigenschaften eines akustischen Diffusors in einem Messraum nach [Bolejko et al., 1998] beschrieben.

Der Aufbau der Messanordnung erfolgt in einem sogenannten Freifeldraum mit sehr stark absorbierenden Grenzflächen, damit keine Reflexionen von den umliegenden Begrenzungsflächen das Messergebnis stören. Die Anordnung besteht aus dem zu vermessenden akustischen Diffusor, einem geeichten Lautsprecher (meist Kugelquelle) mit bekannter Leistung und einem oder mehreren Messmikrofonen.

Der Lautsprecher wird im Abstand von zwei Metern zur Oberfläche des Diffusors positioniert und in der üblichsten Konfiguration im Winkel von 0° , das heißt senkrecht zur Oberfläche.

Das Messmikrofon wird im Abstand von einem Meter zur Oberfläche des Diffusors angebracht. Für die verschiedenen Messpunkte wird entweder das Mikrofon immer wieder an verschiedenen Winkeln auf einem Halbkreis mit konstantem Radius platziert, oder es werden gleich mehrere Messmikrofone an den jeweiligen Messpunkten eingesetzt und es ist theoretisch nur eine Messung erforderlich.

Die beschriebene Anordnung ist nur für einen akustischen Diffusor mit eindimensionaler Streuwirkung ausreichend. Sollen die Eigenschaften in zwei Dimensionen ermittelt werden, liegen die Mikrofonpositionen dementsprechend auf einer Halbkugeloberfläche mit konstantem Radius.

Um die Fehler der Messung möglichst gering zu halten, müssen je nach gewünschter Genauigkeit entsprechend viele Wiederholungen durchgeführt werden, aus denen sich die Messwerte durch Mittelung ergeben. Der Einfluss der verwendeten Geräte ist bekannt und kann aus den Messergebnissen somit eliminiert werden.

Eine Erweiterung zum oben beschriebenen Messvorgang ist die Ermittlung der akustischen Eigenschaften für seitlich einfallenden Schall. Dabei wird der Lautsprecher ähnlich wie die Messmikrofone auf einem Halbkreis (1D) oder einer Halbkugel (2D) mit konstantem Radius bei verschiedenen Winkeln positioniert.

Um das Verhalten des Diffusors über den relevanten Frequenzbereich zu ermitteln, wären theoretisch sehr viele Messungen notwendig. Zur Minimierung des Aufwands werden die Messwerte bei diskreten Frequenzen ermittelt und dazwischen wird interpoliert. Dazu werden vom Lautsprecher beispielsweise beginnend bei 400 Hz und bis 8 kHz jeweils in bestimmten Frequenzabständen (z.B. Terzen, Oktaven) Sinussignale abgestrahlt. Damit lässt sich das Verhalten über einen großen Frequenzbereich schon gut nachvollziehen.

Bei einer exakteren Messung mit feineren Frequenzabständen können aber auch Probleme mit diskreten Frequenzen oder etwaige Anomalien erkannt werden, die sonst durch die Interpolation zwischen den grob verteilten Messpunkten unentdeckt bleiben. Die Kosten der Messung steigen natürlich mit der Anzahl der Messpunkte.

Zur Auswertung werden heute fast ausschließlich Computer verwendet. Die an den Messmikrofonen gemessenen Schalldruckpegel werden von einer Software aufgezeichnet und ausgewertet und die gewünschten Messwerte automatisiert berechnet. Dadurch kann die Zeit für Messung deutlich reduziert werden.

Eine andere Messanordnung zur Bestimmung des Abstrahlverhaltens von akustischen Diffusoren in einem reflexionsarmen Messraum beschreibt Uwe Kempe. [*Kempe et al.*]

Die Schallquelle ist dabei ein Breitbandlautsprecher mit einer nutzbaren Frequenzbandbreite von 400 Hz bis 10 kHz. Die Positionierung erfolgt auf einem horizontalen Radius von 3,85 m auf drei Positionen mit den Winkel 0° , $+30^\circ$ und -30° . Das Messmikrofon wird auf einem horizontalen Radius von 2,4 m in Winkelschritten von 5° über den gesamten Winkelbereich

(-90° bis $+90^\circ$) bewegt. Die Messung wird für jede der drei Lautsprecherpositionen durchgeführt. Die Abb. 58 zeigt eine Skizze des Messaufbaus.

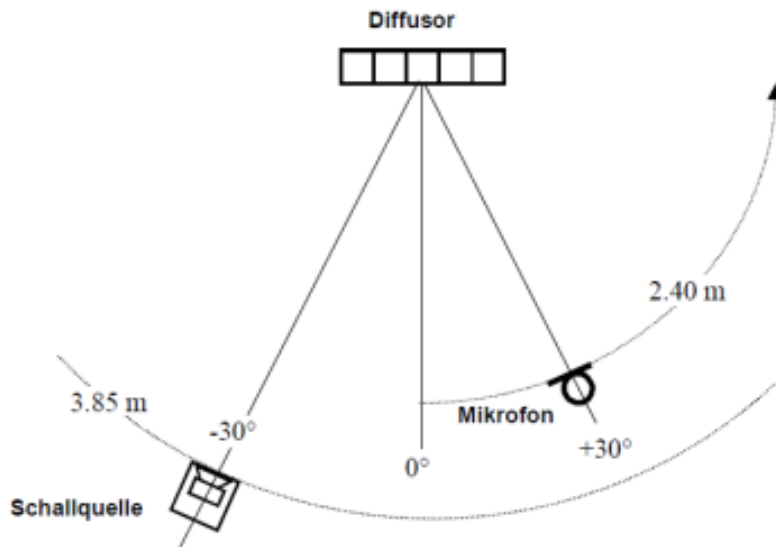


Abb. 58: Messaufbau zur Bestimmung des Abstrahlverhaltens
[Kempe et al.]

Die Auswertung erfolgt bei dieser Messung anders, da der Diffusor nicht mit diskreten Frequenzen beschallt wird, sondern mit einem breitbandigen Signal. Der Nutzbereich der Messergebnisse wird durch eine entsprechende zeitliche Fensterung an die Bandbreite der Schallquelle angeglichen. Die Fouriertransformierten der unter verschiedenen Winkeln ermittelten Impulsantworten ergeben die gewünschten Messwerte und können zum Beispiel in einem Diagramm wie in Abb. 1 dargestellt werden.

Der Vorteil dieser Messmethode ist eine wesentlich kürzere Messdauer. Allerdings sind die Ansprüche an die verwendeten Messgeräte höher. Der Lautsprecher muss einen großen Frequenzbereich abstrahlen können und die Auswertung ist durch die Fouriertransformation etwas aufwändiger, was aber bei modernen Rechnersystemen kein Problem darstellt.

Die vorgestellte Messmethode nach Kempe ist ebenfalls nur eine Messung für 1D-Diffusoren. Für eine 2D-Messung müssten wiederum sowohl Lautsprecher als auch Messmikrofon auf Halbkugelflächen bewegt werden.

In der Praxis werden für die Messungen an akustischen Diffusoren verschiedenste Messanordnungen mit unterschiedlicher Genauigkeit gewählt. Die gewonnenen Messergebnisse werden dabei von der jeweiligen Messanordnung nicht unwesentlich beeinflusst. Zum Beispiel steigt verständlicherweise die Diffusität des Schallfeldes mit dem Abstand zum Diffusor. Daher sind die etwa für den Streugrad in verschiedenen Datenblättern angegebenen Werte nicht immer gut vergleichbar, da selten eine Angabe der Messanordnung erfolgt.

6.3) Messung unter praktischen Bedingungen

In der Praxis auch oft angewandt wird die Messung an akustischen Diffusoren unter praktischen Bedingungen. Die Messung findet dabei in dem Raum statt, für den der jeweilige akustische Diffusor geplant ist.

Die verwendeten Messanordnungen müssen dabei an die vorliegende Raumsituation und an die zu vermessenden Objekte angepasst werden. So kann beispielsweise ein einzelner Diffusor in einer schallharten Wand vermessen werden, aber auch die Wirkung einer ganzen akustisch designten Wand- oder Deckenfläche. Ebenso können an verschiedenen Punkten im ganzen Raum diverse raumakustische Gütemaße ermittelt werden sowie deren Beeinflussung durch den Einsatz einer bestimmten Anzahl oder durch unterschiedliche Positionierungen von akustischen Diffusoren.

