



DIFFUSION IM STUDIO

# ÜBER DIE WISSENSCHAFT UND DIE KUNST

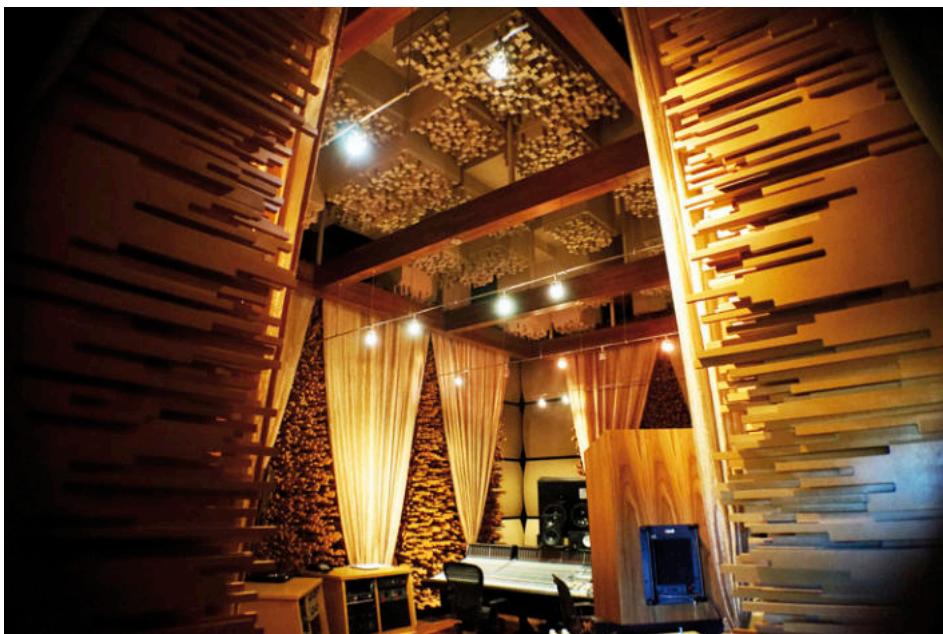
DR.-ING. BENEDIKT KOHOUT, FOTOS UND ABBILDUNGEN: AURI AKUSTIK

Diffusion ist neben Absorption und geometrischer Reflexion eines der Werkzeuge bei der akustischen Gestaltung von Räumen. Dabei ist das Verständnis für die Wirkung von Diffusion und die Schwierigkeiten beim richtigen Design von diffus schallstreuenden Flächen auch im professionellen Umfeld nicht allgegenwärtig. Dieser Artikel gibt einen Überblick über die Konzeption des akustischen Verhaltens von Diffusoren, beginnend mit gängigen, einfachen Berechnungen hin zu neuen, dreidimensionalen Simulationsmöglichkeiten. Der Vergleich verschiedener Diffusor-Bauarten sowie die klar darstellbaren Auswirkungen von falschen Diffusor-Designs sollen zu einem genaueren Verständnis und zielgerichteten Einsatz von Diffusion im Raum beitragen. Darauf aufbauend wird die Komplexität in der großflächigen Anwendung von Diffusoren erläutert und ein Lösungsansatz zur optimalen, diffus streuenden Oberflächengestaltung mittels phasenmodulierter Diffusorsequenzen prinzipiell dargestellt. Der letzte Teil dieses Artikels widmet sich der Frage, warum ein ausgewogener Raumklang direkt mit akustischer Diffusion korreliert und wie Diffusion im Studio gewinnbringend eingesetzt werden kann.

## Einleitung

Akustische Diffusion bedeutet eine gleichmäßige, räumliche und zeitliche Streuung von Schall. Dies unterscheidet die akustische Diffusion wesentlich von der geometrischen Reflexion an ebenen und zufällig gestalteten, schallharten Oberflächen. Diffusion und das Design von Diffusoren beruht grundlegend auf dem Wellencharakter und der Beugung von Schall (engl. 'diffraction') und grenzt sich dadurch von der vereinfachten, geometrischen Betrachtungsweise des Schalls ab.

Durch die gezielte Kontrolle der diffusen Schallstreuung kann ein Schallfeld ermöglicht werden, welches den Klangcharakter des Raumes maßgeblich prägt. Diffusoren finden ihre Anwendung in professionellen, akustischen Umgebungen wie Tonstudios und Konzertsälen, aber auch in HiFi-Räumen und Heimkinos. Dabei können sich moderne, diffuse Oberflächen in ihrem Aussehen deutlich unterscheiden, wie beispielsweise in der Elbphilharmonie in Hamburg (siehe Abbildung 1) [1] im Vergleich zu den Blackbird Studios in Nashville (siehe Abbildung 2) [2]. Die grundlegende Gemeinsamkeit ist jedoch eine Planung und Berechnung der diffus streuenden Oberflächen und deren akustische Wirkung.



Studio C, Blackbird Studio Nashville. Foto mit freundlicher Genehmigung von Beau Masano/Blackbird Studio 2018©

## State of the Art – gängige Berechnungsverfahren und Design

Die Grundlage der heute gängigen Designvorgaben für Diffusoren ist die Arbeit von Manfred Schröder, beginnend mit dem wegweisenden Artikel 'Diffuse sound reflection by maximum-length sequences' aus dem Jahre 1975 [3]. Die durch Schröder gewonnenen Erkenntnisse zeigen erstmals, dass eine räumlich homogene Schallstreuung in zwei

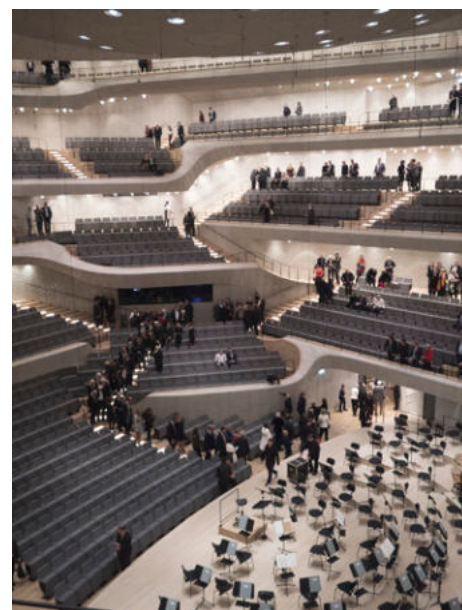
oder drei Dimensionen durch mathematisch gestaltete Oberflächen mit Maximalfolgen (MLS, 'maximum-length sequences', Gleichung 1) und 'Quadratischer Rest'-Folgen (QR, 'quadratic residue sequences', Gleichung 2) möglich ist.

$$\text{ML-Folge} := \begin{cases} a_3[n+1] = a_0[n] + a_1[n] \\ a_2[n+1] = a_3[n] \\ a_1[n+1] = a_2[n] \\ a_0[n+1] = a_1[n] \end{cases}$$

$$\text{QR-Folge} := a \equiv x^2 \pmod{m}$$



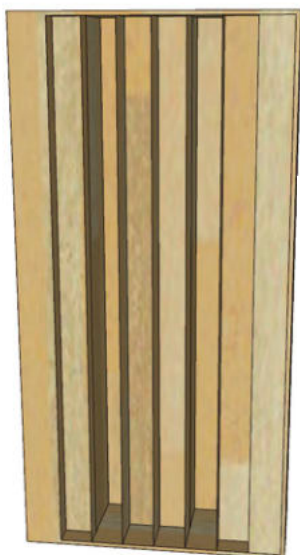
Elbphilharmonie Hamburg: Außenansicht und 'Großer Saal'





Dr.-Ing. Benedikt Kohout ist Inhaber von Auri Akustik. Zuvor hat er am Karlsruher Institut für Technologie Elektro- und Informationstechnik mit Schwerpunkt Akustik studiert und darin promoviert. Mit seinem Ingenieurbüro widmet er sich den wirklich wichtigen Fragestellungen der Raumakustik, entwickelt Produkte, plant Räume, macht Messungen und berät seine Kunden transparent und herstellerunabhängig.  
 Kontakt: Auri Akustik, Dr.-Ing. Benedikt Kohout, [www.auriakustik.de](http://www.auriakustik.de),  
 E-Mail: [diffusor@auriakustik.de](mailto:diffusor@auriakustik.de)

Ebenso liefert Schröder den messtechnischen Beweis der mathematischen Berechnungen und zeigt die Vorteile berechneter, streuender Flächen im Vergleich zu



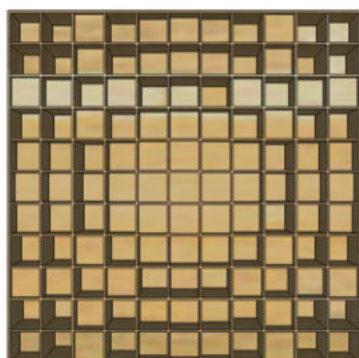
zufälligen Anordnungen [4]. Durch weiterführende Arbeiten von Schröder [5], aber auch beispielsweise Kuttruff [6] sowie D'Antonio [7] ergeben sich Erkenntnisse zum Aufbau von berechneten Diffusoren, welche auch heute noch die gängige Designvorlage bilden.

