Akustik im Tonstudio

von Christian Jungebluth

1. Einleitung

Dieser Text ist ursprünglich im Jahr 2003 als meine Facharbeit zum Diplom Audio Engineer im Internet abgelegt worden. Aufgrund vieler Nachfragen zu den Audiobeispielen habe ich 2018 diese neue Version erstellt. Nun ist es möglich die Beispiele direkt aus dem Dokument heraus anzuhören. Zudem sind noch viele Ergänzungen aus den Erkenntnissen der letzten 15 Jahren in den aktuellen Text eingeflossen.

Raumakustische Maßnahmen im Tonstudio und im speziellen im Regieraum sind nahezu unvermeidbar. Jedem Tonmeister ist bewusst, dass die schlechte Akustik einer Regie bei Mischung und Aufnahme vielfältige Probleme verursachen kann. Oft sind jedoch die Hintergründe der Raumakustik nicht bekannt oder Sie werden aus vielfältigen Gründen nicht beachtet. Meist wird mehr Geld in gute Schallwandler und Röhrenequipment investiert, als in den Ausbau der Raumakustik. Durch eine schlechte Akustik wird man aber eventuell nicht in der Lage sein, alle Feinheiten des teuren Equipments zu hören. Somit stellt sich die Frage: *Wie optimiert man die Raumakustik von Regieräumen?*

Abb. 1 Regie, Youngbloodstudios Goslar, 2008 [12.18]

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis....4
Tabellenverzeichnis....6
1. Einleitung.... 1
1.1. Warum Regieakustik.... 7
1.2. Die Ideale Akustik.... 7
1.3. Probleme unbearbeiteter Räume.... 8
1.4. Vorgehensweise.... 8
2. Akustische Effekte.... 8
2.1. Schall Reflexionen.... 8
2.2. Schallbeugung.... 9
2.3. Schallabsorption.... 10
3. Entstehung von Raummoden.... 11
3.1. Axiale Moden.... 12
3.2. Tangentiale Moden.... 13
3.3. Oblique Moden.... 14
3.4. Frequenzgangbeeinflussungen durch Kammfilter.... 14
3.5. Frequenzspezifische Verteilung von Moden.... 17
3.6. Einfluss von Raumproportionen auf den Frequenzgang.... 19
4. Frequenzselektive Beeinflussung des Raumes.... 25
4.1. Helmholtzresonatoren.... 26
4.2. Mikroperforierende Absorber.... 31
4.3. Plattenresonatoren.... 32
4.4. Diffusoren.... 33
4.4.1. Maximalfolgen-Diffusoren.... 34
4.4.2. Quadratic-Residue-Diffusoren.... 35
4.4.3. Primitive-Root-Diffusoren.... 36
5. Nachhallzeit.... 37
5.1. Vorgaben für Regieräume.... 37
5.2. Nachhallzeitmessung.... 38
5.2.1. Nachhallzeitmessung über Pegelschreiber.... 39
5.2.2. Nachhallzeitmessung über Maximalfolgen.... 39
5.2.3. Nachhallzeitmessung über Sweeps.... 40
6. Messtechnische Kenngrößen.... 41
7. Berechnung von Nachhallzeiten.... 47

7.1. Berechnung nach Sabine 47
7.2. Berechnung nach Eyring 48
8. Lautsprecher- und Abhörposition 49
8.1. Lautsprecherposition 50
8.2. Auslöschungen durch Wandreflexionen 51
8.3. Abhörposition 51
9. Akustische Gestaltung einer Regie 52
9.1. Raumkonzepte 53
9.2. Raumgeometrie und Reflexionsverhalten. 53
9.3. Positionierung von Diffusoren 54
9.4. Positionierung von Absorbern und Resonatoren 55
9.5. Kombination der Raumoberflächen 57
10. Das Einmessen einer Regie 58
11. Fazit 62
12. Quellenverzeichnis 63
13. Audiobeispiele 65
13.1. Aufstellung aller Audiobeispiele mit Beschreibung 66

