

Problemzone?

Der gute Ton: Raumakustik – Grundlagen und Tipps

Von Manfred Zollner; Bearbeitung: Christoph Rocholl

Die Raumakustik ist das Teilgebiet der Akustik, das sich mit der Hörsamkeit in Räumen befasst (*Hörsamkeit = wie eignet sich ein Raum für Sprach- und Musikbeschallung – passend dazu siehe die DIN 18041, die Redaktion*). Flankiert wird sie von der Psychoakustik (wie klingt es?) und der Physik (wie optimiert man Echos und Nachhall?). Für den Musiker ist die Raumakustik vor allem bei Übungs- und Studioräumen von Bedeutung. Bei Konzertsälen zwar auch, doch da lässt sie sich weniger verändern. Im Übungsraum oder Tonstudio verzichten Anwender gerne auf dröhnende Bässe, wünschen allgemein einen „ansprechenderen Klang“. Weil Klangempfinden eine sehr subjektive Sache ist, müssen neben der physikalischen Akustik noch einige Aspekte der Gehörakustik berücksichtigt werden. Die folgende Darstellung gibt einen kurzen Überblick über die Entstehung und Wahrnehmung des Raumklangs und Hinweise zur Optimierung.

Jede Quelle strahlt Schall in alle Richtungen ab, allerdings nicht mit gleicher Stärke. Nur die Abstrahlung sehr tiefer Frequenzen ist meistens ungerichtet (kugelförmig), bei mittleren und hohen Frequenzen erfolgt die Abstrahlung bündelnd. Trifft Schall auf eine Begrenzungsfläche (Wand, Boden, Decke, Hindernisse), so wird er reflektiert. Nicht zu 100 Prozent, weil ein kleiner Teil der Schallenergie bei jeder Reflexion verloren geht. Der verloren gegangene Anteil wird durch den Absorptionsgrad α gekennzeichnet: $\alpha = 100$ Prozent bedeutet, dass gar nichts reflektiert wird (alles wird absorbiert), $\alpha = 0$

Prozent bedeutet, dass alles reflektiert wird. „Verloren“ geht ein Teil der Schallenergie durch Umwandlung in Wärme und durch Weiterleitung in angrenzende Räume. Jede reflektierte Schallwelle trifft nach kurzer Zeit wieder auf eine Begrenzungsfläche, wird dort wieder reflektiert und so weiter. Je kleiner der Absorptionsgrad, desto stärker die Reflexionen, die man in ihrer Summe Nachhall (oder Hall) nennt. Weil Betonwände Schall fast zu 100 Prozent reflektieren, ist es für die möglichst hallarme Wiedergabe erforderlich, Begrenzungsflächen mit Schall-Absorbern zu belegen. Hier gibt es drei Arten:

wirksame, unwirksame und gefährliche. Gefährlich können Absorber sein, weil sie schnell entflammbar sind und dabei giftige Gase erzeugen. Oder weil sich der ungeeignete (und unerlaubte) Plastikdübel aus der Decke löst und durch die herunterfallende Bassfalle im schlimmsten Fall Personen zu Schaden kommen. Deshalb: Vorschriften beachten, schwer entflammbare Materialien verbauen, Fachleute befragen. Gesundheitsgefährdend können Absorber sein, in denen sich Kondenswasser bildet, das Schimmelpilzkulturen hervorbringt (Bauphysiker befragen). So gut wie unwirksam (und meist aus den genannten Gründen gefährlich) sind „überlieferte Hausrezepte“ wie beispielsweise Eierkartons an den Wänden oder gar Styropor. Eierkartons mögen ähnlich aussehen wie Schaumstoffpyramidenmatten, sie haben aber ganz andere Absorptionseigenschaften (und sind leicht entflammbar). Und Styropor ist ein Wärmeisolator, kein Schallabsorber. Teppiche am Boden und an den Wänden stellen einen wirksamen Höhenabsorber dar – Bässe lassen sich davon nicht beeindrucken. Es reicht folglich nicht, irgendetwas zu bedämpfen (das aber total).