Vereinfacht zusammengefasst ergibt sich, dass das akustische Verhalten von Diffusoren prinzipiell durch die folgenden Parameter bedingt ist:

- Eindimensionale oder zweidimensionale Bauart
- Dimensionierung der einzelnen Vertiefungen eines Diffusors
- Anzahl der Vertiefungen eines Diffusors
- Fläche der einzelnen Vertiefungen eines Diffusors
- Stärke der Trennwände
- Gesamtgröße des Diffusors
- Material des Diffusors
- Qualität der Verarbeitung

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge kann die falsche Wahl einer der genannten Einflussfaktoren die gewünschte, akustische Wirkung negativ beeinflussen. Nur durch das Wissen über die Auswirkungen der einzelnen Designparameter kann eine saubere und den jeweiligen Anforderungen entsprechende Diffusion erreicht werden.

Es bleibt somit festzuhalten, dass eine gezielte, homogene Schallverteilung im Raum durch mathematisch berechnete Oberflächen erreicht werden kann.



Das Design und die Produktion eines Diffusors ist keine triviale Aufgabe und erfordert ein detailliertes Verständnis über die Berechnungsverfahren und die akustische Wirkung der verschiedenen Einflussgrößen. Einhergehend mit dem Wissen über das akustische Verhalten spielt auch die sinnvolle Platzierung von diffusen Oberflächen im Raum eine entscheidende Rolle für den Raumklang.

## Ein- und zweidimensionale Diffusoren

Generell wird im Aufbau zwischen eindimensionalen und zweidimensionalen Diffusoren unterschieden (siehe Abbildung 3). Bei eindimensionalen Diffusoren verlaufen die unterschiedlich hohen Vertiefungen entweder von oben nach unten oder von links nach rechts. Aus diesem Grund streuen diese den Schall vergleichbar Abbildung 3: Skizze verschiedener Diffusoren. Von links nach rechts: 1D-Diffusor, 2D-Diffusor, 'Cubicle', 2D-Diffusor, 'Skyline' mit einer Zylinderwelle in zwei Raumrichtungen entsprechend nach links und rechts oder oben und unten.

Zweidimensionale Diffusoren sind in beiden Dimensionen unterschiedlich strukturiert. Dadurch kann eine dreidimensionale Schallstreuung erreicht werden, vergleichbar mit einer Kugelwelle. Beide Strukturen lassen sich nach dem grundlegend gleichen Prinzip berechnen. Je nach Aufbau unterscheidet sich die räumliche Schallverteilung und klangliche Wirkung.

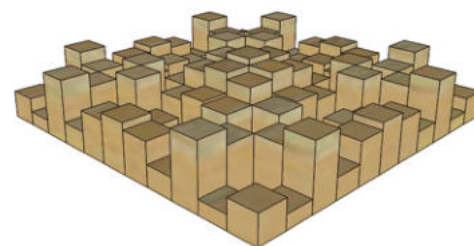


Abbildung 3: Skizze verschiedener Diffusoren: Von links nach rechts: 1D-Diffusor, 2D-Diffusor, 'Cubicle', 2D-Diffusor, 'Skyline'

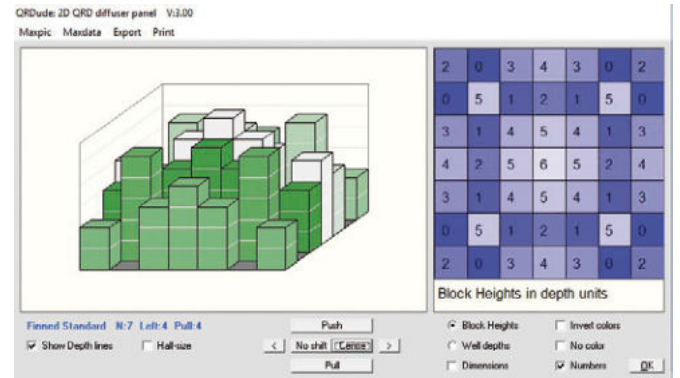
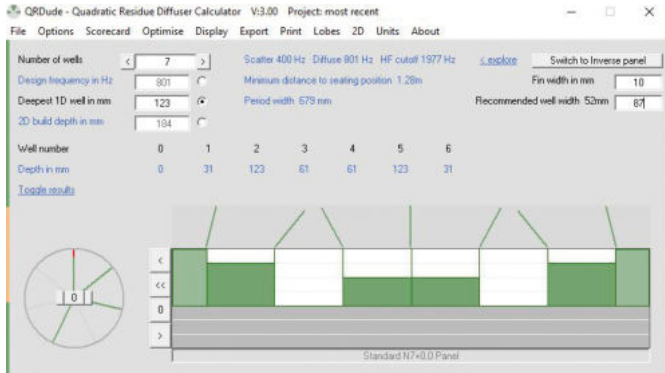


Abbildung 4: Beispiel für ein Freeware Tool zur Berechnung von QR-Diffusoren

## Gängige Berechnungsverfahren

Über die Jahre hinweg haben sich vor allem Diffusoren etabliert, die nach QR-Folgen aufgebaut sind (QRD oder Schröder-Diffusoren). Die grundlegende Idee hinter dieser Bauweise besteht in der räumlich gleich verteilten Streuung der Schallenergie. Durch den mathematischen Zusammenhang zwischen der Oberfläche des Diffusors und seiner richtungsabhängigen Streuwirkung (Abstrahlcharakteristik) kann die Oberflächenstruktur berechnet werden. Im Falle eines klassischen QRD ergibt sich eine Anordnung von definiert unterschiedlich dimensionierten Erhöhungen und Vertiefungen. Neben QR-Folgen gibt es weitere mathematische Folgen, die sich zum Aufbau von diffusen Oberflächen eignen, wie beispielsweise ‚Primary Root‘-Folgen oder ‚Maximum Length Sequences‘. Wie auch QR-Folgen bieten diese Aufbauarten Vor- und Nachteile in Bezug auf ihre akustische Wirkung.

Zum Aufbau eines Diffusors, zumeist eines klassischen QRD, finden sich in der heutigen Zeit eine Vielzahl von kommerziell oder kostenfrei verfügbaren Programmen und Tabellen (siehe Abbildung 4). Diese liefern dem Bediener ohne mathematisches und akustisches Hintergrundwissen eine meist korrekte Anordnung der Oberflächenstruktur eines einzelnen Diffusors. Die relevante Verteilung des Schalls im Raum wird allerdings nicht oder bestenfalls eingeschränkt dargestellt.

## Berechnungsverfahren für die räumliche Schallverteilung und ihre Schwierigkeiten

Die hinreichend bekannten und von Schröder für akustische Diffusoren publizierten und etablierten, analytischen Berechnungsverfahren zeigen den Zusammenhang zwischen der Oberflächenstruktur und der räumlichen Verteilung des Schalls. So lässt sich die Abstrahlcharakteristik einer Oberfläche im akustischen Fernfeld durch Fouriertransformation der Oberflächenstruktur berechnen. Gleichung 3 beschreibt dies beispielhaft für eine eindimensional strukturierte Oberfläche.

$$|p(\theta, \psi) \approx |A \int_S R(x) e^{jkx[\sin(\theta) + \sin(\psi)]} dx|$$

Dabei ist  $R(x)$  der Reflexionskoeffizient der Oberfläche,  $\theta$  der Winkel der Reflexion,  $A$  ein konstanter Faktor,  $\psi$  der Winkel der einfallenden Welle, und  $k$  die Wellenzahl.

Das Ergebnis lässt sich als Richtdiagramm darstellen, wie exemplarisch für einen Diffusor nach Schröder [4] in Abbildung 5 gezeigt. Diese frequenzabhängigen Diagramme veranschaulichen das räumliche Abstrahlverhalten der Oberfläche in einer Ebene.

Der Vorteil dieser Methode ist der mathematisch überschaubare Aufwand und der damit einhergehende, schnelle Überblick über die räumliche Wirkung der Oberflächenstruktur.

Ein Nachteil ist die Einschränkung auf das akustische Fernfeld und somit die Missachtung der Schallverteilung im Nahfeld. Das akustische Nahfeld unterscheidet sich in seiner räumlichen Schallverteilung deutlich vom Fernfeld, spielt gerade in kleinen Räumen eine Rolle und sollte daher in der Betrachtung nicht vernachlässigt werden.