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Regie, Youngbloodstudios Goslar, 2008 [12.18] 1
Abb. 2.2 Schallreflexionen [12.01, S. 12] 9
Abb. 3.3 Moden im Raum [12.03, S. 340] 12
Abb. 3.4 Axiale Moden [12.07, Fig.1-2] 13
Abb. 3.5 Tangentiale Moden [12.07, Fig.1-2] 14
Abb. 3.6 Oblique Moden [12.07, Fig.1-2] 14
Abb. 3.7 3D-Darstellung des Schalldrucks [12.06] 15
Abb. 3.8 Formel zur Berechnung von Raummoden 16
Abb. 3.9 Anregung der ersten tangentialen Moden (1 1 0) [12.05] 17
Abb. 3.10 Grafik der axialen Resonanz Frequenzen 19
Abb. 3.11 Akustisch vorteilhafte Raumverhältnisse [12.04, S.190] 20
Abb. 3.12 Grafik optimierter axialer Resonanz Frequenzen 20
Abb. 3.13 die Formel für die Schroederfrequenz 22
Abb. 3.14 Schroederfrequenz, Raumgröße, Nachhallzeit 22
Abb. 3.15 Die vier Regionen des Frequenzspektrums 23
Abb. 3.16 Grafik axialer Resonanz Frequenzen eines großen Raumes 24
Abb. 3.17 Grafik axialer Resonanz Frequenzen eines kleinen Raumes 24
Abb. 3.18 Grafik axialer, tangentialer und obliquer Moden 25
Abb. 4.19 Helmholtz Resonator 27
Abb. 4.20 Bassfalle 27
Abb. 4.21 Helmholtz Lochplatten-Absorber [12.10] 28
Abb. 4.22 Formel zum Lochplatten Resonator [12.03, S.219] 29
Abb. 4.23 Formel zum Schlitzplatten Resonator [12.03, S.224] 29
Abb. 4.24 Zerfallsspektrum ohne Mittenabsorber [12.14][Track 2] 30
Abb. 4.25 Zerfallsspektrum mit Mittenabsorbern [12.14][Track 3] 31
Abb. 4.26 Mikroperforierter Absorber 32
Abb. 4.27 Plattenabsorber [12.11] 32
Abb. 4.28 Formel zum Plattenresonator [12.03, S.206] 32
Abb. 4.29 Streudiagramm eines Diffusors 33
Abb. 4.30 Geometrische Strukturen zur diffusen Reflexion [12.11] 34
Abb. 4.31 Maximalfolgen Diffusor [12.11] 35
Abb. 4.32 QRD-Diffusor [12.11] 36

Abb. 4.33 Primitive-Root-Diffusor 37
Abb. 5.34 Zerfallsspektrum im Raum mit glatten Betonwänden [12.14][Track 1] 38
Abb. 5.35 Impulsantworten nach Oktavbandrauschen [12.03, S.145] 39
Abb. 5.36 Wasserfalldiagramm einer Raumantwort [12.13, S.30] 41
Abb. 6.37 Nachhallzeit (RT20), und EDT über die Frequenz [12.12] 42
Abb. 6.38 ETC (Energy Time Curve) [12.12] 42
Abb. 6.39 Oktavegefilterter Schroederplot [12.13, S.36] 43
Abb. 6.40 Sinnbildliche Berechnung von Schroederplots 44
Abb. 6.41 Schroederplot und ETC Darstellung [12.12] 45
Abb. 6.42 Spetrogramm im REW [12.17] 45
Abb. 6.43 Group Delay Darstellung im REW [12.17] 46
Abb. 6.44 RT60 Darstellung im REW [12.17] 47
Abb. 7.45 Die Sabine'sche Formel 48
Abb. 7.46 Die Formel nach Eyring 49
Abb. 8.47 Schalldruck nach Lautsprecherposition [12.15] 50
Abb. 8.48 Kammfilter durch Reflexionen der Mischpultoberfläche [12.15] 50
Abb. 8.49 Auslöschungen durch gegenphasige Reflexionen [12.15] 51
Abb. 8.50 Abhörposition im Raum [12.15] 52
Abb. 9.51 Regie mit reflektionsfreier Zone (RFZ) 53
Abb. 9.52 Zerfallsspektrum der Schallenergie ohne (links) und mit absorptiver Decke 55
Abb. 9.53 Zerfallsspektrum der Schallenergie ohne (oben) und mit Bassfalle 57
Abb. 10.54 Frequenzgang Genelec 8050B Lautsprecher [12.19] 59
Abb. 10.55 Frequenzgang Lautsprecher (1/3 Oktavglättung und ungeglättet) [12.17] 60
Abb. 10.56 Darstellung Impuls [12.17] 61
Abb. 12.57: ein Lautsprecher als Quelle 65
Abb. 12.58: alle Lautsprecher als Quelle 65