Nachhallzeit

Die Reflexions- und Absorptionsgrade aller Materialien sind frequenzabhängig, und der im Raum entstehende Nachhall ist es deshalb auch. Wenn die Dauer des Nachhalls (die Nachhallzeit) stark von der Frequenz abhängt, klingt der Raum ungünstig. Dann sollten Absorber eingebaut werden, die in den Frequenzbereichen wirken, in denen der Nachhall zu lang ist.

Eine einfache Größe zur Beschreibung des Nachhalls ist die Nachhallzeit. Damit ist die Zeitdauer gemeint, die verstreicht, bis nach dem Beschallungsende der Schallpegel um 60 Dezibel abgenommen hat. Zur Beschallung wird gerne ein spezielles Rauschen verwendet (Rosa Rauschen mit $1/f$ -Leistungsdichte), wiedergegeben über eine geeignete (Aktiv)Box. Im betreffenden Raum steht ein Mikrofon samt Messgerät, mit dem der Schallpegel dokumentiert wird. Beispiel: Während das Rauschen eingeschaltet ist, entsteht im Raum ein Schallpegel von 80 Dezibel. Nach dem Abschalten des Rauschens nimmt der Pegel über die Zeit ab. Dauert es beispielsweise 1,8 Se-

kunden, bis der Schallpegel auf 20 Dezibel abgenommen hat (60 Dezibel Differenz), beträgt die Nachhallzeit 1,8 Sekunden. Einen Schallpegel von nur 20 Dezibel wird man in den meisten Fällen nicht messen können, weil in jedem Raum Störgeräusche vorhanden sind und die Nebengeräusche bereits oberhalb von 30 Dezibel liegen. Als Alternative wird ein 30-Dezibel-Abfall gemessen und die Dauer mit dem Faktor 2 multipliziert (oder 20-Dezibel-Abfall, Faktor 3).

Die Messung der Nachhallzeit sollte selektiv erfolgen, terzbreit oder oktavbreit. Das Ergebnis ist der Frequenzgang der Nachhallzeit, wie in Abb. 1 dargestellt. Die Nachhallzeit muss nicht für alle Frequenzen exakt gleich sein, sie darf insbesondere von tiefen zu hohen Frequenzen leicht fallen. Starke Variationen, wie im linken Bild unter 300 Hz, sind ungünstig. Es sei nochmals betont, dass die Abbildung kein Spektrum und keinen Frequenzgang darstellt. Nachhallmessungen führt man nicht durch, indem am Analysator das Rauschspektrum dargestellt wird – es geht um die Geschwindigkeit, mit der nach dem Abschalten der Pegel abfällt. Und zwar der Schallpegel, nicht der Pegel des Mittlers. Für jede Pegelmessung ist eine Mittelung erforderlich, deren Zeitkonstante beispielsweise bei der Mittelungsart „Slow“ eine Sekunde beträgt. Eine derart hohe Mittelungszeit wäre für Nachhallmessungen jedoch viel zu lange, da sind Mittelungszeiten, kürzer als 0,1 Sekunden erforderlich.

Gute Terzanalysatoren bieten die Möglichkeit, die Mittelungszeit in weiten Grenzen einzustellen. Bei dem in Abb. 2 dargestellten Beispiel (Analyse-Software Cortex Viper) wurde der Digitalhall eines Gitarrenverstärkers analysiert. Das obere Bild zeigt das Terz-Spektrogramm, in dem über der Zeit die Frequenz aufgetragen ist; der Pegel ist farblich codiert (bl-ge-rt). Bei der Cursor-Linie (1.400 Hertz) erfolgt ein Längsschnitt, der im unteren Bild dargestellt wird: Pegel über der Zeit. Mit einem Slope-Marker wurden zwei (blaue) Punkte ausgewählt, zwischen denen der Pegelabfall durch eine Gerade als Mittelwert dargestellt wird. Rauschen ist ein stochastisches Signal mit zufälligen Schwankungen, weswegen genauere Analysen neben der zeitlichen Mittelung auch eine Scharmittelung erfordern (*Ensemblemittel* oder