Ebenfalls nachteilig ist, dass die ermittelten Richtcharakteristika in der Regel für die mittlere Achse eines Diffusors berechnet werden. Diese Betrachtung mag für eindimensionale Diffusoren ausreichend sein, jedoch wird eine dreidimensionale Betrachtung der Schallverteilung im Raum dadurch nicht ermöglicht. Gerade zum Verständnis und Design von zweidimensionalen Diffusoren ist dies allerdings von zentraler Bedeutung.

Moderne Simulationmöglichkeiten, wie beispielsweise die Finite Elemente Methode oder andere numerische Verfahren, bieten die Möglichkeit der Berechnung des zeitlichen und räumlichen Verhaltens von streuenden Oberflächen. Diese Verfahren sind komplex in ihrer Bedienung, stark abhängig von den verwendeten Materialparametern und sehr rechenintensiv.

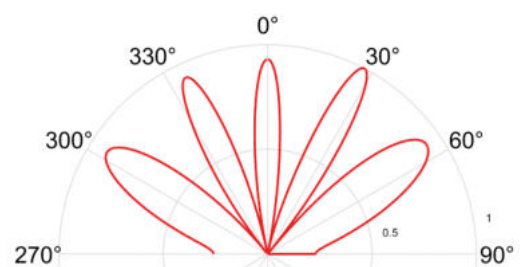


Abbildung 5: Abstrahlcharakteristik eines 1D Diffusors bei dessen Designfrequenz nach Schröder [4]

siv gerade für großflächige, zweidimensionale Strukturen [8]. Aus diesen Gründen werden solche Simulationen zum Design von Diffusoren nicht in großem Stil eingesetzt [9].

Es bleibt somit festzuhalten, dass die Berechnung des Fernfelds eines Diffusors in einer Ebene mit den gängigen, etablierten Verfahren schnell und einfach möglich ist. Eine Berechnung des Nahfelds oder zweidimensionaler Strukturen zur Betrachtung des dreidimensionalen Schallfeldes im Raum findet dabei nicht statt. Beide Informationen sind jedoch von großer Bedeutung für das Verständnis und das optimale Design einer diffusen Oberfläche.

## Neue Algorithmen zur dreidimensionalen Simulation

Für das Design eines Diffusors ist das Wissen über dessen akustisches Verhalten essentiell. Dies darf sich dabei nicht auf eine reine Betrachtung des Fernfelds und einer einzelnen Schnittebene beschränken. Gerade bei der Gestaltung von großflächigen Diffusoren ist die vollständige dreidimensionale Berechnung der Schallstreuung im Raum von elementarer Bedeutung für eine optimale, akustische Wirkung. Vor diesem Hintergrund war die Entwicklung neuer Simulationsmöglichkeiten für das Verständnis und optimale Design von Diffusoren dringend erforderlich.

Basierend auf der Superposition von akustischen Monopolen (siehe Gleichung 4) nach dem Huygensschen Prinzip kann die Ausbreitung der Schallwelle sowohl im Nah- als auch im Fernfeld für den dreidimensionalen Raum berechnet werden (siehe Gleichung 5) [10][11]. Der komplexe Schalldruck  $p(r_0, \Theta_0, \Phi_0)$  in jedem ‚Beobachtungspunkt‘ des Feldes im globalen Kugelkoordinatensystem  $M(r_0, \Theta_0, \Phi_0)$  berechnet sich somit aus der Dichte  $\rho$  und der Schallgeschwindigkeit  $c$  des Mediums, der Wellenzahl  $k$ , der Schallschnelle  $\underline{v}$  in Richtung der Oberflächennormalen und der Entfernung  $r$ .

$$\underline{p} = \frac{A}{r} e^{-jkr}$$

$$p(r_0, \Theta_0, \Phi_0) = \frac{j\rho ck}{2\pi} \int_{S'} \frac{\underline{v} e^{-jkr'}}{r'} dS'$$

Mit den nun vorhandenen Werkzeugen ist die genaue Berechnung, Visualisierung und Analyse des räumlichen Reflexionsverhaltens von Diffusoren möglich. Die Stärken und Schwächen verschiedener Diffusorbauweisen, sowohl einzelner Diffusoren, als auch großflächiger Anordnungen, können hierdurch eindeutig analysiert werden. Diese neuen Möglichkeiten sind somit der Schlüssel zu einem gezielten, je nach Anwendungsfall optimalen Design diffus streuender Oberflächen.

## Proof of Concept

Schröder beschreibt in seiner Veröffentlichung aus dem Jahr 1979 erstmals das Design eines Diffusors nach QR-Folgen und liefert den messtechnischen Beweis für die mathematischen Berechnungen. Auf Grundlage dieser Arbeit wurde das Abstrahlverhalten des darin beschriebenen 1D-QR-Diffusors mit den entwickelten Simulationsalgorithmen berechnet und visualisiert (siehe Abbildung 6).

Der Vergleich zwischen der ursprünglichen Berechnung von Schröder (siehe Abbildung 5) und den neu erarbeiteten Berechnungsmöglichkeiten (siehe Abbildung 6) veranschaulicht die Richtigkeit der neuen Simulationsalgorithmen. Die einfache Ermittlung des Richtdiagramms im Fern-

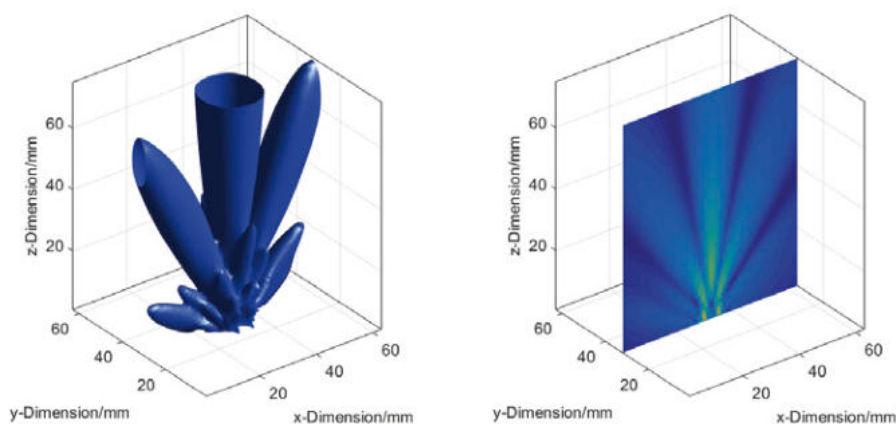


Abbildung 6: Simulierte räumliche Schalldruckverteilung eines 1D-Schröder Diffusors [4] bei der Designfrequenz von 11,5 kHz: Dreidimensionale Darstellung (links) und Schnittebene in der Mitte des Diffusors (rechts)

feld nach Gleichung 3 und Abbildung 5 ist nahezu identisch mit den Ergebnissen der räumlichen Simulation für die mittlere Ebene in x-z Richtung.

Ebenfalls werden die Vorteile der neuen Simulationsmöglichkeit deutlich: Zum einen kann die komplexe Schallverteilung bestehend aus Amplitude und Phase in drei Dimensionen beurteilt werden, zum anderen wird das Verhalten im Nahfeldbereich deutlich visualisiert.

## Erkenntnisse

Mit Hilfe der in Abschnitt 3.1 beschriebenen, neuen Simulationsmöglichkeiten kann nun das akustische Verhalten verschiedener Diffusoren eindeutig aufgezeigt werden.

## Ein- und zweidimensionale QRD

Eindimensionale Diffusoren sind eine gängige Möglichkeit der gezielten Schallstreuung. Durch eine Berechnung der einzelnen, linienförmigen Vertiefungen ist eine systematische und kontrollierbare Diffusionswirkung erzielbar. Die vergleichsweise einfache Bauweise ermöglicht einen großflächigen Aufbau der berechneten Segmenttiefen und dadurch eine teilweise homogene, räumliche Schallreflexion. Allerdings wird aufgrund der eindimensionalen Unregelmäßigkeiten der Schall nur in eine Raumebene gestreut, wie in Abbildung 7 dargestellt.

In Abbildung 8 ist deutlich zu erkennen, dass durch einen zweidimensionalen QRD eine dreidimensional ausgeglichene Schallstreuung erreicht werden kann. Im Vergleich zu der eindimensionalen Bauweise (siehe Abbildung 7) wird die räumlich erweiterte Streuwirkung deutlich sichtbar.

Es bleibt festzuhalten, dass eine homogene dreidimensionale Schallverteilung mit einem 2D-QRD erreicht werden kann, während ein 1D-QRD den Schall in zwei Raumrichtungen streut.

Beide Arten von Diffusoren bieten unterschiedliche Vor- und Nachteile. Die Wahl des richtigen Diffusors hängt dabei vom Anwendungszweck und den klanglichen Vorlieben ab. Eine optimale Diffusion bedeutet eine gleichförmige, räumliche und zeitliche Reflexion des Schalls in alle Raumrichtungen. Durch berechnete und genau gefertigte Diffusoren kann dies bestmöglich erreicht werden.