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1 Absorptionsgrad, frequenzbezogen [12.03, S. 585] 11
Tab. 3.2 Kennzeichnung von Axialen Raummoden 13
Tab. 3.3 Axiale Resonanz Frequenzen 18
Tab. 3.4 optimierte Raumgrößenverhältnisse [12.07, S.6] 19

1.1. Warum Regieakustik

Das Ziel der Regieakustik ist, jeglichen noch so kleinen Aspekt des Audio Programms in seiner Hörbarkeit zu erhalten, und eine einschätzbare Abhörsituation zu erreichen, welche vom Raum unbeeinflusstes Hören und Beurteilen ermöglicht. Natürlich in Abhängigkeit von allen anderen Bedingungen wie der Qualität der Schallwandler, der Aufnahme und aller andern genutzten Peripherie. Wenn wir als Beispiel zwei verschiedene Audiobeispiele[1] hinzunehmen, wird das Beschriebene klarer. Bei [Track 1] und [Track 5] hören wir das gleiche Audio Programm, abgespielt über einen Lautsprecher in der Raumecke und aufgezeichnet als Raumantwort mit zwei Messmikrofonen in einer Groß A-B Anordnung in der Raummitte. Der Raum, in dem die Aufnahmen stattfinden, ist einmal der Rohbau eines Mischkinos in Hamburg [Track 1], und zum Zweiten der finale, akustisch optimierte Ausbau des Mischkinos [Track 5]. Nach dem Hören wird klar, dass der Raum im Rohbauzustand das Originalsignal [Track 7] soweit verfremdet, dass keine Beurteilung des Signals mehr möglich ist. Im finalen Ausbau des Mischkinos [Track 5] sind die Veränderungen zum Originalsignal marginal und tolerierbar. Wie man erwarten würde, ist es also nicht möglich, ein Mischkino in einem Rohbau mit Betonwänden einzurichten und darin einen Film zu mischen. Genauso ist es in anderen tontechnischen Bereichen wie Musikproduktion und Werbeton. Doch wie erreicht man die *ideale Akustik*.

1.2. Die Ideale Akustik

Der Idealfall wäre, wenn der Abhörraum, die vom Schallwandler über die Frequenzen abgegebene Energie nicht beeinflussen würde. So könnte man alle dargestellten Frequenzen mit den Ohren unverfälscht wahrnehmen und beurteilen. Diese Situation ist jedoch nur im freien Feld, also ohne Reflexionen, gegeben. Nehmen wir an, eine Tonregie stünde in einer Salzwüste ohne begrenzende Wände. Dort wären keine Reflexionen zu erwarten, außer die des Bodens. Man würde bei Windstille den Monitorboxen fast unverfälscht lauschen können. Allerdings ist die geschilderte Situation inakzeptabel und die Abhörsituation wäre alles andere als realistisch in ihrem Klang.

[1] siehe Punkt 13 Audiobeispiele

1.3. Probleme unbearbeiteter Räume

Also umgeben wir die Regie mit Wänden und betten alles in die Räumlichkeiten eines kompletten Studios ein. Damit vermischen sich die von den Schallwandlern abgestrahlten Schallwellen mit denen von den Wänden reflektierten. Diese Reflexionen des Ursprungssignals benötigen in ihrer Gesamtheit eine definierbare Zeit, die Nachhallzeit (siehe Punkt 5), bis sie verklungen sind. Jedoch regen alle Schallwellen bei der Reflexion an einem Körper diesen, je nach Masse und Resonanzfrequenz, zum Schwingen an. Dieser fortan schwingende Körper gibt durch sein Schwingverhalten wieder Schall ab, welcher sich mit dem von den Monitorboxen abgestrahlten Direktschall vermischt.