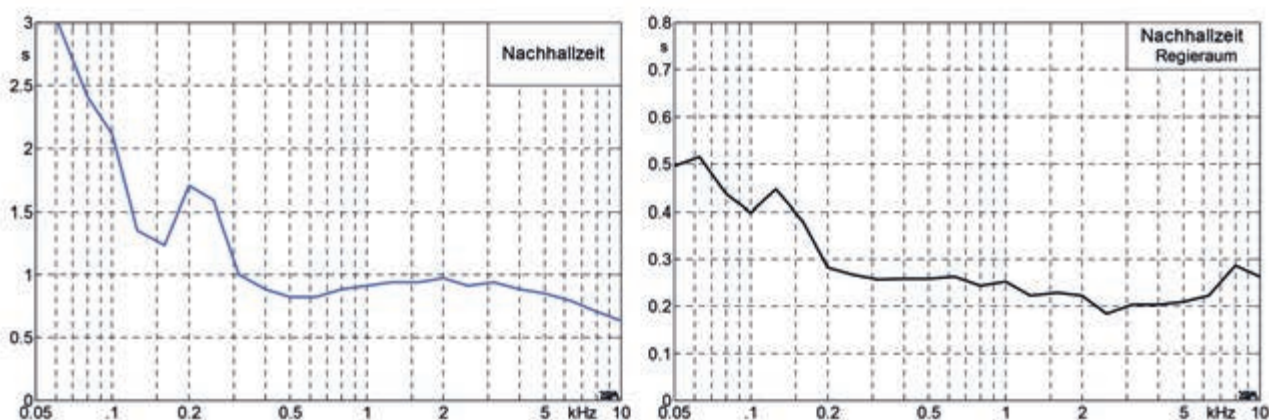


Abb. 1: Frequenzgang der Nachhallzeit: lang (links), tonstudiotauglich (rechts; auf die unterschiedliche Skalierung in der vertikal dargestellten Zeitebene achten)

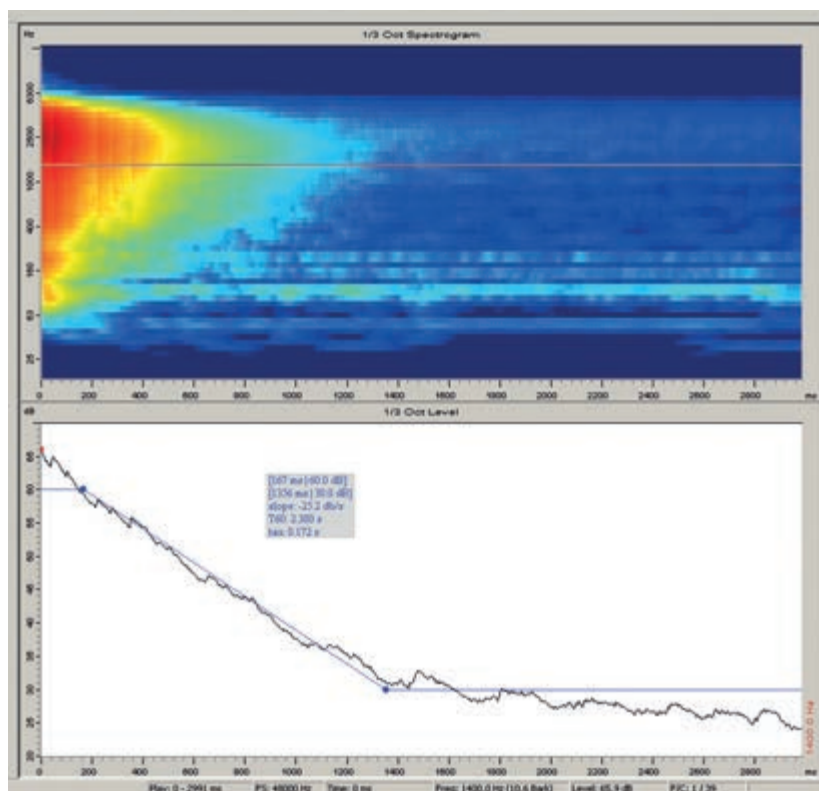


Abb. 2: Terz-Spektrogramm (oben); zeitliche Abnahme des 1.400-Hertz-Pegels (unten)