Daher ergeben sich quasi unendlich viele verschiedene Messanordnungen mit unterschiedlichsten Anzahlen und Positionen für Lautsprecher und Mikrofone, Frequenzbereichen und Genauigkeiten. Auch die Auswertungen der Messungen können auf verschiedene Weise erfolgen und sind auf die vorliegende Messsituation abgestimmt.

Die Messung unter praktischen Bedingungen hat deshalb eine hohe Relevanz, weil damit das gesamte raumakustische Konzept untersucht werden kann. Dabei ist es nicht immer entscheidend, dass ein einzelnes Element für sich alleine optimal funktioniert, sondern dass alle raumakustischen Maßnahmen in Summe das gewünschte Ergebnis liefern.

6.4) Computergestützte Simulation

Der Einsatz computergestützter Simulation bringt in der raumakustischen Planungspraxis große Vorteile mit sich.

Eine Vielzahl von Simulationsprogrammen bietet die Möglichkeit, akustische Eigenschaften entworfenen Konfigurationen schon während der Planung zu untersuchen. Dadurch werden Kosten und Aufwand zum Bau von Prototypen zur Messung reduziert und die Simulationsergebnisse können bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden und so zu Verbesserungen beitragen.

Durch die Eingabe von Materialparametern und Maßangaben sowie durch die Wahl von verschiedenen Frequenzbereichen und Messumgebungen ist schon mit einem vergleichsweise geringen Aufwand die Simulation der unterschiedlichsten Situationen möglich. Die erhaltenen Ergebnisse können bei sorgfältiger Arbeit sehr nahe an den Ergebnissen liegen, die durch eine Messung ermittelt werden.

Moderne akustische Simulationsprogramme ermöglichen die Ermittlung sämtlicher relevanter Kennwerte und raumakustischer Gütemaße in der Simulation. Außerdem bieten fast alle Simulationsprogramme die Möglichkeit einer grafischen Darstellung von Messanordnungen, Diagrammen oder zum Beispiel auch von Schalldruckverläufen.

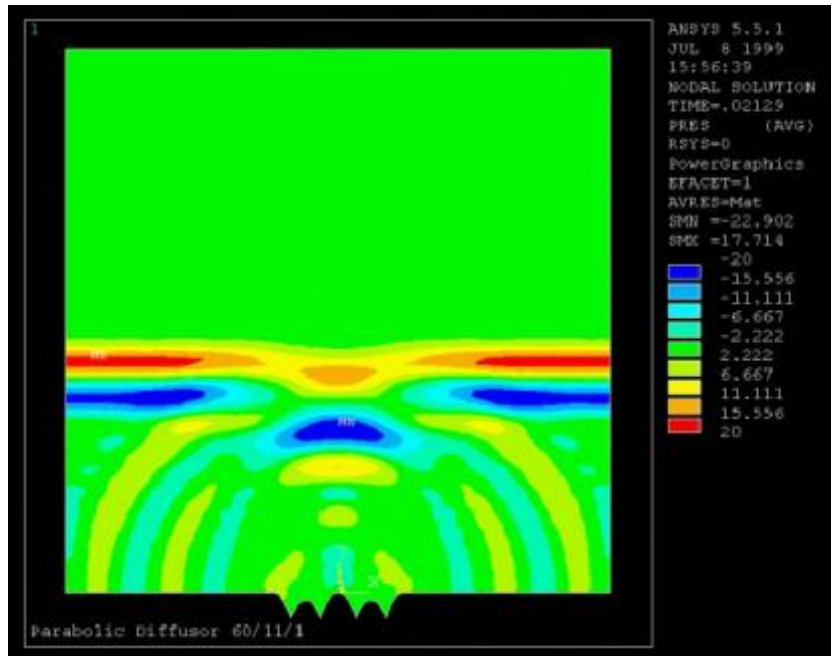


Abb. 59: Grafische Darstellung des Schalldruckverlaufs vor einem PWD mit ANSYS [VATTER, 2011]

Abb. 59 zeigt ein Standbild einer mit ANSYS erstellten Flash-Animation. Dabei trifft eine ebene Welle auf einen Parabolic Wave Diffusor in einer schallharten Wand und wird dabei diffus reflektiert. Die roten Bereiche stellen die Schalldruckmaxima und die blauen Bereiche die Schalldruckminima dar. [VATTER, 2011; www.vatter.at, 2011]

Auf die genauere Beschreibung eines bestimmten Softwarepaketes zur raumakustischen Simulation wird hier verzichtet, da solche Programme von verschiedenen Herstellern angeboten werden und jedes seine individuellen Vor- und Nachteile bietet. Zu erwähnen ist nur, dass es dabei große Unterschiede in Preis, Leistungsfähigkeit, Systemanforderungen und Bedienerfreundlichkeit geben kann und je nach Anwendung gut überlegt werden sollte, welches Programm verwendet wird.

6.5) Darstellungsformen und Diagramme

6.5.1) Einzahlwerte

Um die Streuwirkung eines akustischen Diffusors darzustellen, ist es üblich, neben der Angabe des Streugradverlaufs über den betrachteten Frequenzbereich auch einen einzelnen Zahlenwert für den Streugrad anzugeben. Dieser Wert berechnet sich aus dem Mittelwert des Streugrades über den Frequenzbereich und wird mit D (Diffusion) abgekürzt und als Streumaß bezeichnet. Die Angabe erfolgt logarithmisch in dB. Oft wird dieser Einzahlwert in Diagrammen wie in Abb. 60 zusätzlich zum Streugradverlauf als waagrechte Linie eingezeichnet (hier $D = 3,65 \text{ dB}$). [Bolejko et al., 1998]

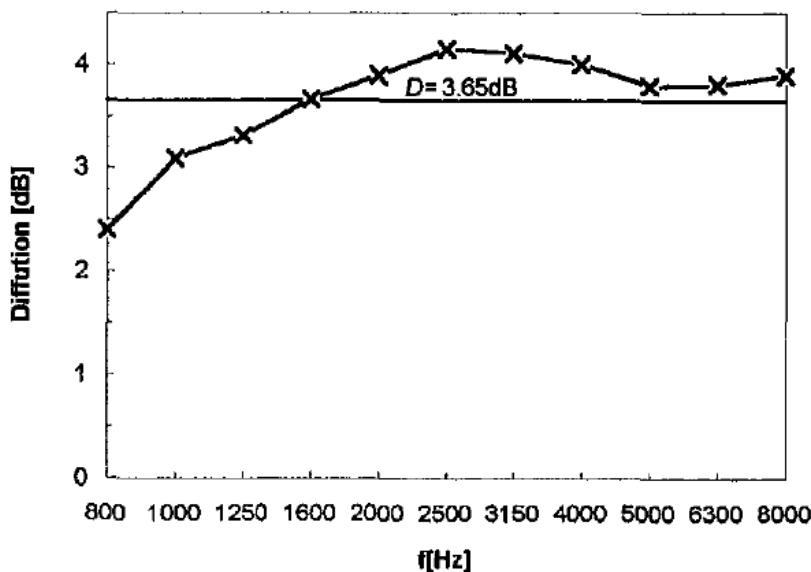


Abb. 60: Streugradverlauf und Mittelwert D
[Bolejko et al., 1998]

Zu beachten ist bei dieser Darstellungsform, ob die Angabe von D nur für einen bestimmten Einfallswinkel gültig ist oder ob über den gesamten Winkelbereich gemittelt wurde.

6.5.2) Frequenzbezogene Diagramme

In der Praxis sind die wichtigsten Kennwerte eines akustischen Diffusors der Streugrad und der Absorptionsgrad. Die Angabe erfolgt in den meisten Datenblättern mittels frequenzbezogener Diagramme. Dabei wird der Verlauf des jeweiligen Parameters auf der y-Achse bezogen auf den Frequenzbereich auf der x-Achse dargestellt. Mit dieser einfachen Darstellung lässt sich auf einen Blick die Qualität eines akustischen Diffusors über den gesamten Frequenzbereich oder auch nur für einen bestimmten Bereich erkennen.