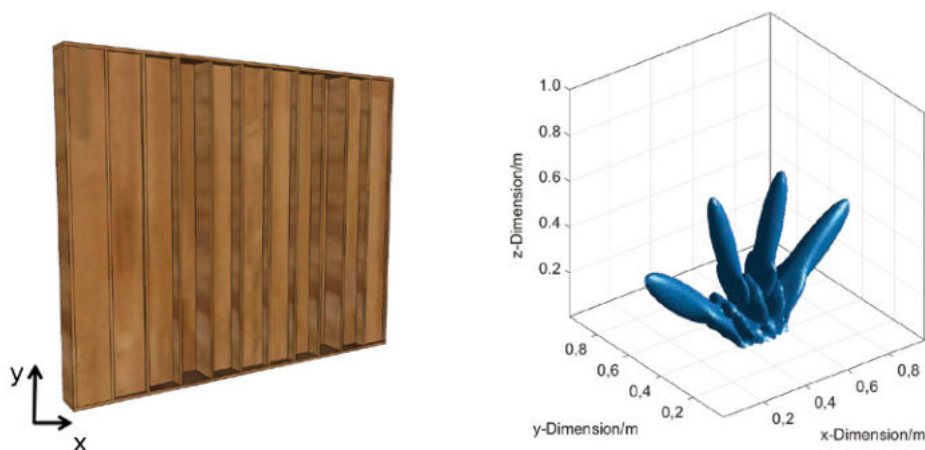


Abbildung 7: Eindimensionaler Diffusor und simulierte, dreidimensionale Schalldruckverteilung

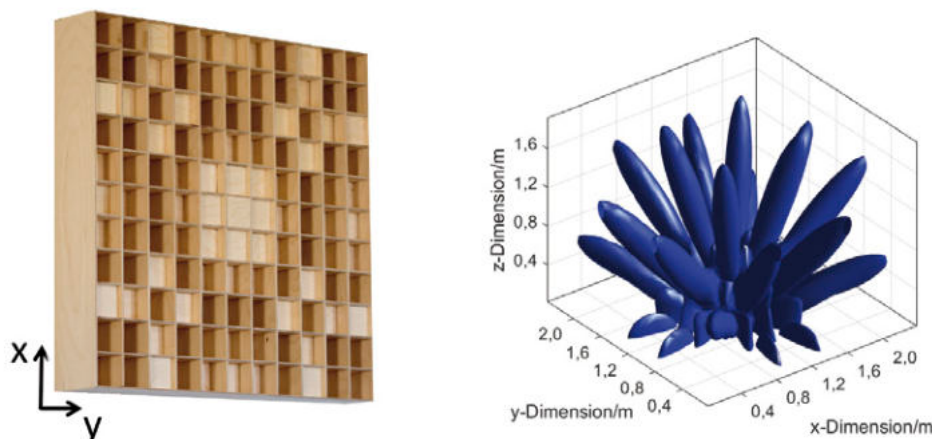


Abbildung 8: Zweidimensionaler Diffusor und simulierte, dreidimensionale Schalldruckverteilung

# RAM Serie

## Vielseitiges Referenz-Audio-Monitoring mit hoher Klangtreue

Ausgestattet mit modernster Technologie, audiophilem Klang und maßgeschneiderten Studio-Features ermöglichen die **Reference Audio Monitoring Systeme** das Umschalten zwischen Referenzmonitoren mit höchster Signalintegrität. Darüber hinaus bieten die Monitor-Controller eine Reihe zusätzlicher Funktionen wie Bluetooth-Konnektivität oder färbungs- und rauschfreie Hochstrom-Kopfhörerverstärker mit hohem Ausgangspegel. Damit liefert die RAM-Serie ein hohes Maß an Flexibilität und Klangtreue – all das zu einem erstaunlich günstigen Preis.



Ab sofort  
im Handel



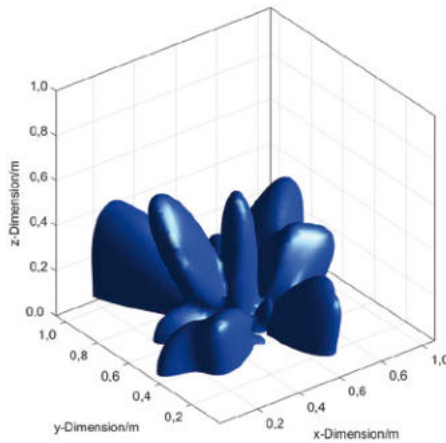
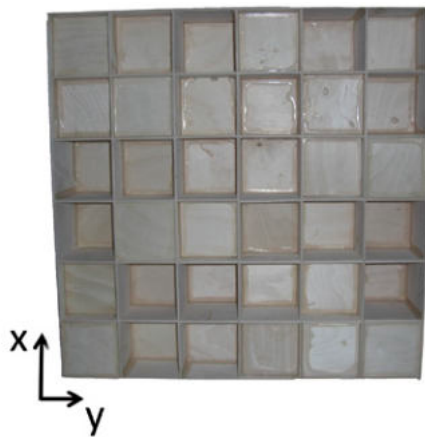


Abbildung 9: Beispiel für einen nicht korrekt designten ‚Diffusor‘ (links) und dessen ungleiche, räumliche Verteilung der Schallstreuung bei 3150 Hz (rechts)

## Auswirkungen falsch designer ‚Diffusoren‘

Durch die neuen Simulationswerkzeuge können auch die Auswirkungen von nicht korrekt aufgebauten ‚Diffusoren‘ untersucht und deren akustische Wirkung dargestellt werden. Exemplarisch wird deutlich, dass ein zufälliger oder ‚pseudo QRD‘ Aufbau mit beispielsweise in Abbildung 9 dargestellt sich von einem sauberen QRD Design (siehe Abbildung 8) deutlich unterscheidet.

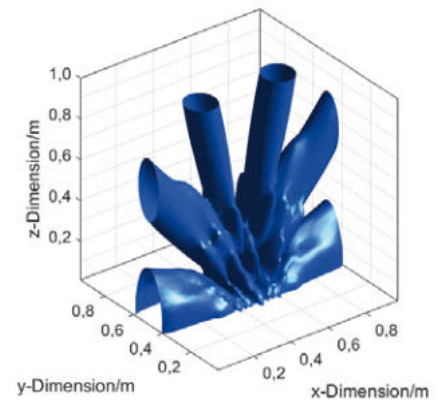
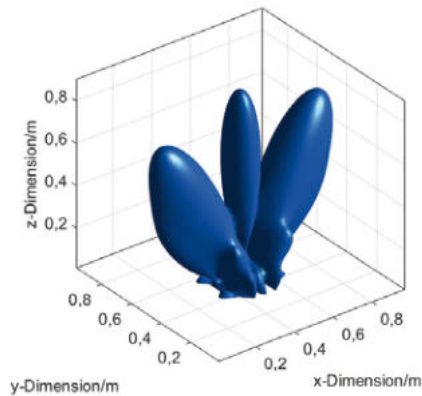
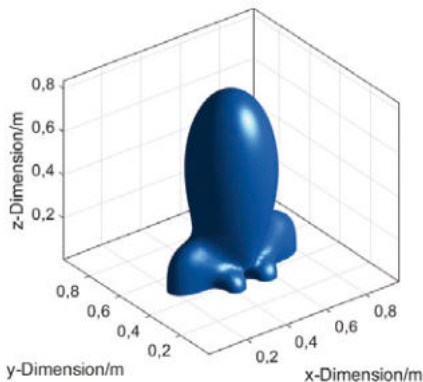


Abbildung 10: Beispiel für das frequenzabhängige Verhalten eines 1D QRD: Links:  $f = 1000$  Hz, Mitte:  $f = 2000$  Hz, Rechts:  $f = 4000$  Hz