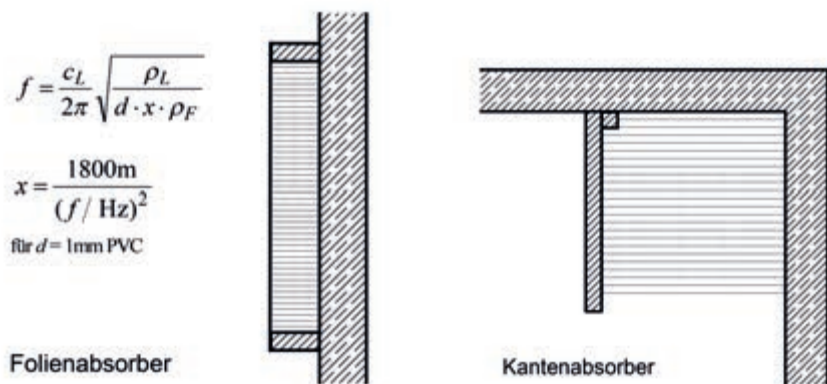


Abb. 3: Folienabsorber: Soll der Frequenzbereich um 200 Hertz bedämpft werden, berechnet sich bei einer 1 Millimeter dicken PVC-Folie die Absorbertiefe zu $x = 4,5$ cm (M. Zollner: Workshop Elektroakustik, TH Regensburg); beim Kantenabsorber wird ein Brett entlang einer Raumkante montiert, dahinter aufgefüllt mit Mineralwolle

Abb. 4: Schaumstoffpyramidenmatten, Höhe 5 - 10 Zentimeter; gute Absorption im Mitten- und Höhenbereich



Scharmittelwert sind Begriffe aus der statistischen Physik, die Redaktion). Die Nachhallzeit, hier T_{60} genannt, beträgt im Beispiel 2,38 Sekunden.

Nachdem der Nachhall-Frequenzgang ermittelt ist, kann die Absorberauswahl beginnen. Die hohen Frequenzen lassen sich leicht bedämpfen, hier sind Faserabsorber wie hochflorige Teppiche gut geeignet. Problematisch ist der tiefe Frequenzbereich, hier finden selektiv abgestimmt Resonanzabsorber ihre Anwendung. Deren genaue Berechnung würde den Rahmen dieser Kurzübersicht sprengen, ausführlichere Informationen stellt die Fachliteratur zur Verfügung (siehe Liste am Ende des Artikels). Ein preislich günstiger Tiefenabsorber kann mit einer mehrere Quadratmeter großen Plastikfolie gebaut werden, die auf einem Holzrahmen an die Wand montiert wird. Die Tiefe beträgt etwa 10 Zentimeter, als Füllung (zwischen Wand und Folie) eignet sich beispielsweise Mineralwolle. Die Folie sollte richtig dick sein (gut 1 Millimeter), aber biegeweich, also keine harte Platte.

Auch Kantenabsorber sind effektiv und preiswert: Hierzu montiert man längs einer Wand (Abb. 3) nahe einer Kante ein Brett und füllt den dahinter liegenden Raum mit Mineralwolle (+ Rieselschutz). Die professionelle (und nicht so günstige) Variante für die Mitten-/Höhenabsorption sind Schaumstoffpyramiden (Abb. 4), die lediglich in der schwer entflammaren Variante verwendet werden sollten. Abb. 5 zeigt die Absorptionsgrade weiterer Materialien.

Es sollte deutlich werden, dass es nicht damit getan ist, zwei 0,7 Quadratmeter große Alibi-Absorber an die Wände zu kleben. Andererseits muss aber nicht jedes freie Flächenstückchen zugeklebt werden. Weil viele Absorber leicht zu beschädigen sind, könnte man sich auf die obere Hälfte der Wand beschränken und die Absorber nach Möglichkeit „über Eck“ montieren – sie also nicht nur auf zwei parallele Wände verteilen. Die Decke bietet ebenfalls viel Platz zur Montage großflächiger Schallabsorber, wobei mit oberster Priorität sicherzustellen ist, dass die Befestigung absolut unfallsicher erfolgt. Wenn nicht teure Akustikschaumstoffe gekauft werden, sondern preislich deutlich günstigerer Verpackungsschaumstoff, muss sichergestellt sein, dass dieser „offenporig“ und nicht „verhautet“ ist. Merke: Man muss durchblasen können, dann kann auch die Schallwelle eindringen.