Messung und Simulation

Sowohl Streugrad als auch Absorptionsgrad werden üblicherweise in einem Wertebereich von 0 bis 1 angegeben, wobei die Werte für den Absorptionsgrad eher bei 0 liegen sollen und jene für den Streugrad möglichst nah bei 1.

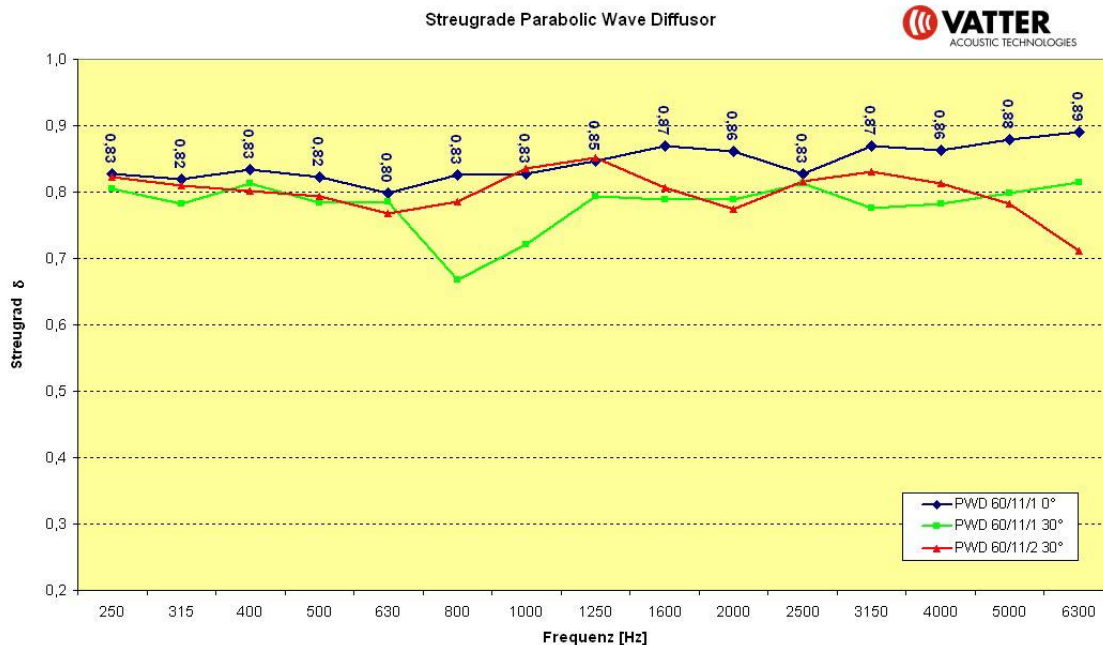


Abb. 61: Streugrad von Parabolic Wave Diffusoren
[VATTER, 2011]

Die Angabe der Werte für den Streugrad kann wie in Abb. 61 für verschiedene Messwinkel mit separaten Kurven erfolgen oder wiederum mit nur einer Kurve, welche die gemittelten Werte über den gesamten Winkelbereich wiedergibt.

In manchen Datenblättern wird auf die Darstellung einer Verlaufskurve verzichtet und stattdessen eine Tabelle (Tabelle 1) mit denselben Werten angegeben.

Tabelle 1: Streugrade Diffusoren

	Frequenz [Hz]														
	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
NWD 60/11/1 - Streugrad δ bei 0° Schalleinfall	0,84	0,83	0,82	0,83	0,84	0,82	0,83	0,81	0,82	0,88	0,84	0,84	0,84	0,82	0,59
NWD 60/11/1 - Streugrad δ bei 30° Schalleinfall	0,81	0,82	0,82	0,80	0,80	0,80	0,79	0,68	0,68	0,82	0,83	0,69	0,76	0,72	0,25
NWD 60/11/2 - Streugrad δ bei 30° Schalleinfall	0,79	0,77	0,80	0,81	0,82	0,80	0,82	0,69	0,72	0,69	0,78	0,65	0,68	0,63	0,57
PWD 60/11/1 - Streugrad δ bei 0° Schalleinfall	0,83	0,82	0,83	0,82	0,80	0,83	0,83	0,85	0,87	0,86	0,83	0,87	0,86	0,88	0,89
PWD 60/11/1 - Streugrad δ bei 30° Schalleinfall	0,80	0,78	0,81	0,78	0,78	0,67	0,72	0,79	0,79	0,79	0,81	0,78	0,78	0,80	0,81
PWD 60/11/2 - Streugrad δ bei 30° Schalleinfall	0,82	0,81	0,80	0,79	0,77	0,79	0,84	0,85	0,81	0,77	0,82	0,83	0,81	0,78	0,71

Tabelle 1: Streugrad von Numeric und Parabolic Wave Diffusoren in Tabellendarstellung
[VATTER, 2011]

Die einzelnen Punkte der Tabelle werden im Verlaufsdiagramm einfach miteinander verbunden und ergeben so die Kurve.

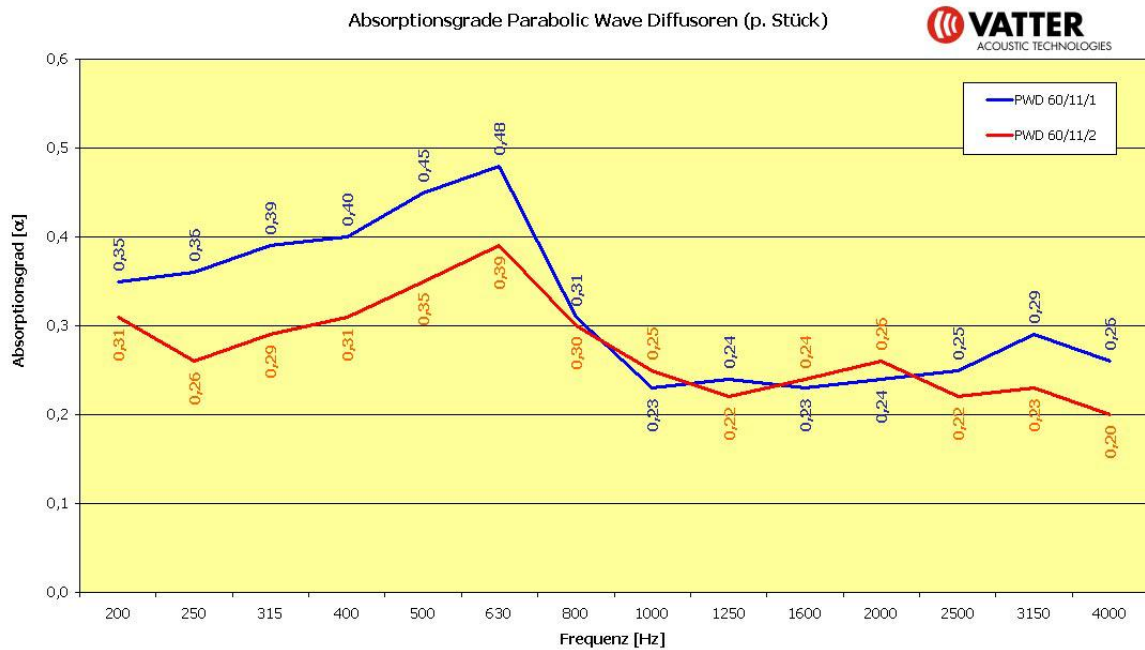


Abb. 62: Absorptionsgrad von Parabolic Wave Diffusoren [VATTER, 2011]

Abb. 62 zeigt die Verläufe des Absorptionsgrades über den betrachteten Frequenzbereich für zwei verschiedene Modelle von Parabolic Wave Diffusoren.

Auch für den Absorptionsgrad erfolgt teilweise die Darstellung in Tabellen (Tabelle 2), die wiederum gleichwertig zur Darstellung als Verlaufskurve ist.