1.4. Vorgehensweise

Versuchen wir nun, den Zusammenhang alle dieser Effekte herzustellen und sie zielgerecht zu beeinflussen, so das letzten Endes der Raum ‚gut' klingt.[2] Dabei gehen wir in Abschnitt 2 zunächst auf die akustischen Effekte ein, welche das Verhalten des Schalls im Raum erklärbar macht. In Abschnitt 3 wird erklärt, wie der charakteristische Klang eines Raumes durch Raummoden entsteht. Die Beeinflussung des Raumklanges mittels Resonatoren und Diffusoren wird in Abschnitt 4 geschildert. Abschnitt 5 und 6 zeigen, wie die Eigenschaften eines Raumes durch Messungen aufgeschlüsselt werden können, um gezielt Verbesserungen herbeizuführen. Die Planung einer Tonstudio Regie über die Berechnung der Nachhallzeiten wird in Abschnitt 7 und die Position der Schallwandler in Abschnitt 8 erläutert. Abschnitt 9 zeigt im Folgenden die allgemeine akustische Planung und Gestaltung einer Regie.

2. Akustische Effekte

2.1. Schall Reflexionen

Der Schall wird dann reflektiert, wenn die Ausmaße des Hindernisses größer als die Wellenlänge des Schalls sind. Ansonsten tritt eine Beugung des Schalls ein (siehe 2.2). Im Fall der Reflexion kann man von einer Analogie zum Licht ausgehen, also

[2] vgl. Th.Görne 1994, S.28

Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel des Schalls auf ebenen Flächen (Abb. 2.2 Schallreflexionen). Man spricht von einem Schallstrahl. Somit gelten auch die Effekte an Streu- und Hohlspiegeln, um den Schall zum Beispiel durch einen Hohlspiegel zu bündeln. In Raumecken wird der Schall zweimal reflektiert, so dass der Schall parallel, aber versetzt zum einfallenden Schall zurückkehrt. [3]

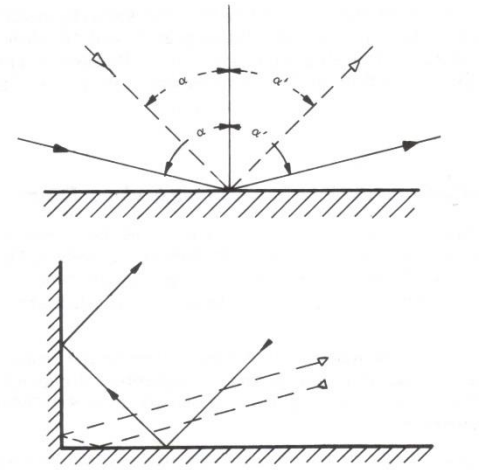


Abb. 2.2 Schallreflexionen [12.01, S. 12]

2.2. Schallbeugung

Ist die Wellenlänge des Schalls größer, oder im Bereich der Größe, des Hindernisses auf das der Schall trifft, so wird er um das Hindernis gebeugt. Bei steigender Frequenz wird die Wellenlänge des Schalls immer geringer, bis der Schall vom Hindernis reflektiert wird. Dadurch entsteht der Effekt, das hinter einem Hindernis der Klang einer Schallquelle dumpfer ist, weil die hohen Frequenzen vom Hindernis reflektiert wurden. Hinter dem Hindernis entsteht ein Schallschatten. An den Kanten eines Hindernisses werden mit abnehmender Frequenz immer mehr Schallwellen in den Schallschatten hinein gebeugt.

Extrem tieffrequenter Schall, mit Wellenlängen die größer als die Raumdimensionen sind, würde einen Raum mit wenig massiven Wänden einfach verlassen (siehe auch 3.6). Das Phänomen, dass der Schall durch ein Hindernis hindurch läuft (zum Beispiel

[3] vgl. M.Dickreiter 1997a, S.12

durch die Wand) und somit das Trägermedium wechselt, nennt man Schallbrechung. Dabei ändert sich die Ausbreitungsrichtung des Schalls in Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den Medien (zum Beispiel Luft und Pressholz).