Abb. 6 zeigt den Nachhall eines 223 Kubikmeter großen Raumes. Im Originalzustand ergibt sich die schwarze Nachhallzeitkurve, mit 10 Quadratmeter Pyramidenmatten ($d = 10$ Zentimeter) die gestrichelte Kurve. Die 10 Quadratmeter entsprechen 3,5 Prozent der gesamten Raumbooberfläche (Boden + Wände + Decke). Mit einem halb so dicken Schaumstoff (5 Zentimeter), der auf 25 Quadratmeter montiert wird, erhält man die blaue Kurve, mit 10 Zentimeter Dicke und 25 Quadratmeter Fläche die rote. Am Markt wird sehr unterschiedliche Qualität angeboten, die Quadratmeterpreise reichen von 5 bis 50 Euro. Keine dieser Schaumstoffmatten kann den Bassbereich bedämpfen – dazu ist die Dicke zu gering. In einem Übungsraum kann man dann notfalls bei den

Instrumenten eingreifen (Decke in die Bass Drum, EQ zwischen E-Bass und Bassverstärker), in einem Tonstudio wird man aber um einen Bassabsorber (Bassfalle) nicht herumkommen. Oft handelt es sich dabei um eine Holzkiste mit Loch oder Tunnel, gefüllt mit faserigem oder porösem Absorbermaterial. Das entspricht einer Bassreflexbox nur ohne Lautsprecher (Helmholtz-Resonator).

Bei einem Übungsraum ist man in der Regel schon mit einer mittelmäßigen Absorption zufrieden, für Tonstudios und Konzertsäle sind umfangreiche und aufwendigere Maßnahmen erforderlich. Wenn in diesen Räumen nur die Nachhallzeit optimiert wird, ist das Ergebnis zumeist unbefriedigend. Die Nachhallzeit sagt nichts über die räumliche Verteilung der Schallreflexionen, sie berücksichtigt nicht die zeitliche Feinstruktur. Einzelechos, die mit 100 Millisekunden zeitlichem Abstand auftreten und von Echo zu Echo 6 Dezibel Dämpfung aufweisen, ergeben auch $T_{60} = 1$ s. Als Nachhall darf man diesen Schall aber nicht bezeichnen. Guter Raumhall klingt gleichmäßig ab, er enthält keine einzeln hörbaren Echos. Und er behält seinen spektralen Klang, klingt also nicht zu Beginn höhenlastig und am Ende dumpf dröhnend. Neben diesen Zeiteffekten ist noch ein energetisches Kriterium klangbestimmend: Der Diffusschallpegel hängt auch von der Nachhallzeit ab. Einfache Raumakustik-Modelle nehmen an, dass der

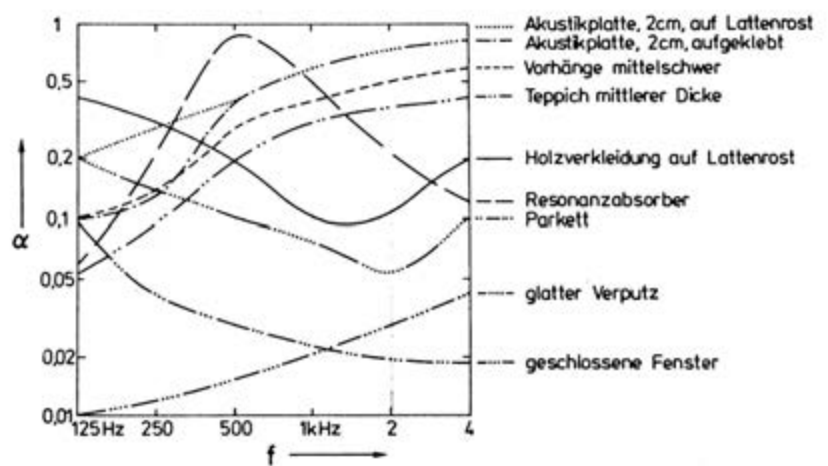


Abb. 5: Absorptionsgrade verschiedener Materialien (Zollner/Zwicker: Elektroakustik)

Direktschall umso schwächer wird, je weiter man sich von der Schallquelle entfernt ($1/r$ -Gesetz). Zusätzlich zum Direktschall existiert im Raum der Diffusschall (die Summe aller Reflexionen), dessen Schallpegel als ortsunabhängig angenommen wird. In einer speziellen Entfernung, dem Hallradius, ist der Diffusschallpegel genauso groß wie der Direktschallpegel.