Tabelle 2: Absorptionsgrade Diffusoren

	Frequenz [Hz]													
	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
NWD 60/11/1 - Absorptionsgrad α / Stk.	0,36	0,42	0,39	0,41	0,48	0,37	0,32	0,29	0,38	0,40	0,43	0,37	0,34	0,36
NWD 60/11/2 - Absorptionsgrad α / Stk.	0,28	0,29	0,32	0,33	0,36	0,36	0,28	0,25	0,24	0,20	0,20	0,21	0,27	0,20
PWD 60/11/1 - Absorptionsgrad α / Stk.	0,35	0,36	0,39	0,40	0,45	0,48	0,31	0,23	0,24	0,23	0,24	0,25	0,29	0,26
PWD 60/11/2 - Absorptionsgrad α / Stk.	0,31	0,26	0,29	0,31	0,35	0,39	0,30	0,25	0,22	0,24	0,26	0,22	0,23	0,20

Tabelle 2: Absorptionsgrad von Numeric und Parabolic Wave Diffusoren in Tabellendarstellung [VATTER, 2011]

6.5.3) Polardiagramme, winkelbezogene Diagramme

Um die Schallstreuung an einem akustischen Diffusor über einen bestimmten Winkelbereich gut erkennbar darzustellen, werden die sogenannten Polardiagramme, oft auch Polar Patterns genannt, verwendet. Diese Polardiagramme werden auch schlicht als Streudiagramme bezeichnet und bilden üblicherweise über einen Bereich von -90° bis $+90^\circ$ die Verteilung des reflektierten Schalls ab. Ein Diagramm wird dabei für jeweils eine diskrete Frequenz angegeben, so dass für die Betrachtung über einen größeren Frequenzbereich dementsprechend mehrere Polardiagramme für unterschiedliche diskrete Frequenzen nötig sind.

Abb. 63 zeigt ein typisches Streudiagramm eines akustischen Diffusors. Der Pfeil gibt die Einfallrichtung des eintreffenden Schalls an, der hier aus der 0°-Richtung einfällt. Über den gesamten Winkelbereich wird nun messtechnisch der Schalldruck des reflektierten Schalls gemessen. Auf den Schalldruck des einfallenden Schalls bezogen und logarithmisch dargestellt ergibt sich der Verlauf der dicken schwarzen Linie im Diagramm.

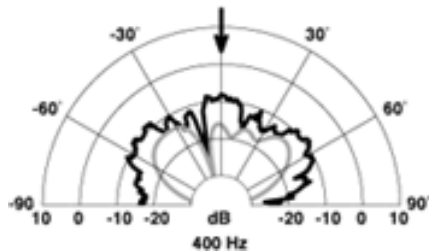


Abb. 63: Typisches Streudiagramm
[Hunecke, 2011]

Der Verlauf in Abb. 63 würde auf eine relativ gute Streuwirkung des vorliegenden Diffusors bei 400 Hz hindeuten. Zwischen -60° und +60° ergibt sich eine annähernd gleichmäßige Streuung ohne deutliche Einbrüche. Bei Winkeln, die größer als +/-60° sind, ist die Streuwirkung eindeutig schlechter. Dieser Bereich ist aber praktisch nicht so relevant und die Werte könnten durch Nebeneinanderplatzieren mehrerer Diffusoren verbessert werden.

6.5.4) Weitere grafische Darstellungsformen

Die Verwendung von Software für Messung und Simulation für raumakustische Anwendungen ermöglicht neben den bisher aufgezählten traditionellen Darstellungsformen auch die Darstellung diverser physikalischer Größen und Kennwerte in grafischen Animationen. Dabei sind abhängig von der verwendeten Software verschiedene Darstellungsformen möglich.

Die folgenden beiden Diagramme (Abb. 64 und Abb. 65) zeigen die Verteilung des Schalldrucks des reflektierten Schalls an einem akustischen Diffusor mit zweidimensionaler Streuwirkung.

Messung und Simulation

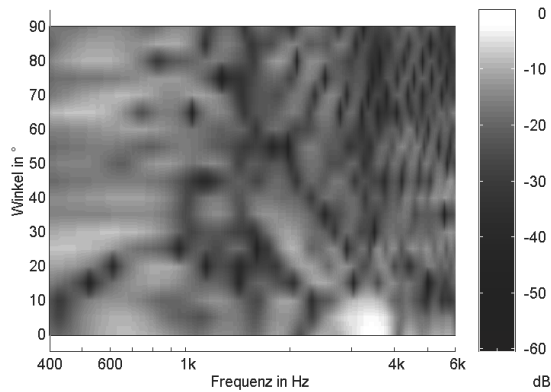


Abb. 64: Schalldruckverteilung bei Einfallrichtung 0°
[Kempe et al.]

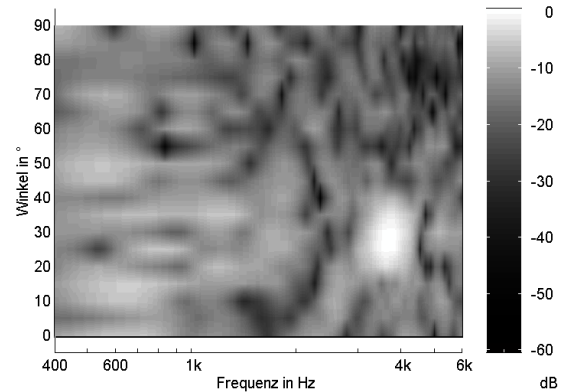


Abb. 65: Schalldruckverteilung bei Einfallrichtung -30°
[Kempe et al.]

In Abb. 64 fällt der Schall aus der 0°-Richtung ein, in Abb. 65 aus -30°. Bezogen auf die Frequenz (x-Achse) und auf den Winkel (y-Achse) wird die Schalldruckverteilung mittels unterschiedlicher Farben (hier Graustufen) dargestellt. Dunkle Bereiche entsprechen niedrigen Schalldrücken, helle Bereiche hohen Schalldrücken. Somit können mit nur einem Diagramm die Abhängigkeiten des Schalldrucks sowohl von der Frequenz als auch vom Winkel sichtbar gemacht werden.

Einige Hersteller akustischer Bauteile bieten auf ihren Homepages auch Flash-Animationen wie zum Beispiel in Abb. 59 in Abschnitt 6.4) an, die durch computergestützte Simulationen erstellt werden. Diese Animationen geben meist ansehnlich die Schalldruckverteilungen vor einem akustischen Diffusor mit dem Verlauf der Zeit wieder. So lassen sich für den Kunden die akustischen Eigenschaften des jeweiligen Diffusors wie zum Beispiel der wirksame Winkelbereich und der notwendige Hörabstand einfach erkennen.

Die meisten Programme zur raumakustischen Simulation bieten auch Möglichkeiten, mit Hilfe unterschiedlicher grafischer Darstellungsformen die raumakustischen Gütemaße über den Raum verteilt sichtbar zu machen. Diese Darstellungen können im raumakustischen Planungsprozess sehr hilfreich sein, da schnell erkennbar ist, in welchen Raumbereichen es Probleme gibt und diese können dann gezielt behoben werden.

7) Anwendung und praktischer Einsatz

Der Inhalt von Kapitel 7 bezieht sich, wenn nicht anders angegeben, auf Informationen von VATTER Acoustic Technologies in Gleisdorf und Geschäftsführer Klaus Höfer. [VATTER, 2011]

Der Bereich des praktischen Einsatzes akustischer Diffusoren beschränkt sich im Großen und Ganzen auf wenige wichtige Gebiete, auf welche sich dieses Kapitel bezieht.

Traditionellerweise finden akustische Diffusoren in Konzertsälen und Veranstaltungsräumen sowie in Tonstudios und Proberäumen die häufigste Anwendung. Aber in den letzten Jahren ist auch die Anzahl von sogenannten privaten High-End-Usern stark gestiegen, die sich im eigenen Haus raumakustisch optimierte Räume einrichten und dabei auch auf den Einsatz von akustischen Diffusoren nicht verzichten wollen.

Abhängig von der jeweiligen Raumsituation und dem Nutzungszweck des Raumes sind bestimmte Anforderungen zu beachten und bei der Verwendung akustischer Diffusoren zu berücksichtigen.