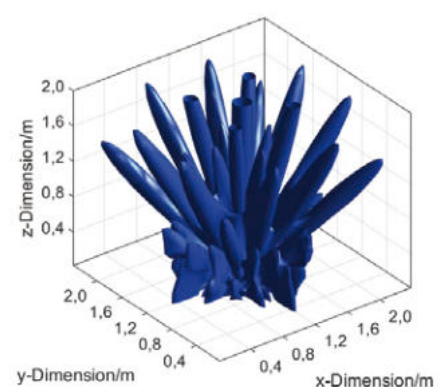
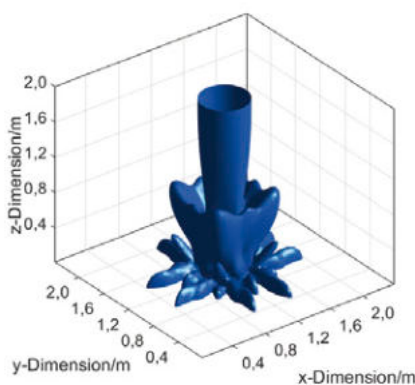
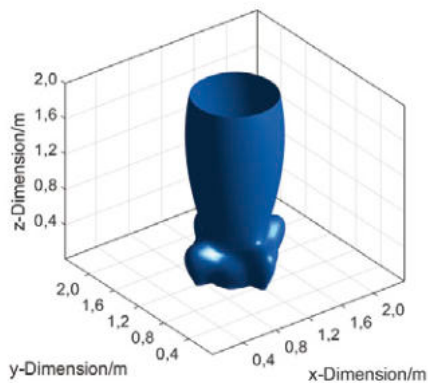


Abbildung 11: Beispiel für das frequenzabhängige Verhalten eines 2D QRD: Links:  $f = 1000$  Hz, Mitte:  $f = 2000$  Hz, Rechts:  $f = 4000$  Hz

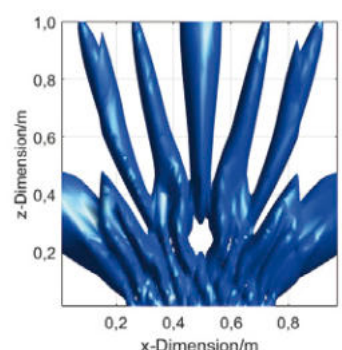
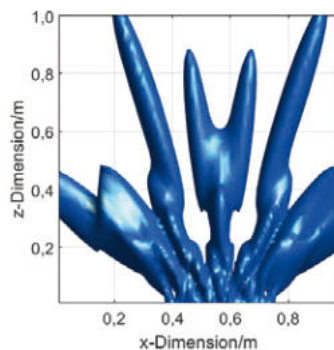
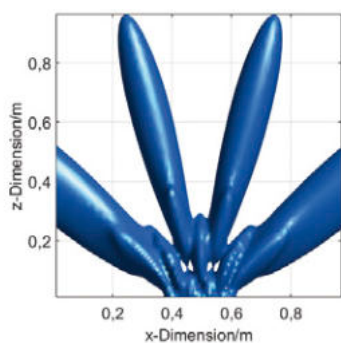


Abbildung 12: Auswirkung der flächigen Anordnung am Beispiel eines 1D Diffusors (QRD, 60 cm x 60 cm) bei 3150 Hz. Links: Ein Diffusor, Mitte: Zwei Diffusoren nebeneinander, Rechts: Drei Diffusoren nebeneinander

Abbildung 9 zeigt deutlich die unausgeglichenere Verteilung des Schalls in die verschiedenen Raumrichtungen. Dies bedeutet eine unterschiedliche, nicht kontrollierbare, stärkere oder schwächere Reflexion des Schalls in verschiedene Raumbereiche für unterschiedliche Frequenzen. Ebenfalls folgt daraus eine unkontrolliert räumliche Phasenlage der reflektierten Schallsignale. Ein solches Verhalten kann das Stereobild zwar subjektiv vergrößern, führt dadurch aber ebenso zu lokalen Färbungen und Verfälschungen des Klangbilds. Ein kühler, flacher und technischer Klang ist die Folge und entspricht nicht der akustischen Wirkung einer sauberen, gleichförmig diffusen Schallverteilung. Die Ursache für das unerwünschte, akustische Verhalten ist in der Komplexität des Gesamtaufbaus eines Diffusors zu suchen. Der Zusammenhang der verschiedenen Einflussgrößen (siehe Unterabschnitt 2.1) ist elementar, sodass Fehler im Design das akustische Abbild maßgeblich beeinflussen können.

## Frequenzabhängigkeit von Diffusoren

Das akustische Verhalten eines Diffusors ist frequenzabhängig. Dies lässt sich ebenfalls durch die neu entwickelten Simulationsmöglichkeiten deutlich aufzeigen, wie in den Abbildungen 10 und 11 exemplarisch dargestellt. Das Design eines optimalen Diffusors ist somit abhängig von dem gewünschten Frequenzbereich. Die frequenz-

abhängige Wirkung im Raum ist ganzheitlich anhand seines Einsatzzweckes zu betrachten. Die dreidimensionale Analyse der frequenzabhängigen Eigenschaften ist ein wertvolles Werkzeug bei dieser Entscheidungsfindung.

## Großflächige Diffusoren

Das Reflexionsverhalten eines Diffusors ist maßgeblich bedingt durch dessen Aufbau. Das richtige Design, die korrekte Anordnung und Kombination einzelner periodischer Elemente sind entscheidend für

eine optimale Wirkung. Der Einsatz von großflächigen Diffusoren ist in der Praxis üblich und erwünscht, allerdings eine spezielle und keinesfalls triviale Herausforderung. Die Berechnung der dreidimensionalen Schallstreuung von großen Diffusorflächen war allerdings aufgrund der Komplexität dieser Aufgabenstellung bisher nicht gängig.

Durch die neuen Analysemöglichkeiten kann das akustische Verhalten von beliebigen Diffusoranordnungen untersucht werden, wie beispielhaft in den Abbildungen 12 und 13 veranschaulicht.

»DURCH DEN REF 10 KLINGT ALLES SOWOHL LAUTER ALS AUCH DYNAMISCHER, WAS FÜR EINEN MASTERING-INGENIEUR WIE DER HEILIGE GRAL IST.«

Matt Colton, Alchemy Mastering London



REF 10



Der MUTEK REF 10 ist ein außergewöhnlicher Referenztaktgenerator, der hochpräzise 10 MHz Taktsignale mit branchenführend niedrigem Phasenrauschen (bzw. Jitter) erzeugt, um digitale Wiedergabegeräte maßgeblich zu verbessern. Als Kern der digitalen Wiedergabekette erschließt sich mit dem REF 10 das absolute Optimum in

Bezug auf Signaltreue, Klangqualität und Taktstabilität mit einem dynamischeren, transparenteren Klangbild sowie nie gehörter Räumlichkeit und Detailliertheit. So können kritische Entscheidungen im Mix- oder Masteringprozess mit größtmöglicher Überzeugung getroffen werden.

Jetzt mehr erfahren:  
www.mutec-net.com  
Fon: +49 (0)30 746880-0

MUTEK



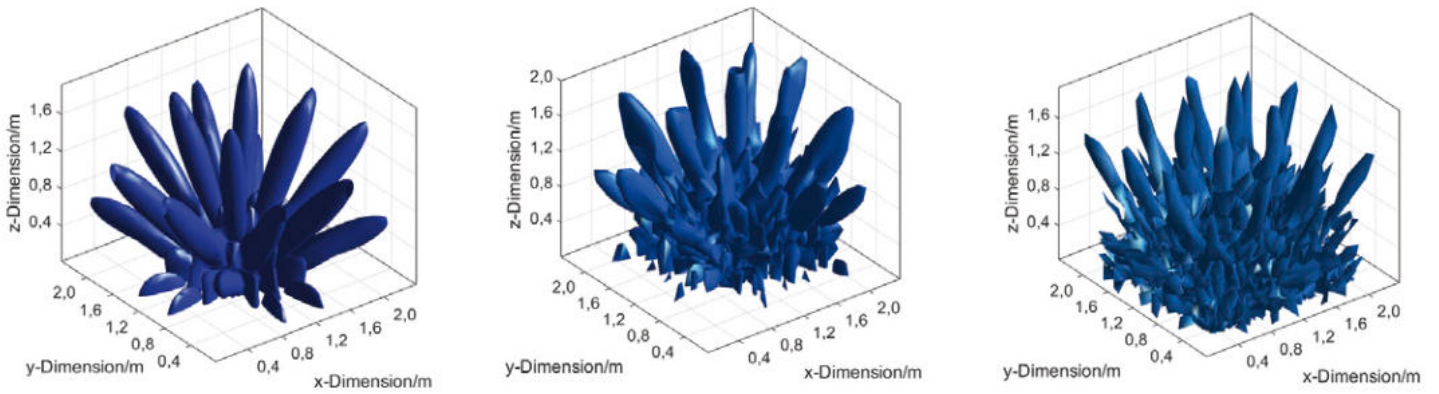


Abbildung 13: Auswirkung der flächigen Anordnung am Beispiel eines 2D Diffusors (QRD, 60 cm x 60 cm) bei 3150 Hz. Links: Ein Diffusor, Mitte: 2x2 Diffusoren nebeneinander, Rechts: 3x3 Diffusoren nebeneinander