Anzeige



PARIZ ist eine neutrale, professionelle Plattform, die Toningenieuren absolute Freiheit für jede akustische Aufgabenstellung ermöglicht.

PARIZ



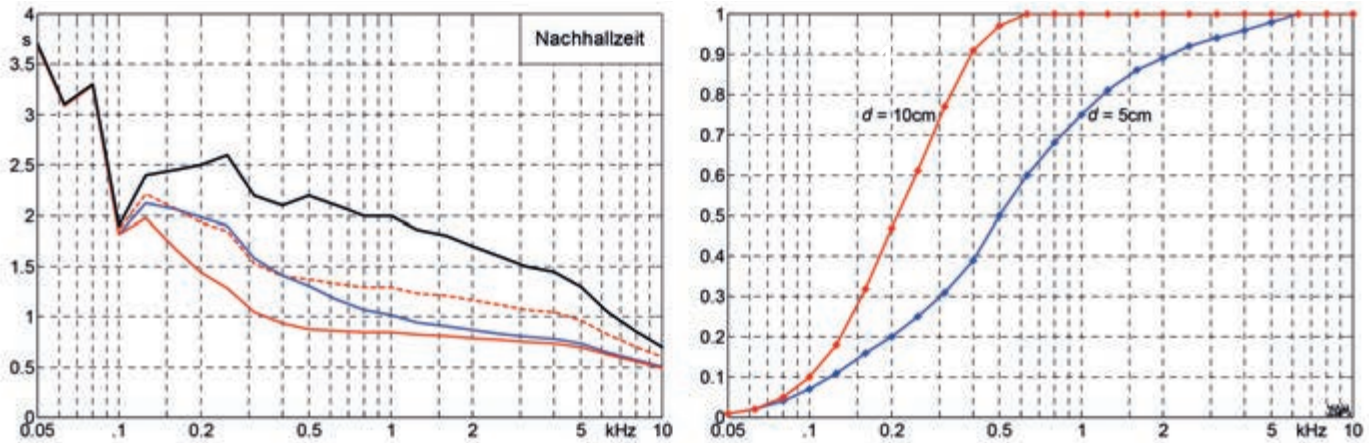


Abb. 6: Nachhallzeit: Original (schwarz), 10 Quadratmeter und 10 Zentimeter (rot gestrichelt), 25 Quadratmeter und 5 Zentimeter (blau), 25 Quadratmeter und 10 Zentimeter (rot); rechts ist die ungefähre Frequenzabhängigkeit des Absorptionsgrades dargestellt

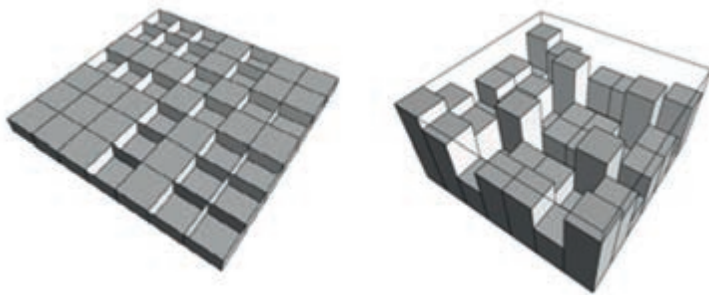


Abb. 7: Diffusoren, links Maximalfolgen-Diffusor, rechts Schröder-Diffusor (www.hunecke.de)

Das Modell ist einfach, für erste Betrachtungen aber brauchbar. Der Hallradius r_H wird umso größer, je kleiner die Nachhallzeit des Raumes ist und je größer die Bündelung der Quelle. Daraus folgt: Das Verhältnis von Direkt- zu Diffusschall hängt an einem bestimmten Raumpunkt vom Nachhall und der Bündelung ab. Variieren diese Größen stark über der Frequenz, ist auch das Diffus-/Direktschallverhältnis stark frequenzabhängig – und das sollte es nicht sein. Ein derartiges Fehlverhalten kann dann auch nicht mit einem Equalizer korrigiert werden, denn der kann nur Direkt- und Diffusschall in gleicher Weise verändern.