7.1) Ort der Anbringung und Anzahl

Entscheidend beim Einsatz von akustischen Diffusoren ist nicht nur deren Qualität, sondern auch, wo im Raum wie viele Diffusoren angebracht werden und wie diese abgestimmt sind. Eine falsche Anwendung kann entweder keine wesentlichen Verbesserungen der Raumakustik bewirken oder im schlimmsten Fall sogar zu Verschlechterungen führen.

Die Qualität der Raumakustik bestimmt die Verteilung der Schallenergie sowohl zeitlich als auch räumlich. In einer guten akustischen Umgebung müssen beim Zuhörer sowohl genügend Direktschall und frühe Reflexionen mit hohem Energiegehalt eintreffen als auch ein diffuses Nachhallfeld vorhanden sein, um späte und störende Einzelreflexionen zu verhindern (z. B. wie in Abb. 66).

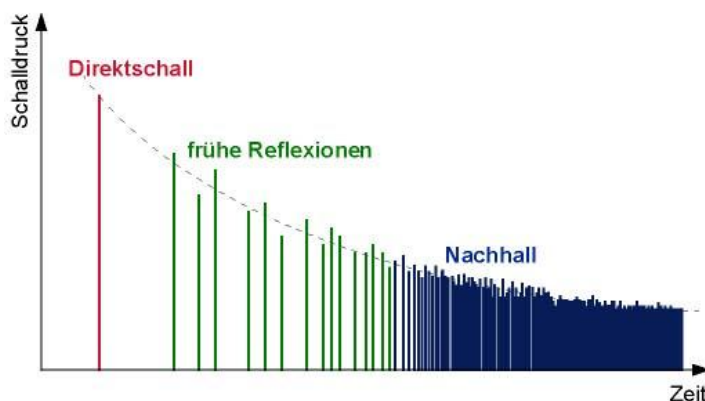


Abb. 66: Zeitliche Verteilung der Schallenergie
[www.wikipedia.org]

Je nachdem, wie groß ein Raum ist und wie er genutzt werden soll, ergeben sich verschiedene ideale Wertebereiche für die unterschiedlichen raumakustischen Gütemaße. Diese Gütemaße werden ganz entscheidend von der Verteilung der Schallenergie bestimmt. Idealerweise ist daher für jeden Raum ein eigenes raumakustisches Planungskonzept notwendig, um die bestmögliche Qualität sicherzustellen.

Auf die einzelnen raumakustischen Gütemaße wird hier nicht näher eingegangen und stattdessen auf einschlägige Fachliteratur verwiesen. Die wichtigste Planungsgröße ist allerdings die Nachhallzeit, die angibt nach welcher Zeit die eintreffende Schallenergie beim Zuhörer um einen gewissen Wert abgenommen hat. In der Praxis wird die sogenannte RT_{60} verwendet. Das ist jene Zeit, die nach dem ersten Schallereignis (Direktschall) vergeht, bis der Schalldruckpegel um 60 dB abgenommen hat.

Zur Berechnung der Nachhallzeit findet sowohl die Formel nach Sabine (Gl. 7.1) als auch jene nach Eyring (Gl. 7.2) Anwendung, deren Ergebnisse sich unter Umständen etwas unterscheiden können. Die vorliegende Form und Größe des Raumes bestimmt die Wahl der jeweiligen Berechnungsformel.

Nachhallzeit nach Sabine [Graber, RA 2009, S. 68]:

$$RT_{60} = 0,161 \left[\frac{s}{m} \right] \frac{V}{A_{ges}} \quad (\text{Gl. 7.1})$$

Dabei ist V das Raumvolumen und A_{ges} die gesamte absorbierende Oberfläche.

Nachhallzeit nach Eyring [Graber, RA 2009, S. 73]:

$$RT_{60} = -0,161 \left[\frac{s}{m} \right] \frac{V}{S_{ges} \ln(1 - \bar{\alpha}_m)} \quad (\text{Gl. 7.2})$$

V ist wiederum das Raumvolumen, S_{ges} die gesamte Raumbofläche und $\bar{\alpha}_m$ der gemittelte Absorptionsgrad.

Je nach Raumgröße und Verwendungszweck ergeben sich Idealbereiche für die Nachhallzeit.

Aus diesen Forderungen können für jeden Raum die notwendige Anzahl an verwendeten akustischen Diffusoren und auch deren Anbringungsorte abgeleitet werden. Diese sind verständlicherweise auf Decken und Wände beschränkt, wobei dabei nicht immer nur akustische Kriterien sondern auch architektonische und praktische Aspekte berücksichtigt werden müssen. Zum Beispiel sollte die Nutzung des Raumes nicht wesentlich durch vorstehende Elemente an Decken und Wänden beeinflusst werden und vor allem bei kleinen Räumen kann die nutzbare Fläche oft nicht noch weiter verkleinert werden.

In den folgenden Abschnitten werden einige Kriterien für den praktischen Einsatz von akustischen Diffusoren anhand der wichtigsten Anwendungsgebiete erklärt.

7.1.1) Konzertsäle und Veranstaltungsräume

Bei großen Räumen wie Konzertsälen und anderen Veranstaltungsräumen werden in der Regel selten einzelne Diffusorelemente wie Schröder-Diffusoren verbaut. Auf Grund des geringeren Aufwands und der besseren Integrierbarkeit wird die Schallstreuung an den Grenzflächen meist über großflächige Strukturen erreicht.

Sowohl an der Decke als auch an den Wänden werden diese Strukturen eingesetzt. Üblich sind dabei gekrümmte oder schräg gestellte Reflektoren oder auch gestufte Strukturen mit unterschiedlichen Breiten, die mit großen QRDs vergleichbar sind. Als Alternative sind Bereiche unterschiedlicher Wandimpedanz möglich, wobei zum Beispiel durch Einsatz schmaler Streifen mit unterschiedlicher Breite und einem Wechsel von Reflexion und Absorption eine gute Schallstreuung erreicht werden kann.

Vor allem in neueren Aufführungsräumen (wie in der Berliner Philharmonie in Abb. 67) werden oft gekrümmte Segel an Decken oder Wänden eingesetzt. Diese dienen ebenfalls zur Schallstreuung und Schalleitung und können aus unterschiedlichen Materialien hergestellt werden.



Abb. 67: Deckenakustiksegel im Hauptsaal der Berliner Philharmonie
[www.wordpress.com, 2011]

Große akustische Herausforderungen stellen die Bereiche für die Darbietungen dar. So soll der Bühnenraum derartig gestaltet sein, dass möglichst viel Schallenergie zum Publikum transportiert wird, aber auch eine gute Hörbarkeit der Musiker untereinander im Orchester gegeben ist. Dazu gibt es wiederum fast in jedem Konzertsaal eine individuelle Lösung und oft werden dabei auch Strukturen zur Schallstreuung eingesetzt.

Abb. 68 zeigt den Bühnenbereich der Severance Hall des Cleveland Symphonic Orchestra in Ohio. Dabei sind die Wände seitlich vom Orchester mit geschwungenen Strukturen aus Holz verkleidet, die schallstreuend wirken und die Hörbarkeit innerhalb des Orchesters verbessern. Die Konstruktion der Decke erfüllt durch den Anstieg in Richtung Publikum den Zweck der Schallleitung in den Zuhörerbereich. Mittels der geschwungenen Holzverkleidung wird aber auch eine ausreichend große Schallstreuung erreicht.



Abb. 68: Severance Hall in Ohio
[www.kenston.k12.oh.us, 2011]

Ganz spezielle Lösungen sind für Orchestergräben in Opernhäusern oder Theatern notwendig, da hierbei einige erschwerende Aspekte zu berücksichtigen sind. Auf ohnehin sehr kleinem Raum soll der Bewegungsraum für die Musiker nicht zusätzlich noch wesentlich eingeschränkt werden. Der Schalldruckpegel innerhalb des Orchestergrabens sollte nicht zu hoch aber die Hörbarkeit der Musiker untereinander trotzdem gut sein. Zusätzlich müssen die Darsteller auf der Bühne und das Publikum ausreichend beschallt werden.