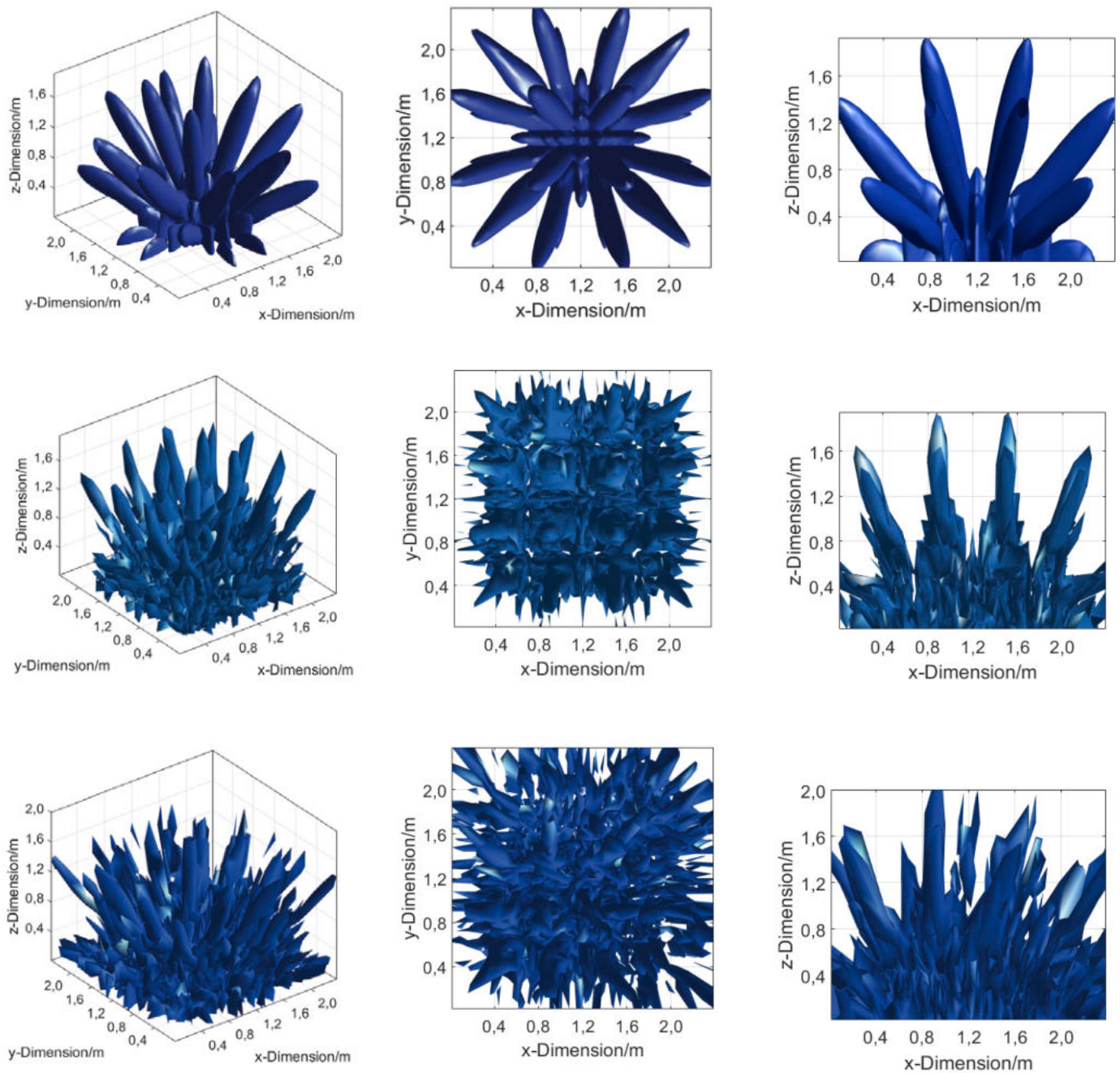


Abbildung 14: Exemplarischer Vergleich verschiedener Diffusor Anordnungen. Erste Zeile: Ein Diffusor, zweite Zeile: Feld aus 3x3 identischen Diffusoren, dritte Zeile: Feld aus 3x3 Diffusoren mit phasengesteuerter Optimierung

Werden einzelne Diffusoren miteinander kombiniert, steigt prinzipiell die Anzahl der streuenden Schallkeulen im Vergleich zum Einzelelement. Werden einzelne Diffusoren zu einer flächigen Anordnung zusammengesetzt entspricht die resultierende Abstrahlcharakteristik dieser Anordnung nicht mehr dem zuvor berechneten akustischen Reflexionsmuster des einzelnen Diffusors. Maßgeblich dafür ist neben der Interferenz der einzelnen Diffusorelemente auch die anordnungsbedingte Ausbildung von zusätzlichen Schallkeulen („grating lobes“). Allerdings kann dies auch zu unerwünschten Effekten führen, wie beispielsweise der Fokussierung der Schallenergie im Raum. Ebenfalls können Nahfeldeffekte auftreten, wie zum Beispiel Bereiche, in die kein Schall gestreut wird. Dies bedingt lokale, frequenzabhängige Lautstärke-schwankungen innerhalb des nahen Schallfeldes. Diese Effekte wirken einer homogenen, räumlichen Schallverteilung entgegen und sollten daher bei der Gestaltung diffuser Flächen bedacht und vermieden werden.

Das so generierte Wissen über das Verhalten diffus streuender Oberflächen eröffnet neue Möglichkeiten im Aufbau und Design moderner, je nach Anwendungsfall, optimierter Diffusoren; zeigt andererseits aber auch das Gefahrenpotential bei nicht sachgemäßer Berechnung.

## Optimierte Diffusoren für den korrekten Einsatz im Raum: Diffusorsysteme

Die auf den vorherigen Seiten kurz beschriebenen Methoden und Erkenntnisse zeigen, dass durch optimal designte Diffusoren das Streuverhalten des Schalls definiert werden kann. Klassische QRDs bieten dabei Vorteile in der Gleichverteilung der Schallenergie im Raum. Allerdings können bei großflächigen Anwendungen, welche für eine optimale akustische Wirkung den in der Praxis typischen Fall darstellen, unerwünschte Effekte auftreten. Dadurch unterscheidet sich das gewünschte akustische Verhalten von der

tatsächlichen Wirkung. Dadurch wird klar, dass eine einfache Aneinanderreihung gleicher Diffusoren nicht zu einem homogenen Schallfeld führt. Durch die nun vorhandenen Simulationsmöglichkeiten können diese Probleme erstmals klar aufgezeigt werden. Daran logisch anknüpfend stellt sich die Frage nach den passenden Lösungen der nun deutlich erkennbaren Problematik bei Kombination einzelner Diffusoren. Ein Ansatz zum optimalen Design der großflächigen Verwendung von Diffusoren



► NEUMANN.BERLIN

[NEUMANN.COM/50YEARS-U87](http://NEUMANN.COM/50YEARS-U87)



# U87

THE RHODIUM EDITION

CELEBRATING 50 YEARS OF THE CLASSIC

ist der Einsatz von mathematischen Modulationsverfahren [9]. So kann beispielsweise im Vergleich zu herkömmlichen QRDs durch die exakt berechnete Anordnung von phasenverschobenen Elementen eine gezielte, mehrdimensional homogene Schallstreuung im Raum erreicht werden (siehe Abbildung 14). Das sich ausprägende Klangbild solcher komplexer Diffusorsysteme ist aufgrund der berechneten, kontrollierten Amplituden- und Phasenlage hörbar klar, warm und dynamiktreu.

## Wie und warum wirkt Diffusion im Raum

Durch den theoretischen Hintergrund kann ein gezieltes Diffusordesign erfolgen. Im Zusammenspiel von Akustik und Optik können somit Räume mit professionellem Anspruch realisiert werden. Im Hinblick auf ein gesamtheitliches, akustisches Konzept ergibt sich die Frage, warum sich der Höreindruck durch den gezielten Einsatz von Diffusoren verändert und wie dies auch im Studio gewinnbringend eingesetzt werden kann.