Das Diffus-/Direktschallverhältnis definiert die Räumlichkeit. Nach W. Klippel (Acustica 70, 1990, S. 45-54) entsteht bei den meisten Musikhörern ein gutes Räumlichkeitsgefühl, wenn der Diffusschallpegel etwa 5 Dezibel größer ist als der Direktschallpegel. Dies betrifft jedoch nur Hörsituationen, in denen der Hörer die Musik „genießt“ (Wohnzimmerakustik). Ob beim Aufnehmen/Abmischen/Mastern im Tonstudio der produzierte Schall immer genossen wird, soll nicht weiter untersucht werden, die Anforderungen an Regielautsprecher und Raumakustik (Studioakustik) tendieren hier aber zu einem größeren Direktschallanteil. Im Studio werden gern die Seitenwände an der Stelle, die die erste Seitenreflexion erzeugt, mit Absorbermatten beklebt – im Wohnzimmer hat sich diese Maßnahme als eher unvorteilhaft erwiesen (*mal ganz abgesehen von*

Diskussionen hinsichtlich der Optik, die solche Maßnahmen im Wohnzimmer nach sich ziehen können ..., die Redaktion). Hingegen ist es generell günstig, die Frontseite (zwischen den Lautsprechern) mit Absorbern zu bekleben.

Auch die Rückseite des Raums bietet sich für die Montage von Absorbern und/oder Diffusoren an. Diffusoren sind reliefartige Strukturen, die an Wänden montiert werden. Die Wirkung ist ähnlich wie beim Licht: Eine sehr glatte Fläche (beispielsweise ein Spiegel) reflektiert das Licht nur in eine Richtung, eine raue Fläche (Wand) reflektiert diffus. Weil die Schallwellenlänge aber viel größer ist als die Lichtwellenlänge, muss die Oberflächenunebenheit eines akustischen Diffusors viel größer sein als die eines optischen. Obwohl Diffusoren nicht aus absorbierendem Material gefertigt sind, können sie die Nachhallzeit reduzieren: Mehr Diffusität bedeutet mehr Reflexionen und allein dadurch mehr Absorption. Die Form eines Diffusors kann sehr unterschiedlich sein, zwei Beispiele zeigt **Abb. 7**.

Es ist ebenso möglich, einem Diffusor spezielle Absorptionseigenschaften zu geben, indem die im Bild gezeigten Quader auf spezielle Resonanzeigenschaften (und damit Absorptionseigenschaften) abgestimmt werden. Bei nicht ganz so hohen Anforderungen kann diese Funktion sogar ein Bücherregal erfüllen.

Ein Equalizer sollte lediglich im Frequenzbereich bis etwa 400 Hertz Anwendung finden, denn hier dominieren einzelne Raumresonanzen (Moden), die (für einen Abhörplatz) per parametrischem EQ ausgeglichen werden können. Das „Einrauschen“ der Anlage mit Analyzer/EQ im ganzen Frequenzbereich ist problematisch: Ein Messmikrofon kann nicht zwischen Direkt- und Diffusschall unterscheiden – das menschliche Gehör schon. Hat der Lautsprecher einen weitestgehend glatten Direktschall-Frequenzgang sowie ein gleichmäßiges Bündelungsmaß und liegt die Nachhallzeit zwischen 0,2 und 0,4 Sekunden, mit nur schwach ausgeprägter Frequenzabhängigkeit, sollte ein EQ im Bereich $f > 400$ Hertz entbehrlich sein. ■

Informationen

1) Zollner M.: Elektroakustik für Bühne und Studio, www.gitec-forum.de

2) Zollner M.: Physik der Elektrogitarre, Kapitel 11, www.gitec-forum.de

3) Zollner M., Zwicker E.: Elektroakustik, ISBN 3-540-64665-5

4) Toole F.: Sound Reproduction, ISBN 978-0-240-52009-4