Ein gern gewählter Ansatz ist dabei die Verwendung von akustischen Diffusorelementen wie zum Beispiel Schröder-Diffusoren mit geringen Bautiefen innerhalb des Orchestergrabens und die Anbringung von geschwungenen Deckensegeln oberhalb des Orchestergrabens, welche den Schall in Richtung Publikum leiten.

7.1.2) Tonstudios und LEDE-Konzept

Abhörräume in Tonstudios müssen speziellen raumakustischen Kriterien entsprechen, um Aufnahmen möglichst neutral und ohne merkbare Beeinflussung durch den Raum bewerten zu können. Unter den diversen Ansätzen zur raumakustischen Gestaltung hat sich das Live-End-Dead-End-Konzept sehr gut bewährt und findet daher in sehr vielen Tonstudios Anwendung.

Anwendung und praktischer Einsatz

Als Dead-End wird der Bereich vor der Abhörposition bezeichnet. Wände und Decke sind stark absorbierend ausgelegt, um fast ausschließlich den direkten Schall der Abhörmonitore zu hören und keine störenden Reflexionen. Der Bereich hinter der Abhörposition ist das sogenannte Live-End. Um ein gutes diffuses Nachhallfeld zu erhalten werden hier akustische Diffusoren zur Schallstreuung eingesetzt. Zusätzlich verhindern diese Diffusoren auch das Ausbilden von Längsmoden und Flatterechos.

Abb. 69 zeigt die Rückwand eines Abhörraums in einem Tonstudio. Vier aufrecht verbaute QRDs sorgen für die Schallstreuung in der horizontalen Ebene. Die beiden darüber liegenden quer verbauten QRDs dienen zur Schallstreuung in der vertikalen Ebene.



Abb. 69: Rückwand (Live-End) eines Tonstudio-Abhörraums mit NWDs
[VATTER, 2011]

In den meisten Abhörsituationen ist eine diffuse Schallstreuung in der horizontalen Ebene ausreichend und es werden dementsprechend nur vertikal angebrachte Diffusoren verwendet. Zu beachten ist auch, dass die Diffusität des Schallfelds erst ab einem gewissen Hörabstand zu den Diffusoren zufriedenstellend ist. Dieser Abstand liegt in der Praxis etwa im Bereich von 1,5 bis 2 Metern und ist aber vor allem bei kleinen Studios manchmal schwer einzuhalten.

Im Tonstudiobereich ist der Einsatz von traditionellen Diffusortypen wie Schröder-Diffusoren sehr beliebt. Auch mikroperforierte Diffusoren werden teilweise eingesetzt, um glatte und schallharte Flächen wie Fenster zu entschärfen.

7.1.3) Proberäume

In Proberäumen für Orchester oder Chöre gibt es meist keine speziellen Bereiche für Darbietung und Abhörposition. Primär ist es in diesen Räumen notwendig, dass sich die

Anwendung und praktischer Einsatz

einzelnen Musiker gut untereinander hören können. Besonders bei kleinen und niedrigen Räumen ist diese Forderung oft schwierig zu erfüllen und zusätzlich ist dabei meist auch noch die Reduzierung des Gesamtschalldruckpegels notwendig. Auch hierbei ist der Einsatz von akustischen Diffusoren sinnvoll.

In den meisten Proberäumen für zum Beispiel Blasorchester gibt es das Problem, dass die Ausdehnung des Orchesters recht groß ist, aber die Raumhöhe relativ niedrig. Dies führt einerseits zu einem hohen Gesamtschalldruckpegel und zweitens zu einer schlechten Hörbarkeit zwischen den Musikern. Mit Hilfe akustischer Diffusoren können diese Räume psychoakustisch vergrößert werden.

Besonders im Bereich der ersten Reflexionen ist der Einsatz von Diffusoren hier wirkungsvoll, um die Reflexionen besser zu verteilen. Dies kann zum Beispiel durch Einbau in die Decke realisiert werden, wobei die Anzahl und Verteilung von der Raumgröße und der Orchesteraufstellung abhängig ist. Im Folgenden sind einige Möglichkeiten zum Einbau von akustischen Diffusoren in Proberäumen für Blasorchester abgebildet (Abb. 70 und Abb. 71).



Abb. 70: Akustikdecke mit Numeric Wave Diffusoren [VATTER, 2011]



Abb. 71: Akustikdecke mit Parabolic Wave Diffusoren [VATTER, 2011]

Abb. 70 zeigt den Einbau von NWDs in der Decke und in der Rückwand eines Proberaums für Blasorchester. Zusätzlich haben sowohl Decke als auch Wände durch Schrägstellen der Holzverkleidungen eine schallverteilende Wirkung über geometrische Reflexionen. Beim Proberaum in Abb. 71 wurden in Decke und Wänden PWDs verbaut. An den Konstruktionen an den Wänden ist in beiden Abbildungen sichtbar, dass ausschließlich Diffusoren mit eindimensionaler Streuwirkung verwendet wurden und eine zusätzliche vertikale Schallstreuung durch Einbau von quer liegenden Diffusoren erreicht wird.

Vor allem bei nachträglichen Verbesserungen der Raumakustik von Proberäumen ist der vorhandene Platz für akustische Ausbauten oft begrenzt. Dabei können als Alternative zu den oben gezeigten Ausbauten wiederum Streifen unterschiedlicher Wandimpedanz oder schräggestellte Wand- und Deckenverkleidungen eingesetzt werden.

Besonders zu beachten ist vor allem in Orchesterproberäumen die Besetzung und die Auslegung auf die Instrumentierung, da jedes Instrument eine eigene Abstrahlcharakteristik besitzt. Zum Beispiel sollten Trompeten, welche den Schall stark gebündelt abstrahlen, nicht an stark reflektierenden Wänden positioniert werden.

Falls möglich, macht also eine Berücksichtigung der Orchesteraufstellungen bei der Positionierung der akustischen Diffusoren in der raumakustischen Planung Sinn.



Abb. 72: Deckenspiegel mit Parabolic Wave Diffusoren
[VATTER, 2011]

Abb. 72 zeigt in der Decke verbaute Parabolic Wave Diffusoren in einem Orchesterproberaum. Die Verteilung und Anordnung der Diffusoren ist dabei sowohl auf die Raumform als auch auf die Orchesteraufstellung in gekrümmten Sitzreihen auf vier nach hinten ansteigenden Stufen abgestimmt. Die gesamte Deckenkonstruktion steigt ebenfalls von vorne nach hinten an. Die Abbildungen in Abschnitt 7.4) zeigen Teile der zugehörigen Pläne für den raumakustischen Ausbau.

Je nach Verwendungszweck des jeweiligen Proberaums, muss auch eine Bedämpfung des Raums zur Reduzierung des Gesamtschalldruckpegels bedacht werden. Räume für Orchester werden in der Regel stärker bedämpft, bei Chorproberäumen soll die Dämpfung niedrig sein und die Diffusität des Schallfeldes eher höher.

7.1.4) Private User

In den letzten Jahren ist auch die Zahl der privaten High-End-User gestiegen, die sich zu Hause Heimkinos oder aufwändig gestaltete Abhörräume einrichten.

Derartige Räume können im Prinzip ähnlich einem Abhörraum in einem Tonstudio gestaltet werden, es gibt dabei allerdings keine Regeln. Wichtig sind eigentlich nur das akustische und ästhetische Empfinden des jeweiligen Kunden sowie der Wohlfühlfaktor. Daher können in diesen Räumen quasi alle Typen von akustischen Diffusoren zum Einsatz kommen.

7.2) Wahl der verwendeten akustischen Diffusoren

Die Wahl der verwendeten akustischen Diffusoren wird in der Praxis von mehreren verschiedenen Faktoren bestimmt, wobei dabei nicht nur akustische Aspekte berücksichtigt werden.