## Evolutionärer und psychoakustischer Ansatz

Betrachtet man die Evolution des Menschen und seine Lebensumgebung wird klar, dass sich das heutige, akustische Umfeld generell nur recht gering von dem unserer Vorfahren unterscheidet. Bereits der Urmensch lebte zum Schutz vor Witterung und Feinden in Höhlen. Diese Lebensweise ist prinzipiell auch heute noch aktuell, denn die meiste Zeit verbringen wir in Räumen. Somit wird auch klar, dass sich unsere akustische Sinneswahrnehmung und Hörerfahrung seit tausenden Jahren epigenetisch kaum verändert hat. Der menschliche Körper reagiert sehr stark auf die subtilen, unbewusst wahrgenommenen Höreindrücke seiner Umwelt. So erkennt beispielsweise auch der ungeübte Hörer allein aufgrund eines Höreindrucks sehr schnell, ob ein Raum

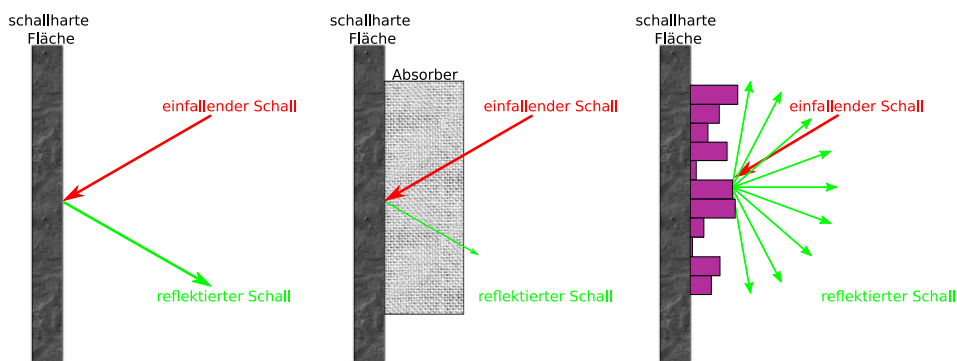


Abbildung 15: Schematische Darstellung von geometrischer Reflexion, Absorption und Diffusion

groß oder klein ist. Das menschliche Gehirn verarbeitet dazu die komplexen Informationen der akustischen Reflexionsmuster, wie zeitliche Abfolge und Amplitude des Schallereignisses. Ebenfalls ist der Mensch in der Lage durch die Auswertung akustischer Informationen Abstände einzuschätzen und sich im Raum zu orientieren. Akustische Signale werden rein aufgrund ihres Spektrums und ihrer Impulshaftigkeit als potentielle Gefahren eingeordnet und durch das ausgeprägte Richtungshören kann der Ursprung der Schallquelle recht genau lokalisiert werden. Akustische Umgebungen mit kaum existierenden Reflexionen, wie stark absorptive, akustische Messräume, sind daher unangenehm. Die raumtypischen Höreindrücke fehlen, unser Gehirn erwartet diese jedoch aufgrund der optischen Information.

Dieser kurze und beispielhafte Exkurs in die psychoakustische Hörwahrnehmung des Menschen verdeutlicht, dass unsere aurale Sinneswahrnehmung zwar zum Großteil unbewusst geschieht, allerdings sehr stark durch die komplexen, akustischen Informationen der Schallquelle und deren Wellenausbreitung in Räumen beeinflusst wird. Weiterhin wird deutlich, dass alle Arten von natürlichen Räumen per se ein Reflexionsmuster aufweisen, so dass ein Fehlen dieser typischen Höreindrücke immer eine ungewohnte, fremde und unangenehme, unnatürliche Atmosphäre schafft.

Dieses Wissen ist die Grundlage für die Vorgehensweise, wie Räume gestaltet werden können, um einen angenehmen,

akustischen Höreindruck zu erschaffen. Aufgrund der evolutionären Voraussetzungen wird deutlich: Ein Fehlen der als natürlich empfundenen Reflexionseigenschaften eines Raumes kann nicht zu einem natürlichen Raumklang und Hörereignis führen. Technisch gesprochen bedeutet dies zwangsläufig, dass sehr stark absorptive Räume a priori keinen natürlichen Klangcharakter prägen können. Dadurch wird klar, dass für einen als angenehm empfundenen Raumklang immer ein Reflexionsverhalten des Raumes gegeben sein muss. Um dieses Verhalten zu beeinflussen, werden reflektierende Eigenschaften des Raumes benötigt.

## Diffusion im musikalischen Umfeld

In professionell gestalteten Räumen kann durch den konzeptionellen Einsatz von Absorption, geometrischer Reflexion und Diffusion (siehe Abbildung 15) ein akustisch definiertes Gesamtbild erschaffen werden. Speziell das Zusammenspiel von diffusen Flächen und Musik macht die Wirkung von zeitlich und räumlich homogen gestreutem Schall erfahrbar. Schallstreuende Flächen spielen im Design von Räumen mit musikalischem Hintergrund immer eine Rolle, ob beabsichtigt oder nicht. Dieser Gedankengang sollte bereits beim Instrumentenbau beginnen, denn rein historisch betrachtet fand die Evolution von Musikinstrumenten nie in rein absorptiven Umgebungen statt. So wird auch heute noch der Klang eines Flügels, einer Geige oder auch eines Schlag-

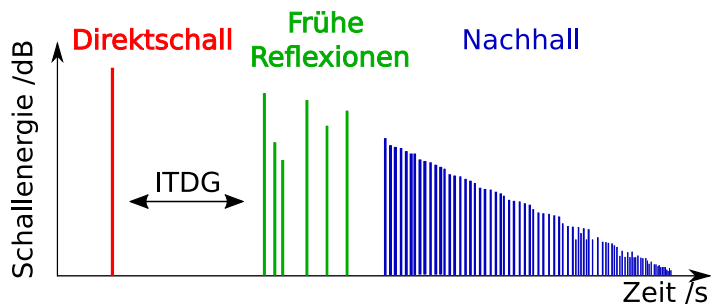


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Schallenergie über der Zeit („Energy Time Curve“, ETC)

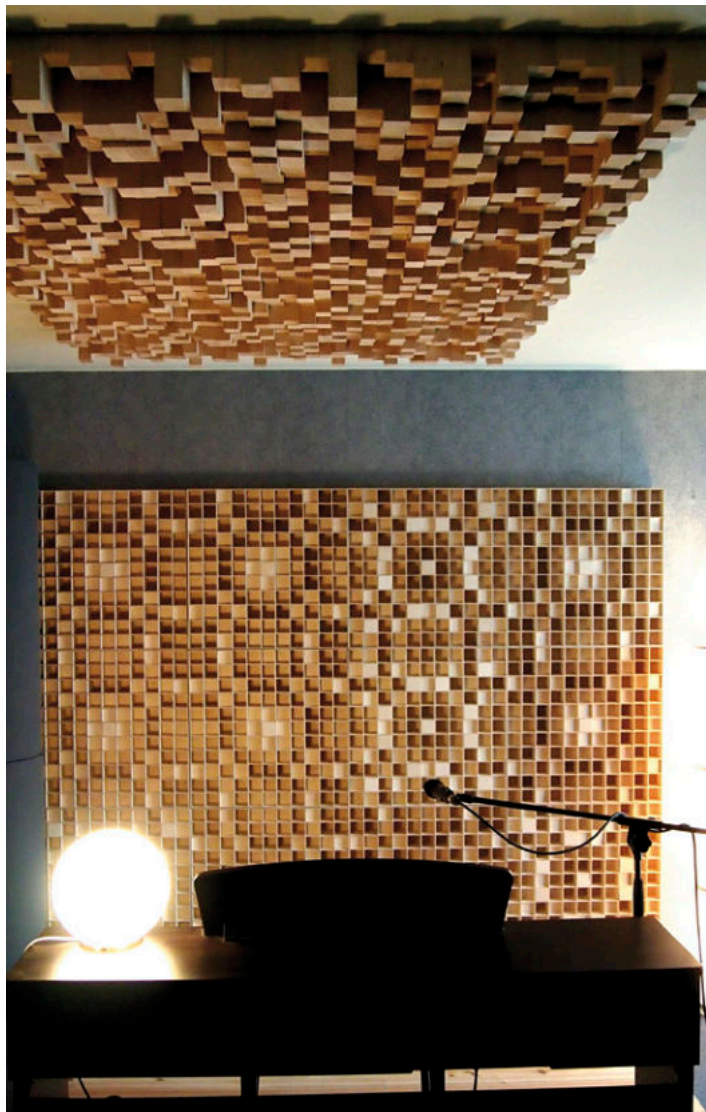


Abbildung 17: Beispielhafte Gestaltung einer Aufnahmesituation mit berechneten Diffusorflächen

zeugs in seiner Fertigung in akustisch unspezifischen, allgemeinen Räumen beurteilt und verändert. Weiterhin fehlt beispielsweise der Stimme einer Sängerin in stark absorbierenden Räumen das akustische Feedback des Raumes, was sich unmittelbar auf die Art des Gesangs auswirkt. Im letzten Gedanken ist eine Verfälschung des gehörten Audioabbilds in einer Tonstudieregie durch beispielsweise Kammfiltereffekte auch auf ein Fehlen gezielter diffuser Elemente zurückzuführen.