Die wichtigsten Kriterien für die verwendeten Diffusoren sind die obere und untere Grenzfrequenz f_u und f_o . In der Praxis ist dabei die untere Grenzfrequenz des Diffusors vor allem in kleinen Räumen gar nicht entscheidend, wenn die Abmessungen des Raumes zu klein sind, damit in diesem Frequenzbereich überhaupt eine gute Wellenausbreitung stattfinden kann. Daher kann auch ein akustischer Diffusor nicht wirksam werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Baugröße. Je tiefer die untere Grenzfrequenz eines akustischen Diffusors liegen soll, desto größere Bautiefen werden benötigt. Damit ergeben sich immer Einschränkungen der Nutzfläche eines Raumes und auch optische Nachteile. In der Praxis werden daher meist akustische Diffusoren mit einer unteren Grenzfrequenz von etwa 400 bis 450 Hz eingesetzt, deren Bautiefen sich zum Beispiel bei NWDs oder PWDs durch geeignete Wahl der Primzahl bei 20 bis 30 cm ergeben. Die obere Grenzfrequenz hängt vom verwendeten Diffusortyp und von der Verarbeitungsqualität ab.

Vor allem in modernen von Architekten geplanten Konzertsälen oder anderen Veranstaltungsräumen wird nicht selten gefordert, dass die raumakustischen Ausbauten quasi nicht sichtbar sind und sich in das architektonische Konzept einfügen. Um auf diese Forderungen Rücksicht nehmen zu können, sind oft an den jeweiligen Raum angepasste Lösungen mit speziellen Abmessungen, Formen und Materialien notwendig, so dass keine Serienprodukte verwendet werden können.

Eine entscheidende Rolle bei der Wahl der akustischen Diffusoren spielt auch die Handhabbarkeit und die Praxistauglichkeit der unterschiedlichen Modelle. Die Herstellung und Montage sollte von den Handwerkern ohne zu großen Aufwand durchgeführt werden können. Das heißt, dass wenn möglich keine speziellen Werkstoffe, Maschinen und Werkzeuge notwendig sein sollten. Damit kann auch der Preis für die Herstellung und die Montage niedriger gehalten werden, was in der Praxis sogar das wichtigste Argument für die Wahl der verwendeten akustischen Diffusoren sein kann.

Nicht zu vergessen sind auch die Haltbarkeit und die Möglichkeit zur Pflege. Einmal eingebaut, sollten die verwendeten Diffusoren keine weitere Wartung mehr benötigen. Das heißt, dass sie in ihrer Form stabil bleiben müssen und die Wirksamkeit über lange Zeit erhalten bleiben muss. Vor allem bei geometrischen Strukturen oder Schröder-Diffusoren, die an Wänden angebracht sind, können sich in den Vertiefungen und Kammern Staub oder Spinnennetze ansammeln, welche zwar die Wirkung nicht beeinträchtigen, aber nicht schön anzusehen sind. Je nach Modell und verwendetem Material kann die Reinigung mit

unterschiedlich großem Aufwand durchgeführt werden. Dabei haben zum Beispiel geschwungene Diffusoren gegenüber klassischen QRDs einen Vorteil.

Zu erwähnen ist noch, dass in der Praxis abgesehen von Diffusoren mit einfachen geometrischen Oberflächenstrukturen sehr selten Diffusorelemente mit zweidimensionaler Streuwirkung eingesetzt werden. Für sehr viele Anwendungen ist eine Streuwirkung in einer Ebene – meist horizontal – ausreichend. Sollte eine Streuwirkung in zwei Dimensionen notwendig sein, so wird dies üblicherweise durch um 90° gedrehte 1D-Diffusoren erreicht, wie dies in Abb. 69 zu sehen ist. Die Produktion von Schröder-Diffusoren oder geschwungenen Diffusoren mit zweidimensionaler Streuwirkung ist wesentlich aufwändiger und teurer und beschränkt sich daher fast ausschließlich auf Sonderanfertigungen.

7.3) Theorie und Praxis

Der Einsatz von Computern zur Berechnung und auch zur Simulation hat für die moderne raumakustische Planungspraxis viele Vorteile und Vereinfachungen gebracht. Die zugrundeliegenden Theorien und Formeln haben sich zwar nicht wesentlich verändert, aber die Berechnung kann heute in Sekundenschnelle durchgeführt werden.

Mit Hilfe von Simulationen können unterschiedliche Entwürfe am Computer getestet und sämtliche raumakustische Gütemaße dargestellt werden. Die Übereinstimmung mit den Resultaten in der Praxis kann dabei erstaunlich genau sein. Simulationen sind somit ein adäquates Hilfsmittel zur Planung, dienen aber meist nur zu Anschauungszwecken.

Doch trotz all dieser Möglichkeiten zur Berechnung und Simulationen ist für die gute Raumakustik meist die Erfahrung der Raumakustiker und Raumakustikerinnen in der Planung entscheidend. Formeln und Simulationen berücksichtigen nicht alle praktischen Aspekte und nicht immer geben die raumakustischen Gütemaße eine deutliche Aussage über die Qualität der Raumakustik in der Praxis. Zum Beispiel ist die Aussagekraft des Deutlichkeitsmaßes in kleinen Räumen sehr gering und in Simulationen verwischen die Wirkungen einzelner akustischer Diffusoren untereinander.

Die Anzahl und die Positionen der verwendeten akustischen Diffusoren und auch die verwendeten Typen werden in der Praxis also hauptsächlich durch Erfahrungswerte bestimmt. Dabei können zusätzlich zu den Berechnungen wichtige praktische Aspekte berücksichtigt werden, um so das bestmögliche Ergebnis zu erreichen.

7.4) Endergebnis

Die diversen raumakustischen Gütemaße und die zugehörigen Idealbereiche für deren Werte ergeben gute Richtwerte für die akustische Qualität eines Raums. Doch in der Praxis ist nicht immer entscheidend, ob alle Gütemaße im optimalen Bereich liegen. Die Raumakustik wird von Künstlern und Zuhörern immer als Ganzes wahrgenommen. Dabei ist sehr entscheidend, dass sich die Personen im Raum wohlfühlen und dabei spielen optische Aspekte ebenfalls eine Rolle.

Akustische Diffusoren machen nur als Teil eines umfassenden raumakustischen Konzepts im Zusammenspiel mit verschiedenen anderen Maßnahmen wie Absorbern oder Gestaltung der Raumform Sinn. In den meisten Fällen funktioniert die Raumakustik dann am besten, wenn sie von den Personen im Raum nicht wahrgenommen wird.

Als Beispiel zeigen hier Abb. 73 und Abb. 74 Ausschnitte eines raumakustischen Planungskonzepts für einen Orchesterprobesaal.

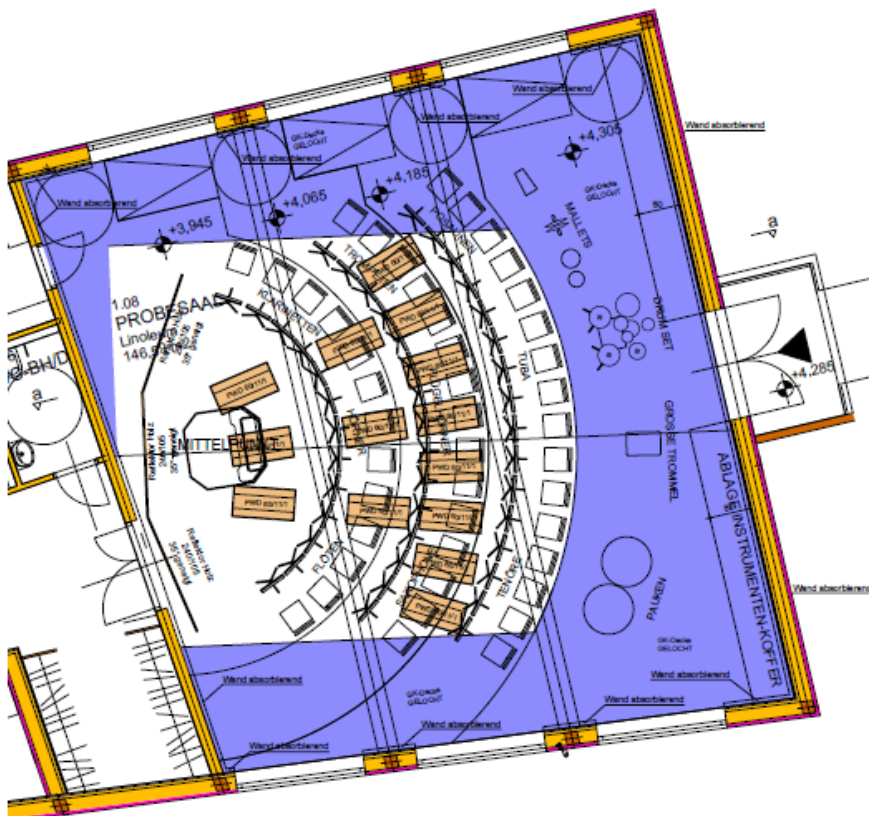


Abb. 73: Grundriss einer Akustikdecke
[VATTER, 2011]

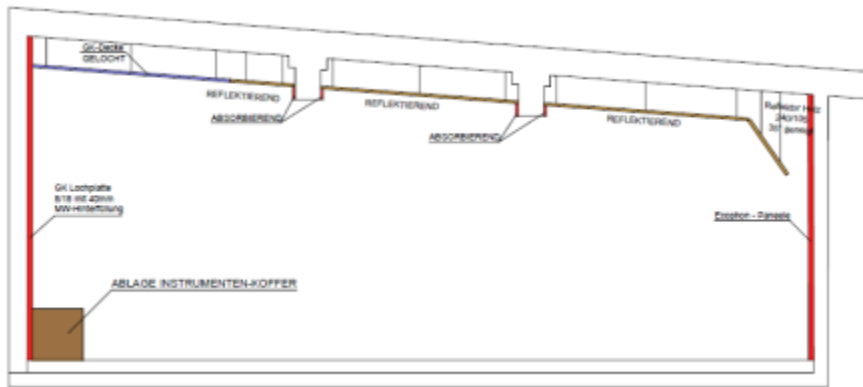


Abb. 74: Seitenansicht einer Akustikdecke
[VATTER, 2011]

Die Abbildungen Abb. 73 und Abb. 74 zeigen den Grundriss bzw. eine Seitenansicht von der rechten Seitenwand aus für einen Orchesterproberaum. Die schon in Abb. 72 gezeigten in der Decke verbauten Parabolic Wave Diffusoren bilden hier nur einen Teil eines umfassenden raumakustischen Planungskonzepts. Die gekrümmte Anordnung des Deckenspiegels besteht aus insgesamt 14 PWDs auf einer Fläche von 150 m² und ist in ihrer Form an die Form der Orchesteraufstellung angepasst.

Um die Ausbildung von Raummoden zu verringern, gibt es im gesamten Raum keine parallelen Decken- oder Wandflächen. Zusätzlich befinden sich an Wänden und Decken sowohl reflektierende als auch absorbierende Flächen und spezielle geformte Reflektoren.

8) Kosten – Nutzen – Bewertung

Den Nutzen von akustischen Diffusoren und auch allgemein von raumakustischen Maßnahmen mit Zahlen zu bewerten, ist im Allgemeinen nur schwer möglich.

Die Akustik in einem bestimmten Raum kann zwar bewertet werden und ebenso Veränderungen, welche zum Beispiel durch den Einsatz von Diffusoren entstehen, aber diese Bewertungen beruhen allesamt auf subjektiven Eindrücken. Diese sind stark von psychoakustischen Phänomenen abhängig und werden auch von Mensch zu Mensch etwas unterschiedlich sein, was eine eindeutige Bewertung schwierig macht.

Ein Ansatz wäre der Vergleich von zwei verschiedenen Bauplänen für ein und denselben Raum. Im ersten Plan wird ein Raum mit einem raumakustischen Konzept unter Einsatz akustischer Diffusoren entworfen. Wie schon in früheren Abschnitten erwähnt, können akustische Diffusoren zur Unterdrückung von Raummoden und zur psychoakustischen Vergrößerung eines Raums verwendet werden. Dieser Raum kann also mit einer einfachen Rechteckform und nur so groß wie notwendig geplant werden.

Zum Vergleich wird ein zweiter Plan erstellt, in dem auf den Einsatz von akustischen Diffusoren verzichtet wird. Stattdessen wird der Raum deutlich größer und mit einer Raumgeometrie zur Verhinderung von Raummoden entworfen.

Die Baukosten dieser beiden Planungskonzepte könnten nun miteinander verglichen werden, um herauszufinden, ob der Einsatz von akustischen Diffusoren oder der Bau eines größeren Raums mit komplizierter Form höhere Kosten verursachen würden.

Was theoretisch möglich erscheint, ist aber in der Praxis nicht durchführbar. Bei der Planung eines Raums gibt es meist nur ein Konzept zur Realisierung. Wenn dabei auf eine gute Raumakustik Wert gelegt wird, beinhaltet dieses Konzept auch den Einsatz von akustischen Diffusoren. Ein zweiter Plan ohne Diffusoren und stattdessen mit veränderter Raumgröße und Raumform wird in der Praxis nicht angefertigt. Somit gibt es auch kein existierendes Projekt, wo ein derartiger Vergleich durchführbar wäre. Aber auch wenn dies möglich wäre, so würden die beiden Räume doch eine sehr unterschiedliche Raumakustik aufweisen.

Da aber ohnehin fast ausschließlich nur jene Räume raumakustisch geplant und ausgebaut werden, wo dies sinnvoll und notwendig ist, ist eine Bewertung des Verhältnisses von Kosten gegenüber dem Nutzen auch gar nicht zielführend.

Allgemein kann gesagt werden, dass ein gutes raumakustisches Konzept eine angenehme akustische Umgebung für die Künstler bieten soll und dafür verantwortlich ist, die Qualität der Darbietung so gut wie möglich beim Zuhörer ankommen zu lassen. Der Beitrag der einzelnen Bauelemente für die Raumakustik – also auch von akustischen Diffusoren – ist dabei nicht entscheidend. Wichtig ist die Qualität des Gesamtkonzepts.

9) Zusammenfassung und kritische Betrachtung

Trotz des schon jahrhundertelangen Einsatzes und der wichtigen Funktion in der Raumakustik stellen akustische Diffusoren auch heute noch so etwas wie ein Nischenprodukt dar und finden in der Fachliteratur und in Veröffentlichungen deutlich weniger Beachtung als zum Beispiel akustische Absorber.

Die Vielfalt an Arten, verwendeten Materialien und Bauformen akustischer Diffusoren ist heute sehr groß, so dass beinahe für jede Anwendung die passenden Modelle gefunden werden können. Durch den Einsatz moderner Berechnungs- und Simulationsmethoden gibt es auch eine große Weiterentwicklung, die laufend Verbesserungen und neue Modelle hervorbringt.

In der Praxis macht der Einsatz von akustischen Diffusoren immer nur als Teil eines raumakustischen Gesamtkonzepts Sinn. Dabei ist ihre Rolle zur Leitung und Streuung von Schall sehr wichtig und sie werden zur Unterdrückung von Raummoden und Echos, zur Erzeugung eines diffusen Schallfelds und zur psychoakustischen Raumvergrößerung eingesetzt.

Wichtig ist, dass für den jeweiligen Raum die richtigen Modelle sowie die entsprechende Anzahl und die richtige Verteilung gewählt werden. Falsch positioniert oder in zu großer Anzahl können akustische Diffusoren auch zu Verschlechterungen wichtiger raumakustischer Gütemaße wie dem Klarheitsmaß führen. Auch der Einsatz von falschen oder minderwertigen Modellen kann unangenehme akustische Effekte für den Zuhörer bewirken.

Als Abschluss sei aber erwähnt, dass der Einsatz von akustischen Diffusoren für erfahrene Raumakustiker und Raumakustikerinnen im Zusammenspiel mit vielen anderen Maßnahmen zur raumakustischen Gestaltung ein unverzichtbares Mittel ist, um eine gute Raumakustik zu erhalten.

10) Anhang

Danksagung

Herzlichen Dank an VATTER Acoustic Technologies in Gleisdorf und an den Geschäftsführer Klaus Höfer für die Zurverfügungstellung von sehr hilfreichen Informationen aus der Praxis sowie Datenblättern und Abbildungen für diese Arbeit.

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe. Inhalte, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder anderen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Graz, am

.....

Alexander Ulz