Will man den Einfluss von Diffusion technisch greifbar machen, steht man immer vor der Herausforderung eine physikalische Größe mit dem subjektiven Eindruck zu verknüpfen. Anhand des wissenschaftlichen, objektiven und subjektiven Vergleichs verschiedener Konzertsäle wurde herausgearbeitet, dass vereinfacht ausgedrückt ein an beiden Ohren, in einem kurzen Zeitfenster unkorreliertes, somit möglichst diffuses, den Zuhörer einhüllendes Schallfeld direkt mit einem wohlklingenden Musikempfinden zusammenhängt [12]. Diese Erkenntnis zeigt auch, dass diffuse Schallreflexionen aufgrund der zeitlich und räumlich homogenen Schallstreuung die Lebendigkeit und Natürlichkeit der Instrumente im Raum stärker zum Tragen bringen, als die geometrischen, ‚gebündelten‘ Reflexionen schallharter Flächen. Der Einfluss von Diffusion auf das Hörerlebnis wird technisch betrachtet am ehesten durch die zeitliche Entwicklung der Schallenergie im Raum abbildbar. Dabei lassen sich einzelne, akustisch relevante Bereiche definieren, wie die zeitliche Lücke zwischen Direktsignal („Initial Time Delay Gap“, ITDG) und ersten Reflexionen der akustischen Signale im Raum und der Bereich der Hallfahne. Zur Veranschaulichung dient die schematische Abbildung 16. Die Intensität und zeitliche Abfolge der Reflexionen bestimmt den Höreindruck. Das zeitliche Auftreten und die Gestalt der einzelnen, frühen Reflexionen definiert maßgeblich die Klangfarbe des Raumes, während die ITDG zusammen mit den dichten Reflexionen der Hallfahne vorwiegend die klangliche Tiefe widerspiegeln. Dies bedeutet, dass sich durch die Gestaltung dieser Eigenschaften das akustische Abbild eines Raumes gezielt steuern lässt. Während akustische Absorption die Amplitude aller Reflexionen verringert und somit den Raumklang dämpft, kann durch den korrekten Einsatz von diffus streuenden Flächen sowohl die Energie der frühen Reflexionen verringert werden, als auch ein ausgeglichener, reichhaltiger Nachhall ermöglicht werden [13]. Beide akustischen Werkzeuge sind elementar bei der Gestaltung des gewünschten Raumklangs und haben sich über die Jahre im Design verschiedener Räume etabliert. So basiert der Aufbau einer möglichst neutralen akustischen Tonstudio-Regie nach dem ‚live end dead end (LEDE)‘ Prinzip eben auf der gezielten Kombination von energiearmen frühen Erstreflexionen und dichten, späten Reflexionen im Haas-Bereich [14].

Im Kontrast dazu ist in einem Aufnahmerraum nicht nur der Nachhall zu beachten, sondern auch die Klangfärbung der Aufnahme durch den Raum. In einem akustisch überlegten Raumdesign unterstützt der Raum den Musiker bei der Aufnahme, so dass dieser mit dem Raum spielt und nicht gegen diesen. Dafür verantwortlich zeigt sich vor allem die richtige Gestaltung der frühen akustischen Reflexionen. Dadurch erhöht sich zum einen das räumliche Spielgefühl, zum andern beginnt hier bereits die Bearbeitung der Aufnahme. Durch die menschliche Interaktion und die akustische Interferenzen wird in dieser frühen Phase der Aufnahme bereits ein direktes EQ-ing vorgenommen. Im schlimmsten Fall ist dies durch dumpfe, unausgewogene, flache Aufnahmen erkennbar, im be-

sten Fall durch einen natürlichen, dynamischen Klang. So können beispielsweise durch das geschickte Design und die Platzierung von Diffusoren bei der Aufnahme die natürlichen Gesangsformanten unterstützt werden, was Sänger/in und Ingenieur gleichermaßen hilft. Abbildung 17 zeigt eine solche, mögliche Gestaltung mit individuell angepassten Diffusorflächen. Schlussendlich ergeben sich durch die Möglichkeiten mit Diffusion die frühen Reflexionen im Raum gezielt zu gestalten und somit nutzbar zu machen, anstatt zu absorbieren, in der Aufnahmesituation einzigartige, kreative Herangehensweisen an ein außergewöhnliches, akustisches Gesamtbild der Musik [15]. Räume sind somit akustische Instrumente und die Schnittstelle zwischen Information und Emotion. Die Gestaltung der Raumakustik ist als Verbindung zwischen Wissenschaft und Kunst zu verstehen.

## Zusammenfassung

Absorption, geometrische Reflexion und Diffusion sind die Werkzeuge bei der akustischen Gestaltung von Räumen. Die Herausforderung liegt dabei in der Kontrolle und im gezielten Einsatz dieser Eigenschaften. Diffusion ist die zeitlich und räumlich homogene Streuung von Schall. Dies ist dabei kein zufälliges Produkt, sondern kann durch die Berechnung von Oberflächenstrukturen gezielt designt werden.

Durch neue Simulationsmöglichkeiten kann das dreidimensionale, frequenzabhängige, akustische Verhalten diffuser Flächen im Nah- und Fernfeld berechnet und visualisiert werden. Dadurch wird der Unterschied zwischen verschiedener Diffusorbauweisen deutlich, als auch die Auswirkungen eines fehlerhaften Diffusor-Designs. Weiterhin wird klar, dass bei Kombination einzelner Diffusorelemente hin zu großen Flächen das ursprünglich berechnete Abstrahlverhalten des einzelnen Diffusorelements verloren geht. Daher werden komplexe mathematische Ansätze, wie die gezielte Phasenmodulation

einzelner Diffusorsequenzen, zur Gestaltung von optimal diffusen Flächen im professionellen Umfeld benötigt.

Die Wirkung von Diffusion auf den Menschen ist in der evolutionären Ausprägung der auralen Sinneswahrnehmung zu suchen. Daher wird Diffusion in der heutigen Zeit im musikalischen Umfeld als maßgeblich für einen angenehmen Raumklang empfunden und ist zentraler Bestandteil der professionellen Raumakustik von Konzerthäusern, wie auch Regie- und Aufnahmeräumen.

## LITERATUR

- [1] Rundfunk, Norddeutscher: Elbphilharmonie: Großer Saal, großer Klang? 2017. – <http://www.ndr.de/kultur/elbphilharmonie/Elbphilharmonie-So-klingt-die-Akustik-im-Saal,akustik100.html>
- [2] Massenburg, George: Blackbird Studios Nashville, Studio C. 2017. – <https://www.blackbirdstudio.com/studio-c>
- [3] Schroeder, M. R.: Diffuse sound rezeption by maximum-length sequences. In: The Journal of the Acoustical Society of America 57 (1975), Nr. 1, S. 149–150
- [4] Schroeder, M. R.: Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: More lateral sound diffusion. In: The Journal of the Acoustical Society of America 65 (1979), Nr. 4, S. 958–963
- [5] Schroeder, M.R.: Phase gratings with suppressed specular rezeption. In: Acta Acustica united with Acustica 81 (1995), Nr. 4, S. 364–369
- [6] Kuttruff, H.: Sound absorption by pseudostochastic diffusers (Schroeder diffusers). In: Applied Acoustics 42 (1994), Nr. 3, S. 215–231
- [7] D'Antonio, Peter; Konnert, John H.: The rezeption phase grating diffusor: design theory and application. In: Journal of the Audio Engineering Society 32 (1984), Nr. 4, S. 228–238
- [8] Kohout, B.; Gobel, G.; Ruiter, Nicole V.: Finite element model of transducer array systems for 3d ultrasound computer tomography. In: SPIE Medical Imaging, 2011, S. 79680O–79680O
- [9] Cox, Trevor J.; D'Antonio, Peter: Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application. 2009
- [10] Akustik, Deutsche G.: DEGA-Empfehlung 'Akustische Wellen und Felder'. 2006. – <https://www.dega-akustik.de/fachausschuesse/lehre/arbeitsgruppen/akustische-wellenundfelder/>
- [11] Kohout, Benedikt: Analyse, Simulation und Entwurf eines 3D-Ultraschall-Computertomographen für Diagnose und Therapie. Verlag Dr. Hut, 2014
- [12] Beranek, Leo: Concert Halls and Opera Houses - Music, Acoustics, and Architecture. 2004
- [13] Angus, James A. S.: The Effects of Specular Versus Diffuse Rezeptions on the Frequency Response at the Listener. In: J. Audio Eng. Soc 49 (2001), Nr. 3, S. 125–133
- [14] Davis, Don; Davis, Chips: The LEDE- Concept for the Control of Acoustic and Psychoacoustic Parameters in Recording Control Rooms. In: J. Audio Eng. Soc 28 (1980), Nr. 9, S. 585–595
- [15] Swedien, Bruce: In the Studio with Michael Jackson. 2009

# Wenn nur noch die Musik eine Rolle spielt...

... dann arbeiten Sie  
mit **professionellen  
Workstations** von  
Thomas-Krenn.



# THOMAS KRENN®

+49 (0) 8551.9150-300

[thomas-krenn.com/studio](https://www.thomas-krenn.com/studio)