2.3. Schallabsorption

Bereits bei der Schallausbreitung in der Luft wird dem Schall Energie entzogen. Dieser Effekt wird jedoch erst ab Frequenzen von etwa 5 kHz bemerkbar und nimmt mit steigender Frequenz zu. Bei jeder Reflexion an einem Hindernis und bei der Beugung in ein anderes Trägerelement wird dem Schall Energie entzogen. Durch die Kombination dieser Effekte entsteht für verschiedene Stoffe wie Teppich, Schaumstoff, Holz oder Gips ein eigener Absorptionsgrad. Dabei bedeutet ein Absorptionsgrad von $a=1$ die vollständige Absorption des auftreffenden Schalls, ein Absorptionsgrad von $a=0$ hingegen die vollständige Reflexion.[4] Zum Beispiel wird innerhalb eines Schaumstoffes dem Schall durch Reibung Energie entzogen. Somit kann man für alle Stoffe einen Absorptionsgrad bestimmen, welcher frequenzbezogen angegeben wird (siehe Tab. 2.1). Das Absorptionsverhalten verändert sich je nach Wellenlänge des auftreffenden Schalls. Dabei werden die sechs Oktaven von 125 Hz bis 4 kHz als Frequenzbezug genutzt. Dies ist auch der relevante Bereich für die Absorption, denn oberhalb von 4 kHz setzt eine größere Luftabsorption ein und die Schallenergie wird bei Reflexionen sehr schnell abgebaut. Unterhalb von 100 Hz ist die Wellenlänge des Schalls so groß, dass die reflektierende Fläche kaum Einfluss auf den Energieverlust hat. In diesem tieffrequenten Bereich breitet sich der Schall nicht analog zum Licht als Schallstrahl sondern als Welle aus.

[4] vgl. M.Dickreiter 1997a, S.17

Material	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
grobe Betonwand	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
grobe Betonwand gestrichen	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Schwere Velour Gardinen	0.14	0.35	0.55	0.72	0.70	0.65
Boden: Linoleum, Kachel, oder Kork auf Beton	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Boden: Holz	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Glass: große schwere Scheiben	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
Glass: normale Scheiben	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04

Tab. 2.1 Absorptionsgrad, frequenzbezogen [12.03, S. 585]

3. Entstehung von Raummoden

Raummoden werden auch *stehende Wellen* genannt. Diese treten auf, wenn zwei Schallwellen mit gleicher Wellenlänge aber unterschiedlicher Ausbreitungsrichtung aufeinandertreffen. Bei einer Schallausbreitung in einem begrenzten Raum, kommt es zur Reflexion der Schallwellen an den Begrenzungsflächen und zur Interferenz der einfallenden und (auch mehrfach) reflektierten Wellen. Prinzipiell entsteht eine Raummode durch die Überlagerung der Schallwelle mit sich selbst, wenn die halbe Wellenlänge des Schalls dem Abstand zwischen zwei parallelen Wänden entspricht.

Durch die Reflexion ist die Schallschnelle am Reflexionspunkt (der Wand) gleich Null („*Wellenknoten*“ bzw. „*Schnelleknoten*“)[5]. Zur Raummitte nimmt die Schallschnelle wieder zu und hat dort (bei der Grundmode) ihr Maximum („*Wellenbauch*“). Verdoppelt man die Frequenz, entstehen jeweils zusätzliche Schnelleknoten im Raum (siehe Abb. 3.3). Bezogen auf diese Frequenz ist in den Wellenknoten und vor allem an den

[5] vgl. Th. Görne 1994, S.27

Wänden der Schalldruck maximal. Im Schnellebauch ist der Schalldruck gleich Null. Das so entstehende dreidimensionale Feld von sich überlagernden Druckminima und Druckmaxima innerhalb aller Begrenzungsflächen, ist bei einem statischen Schallsignal ortsfest. Im tieffrequenten Bereich sind die Druckminima und Druckmaxima besonders ausgeprägt.

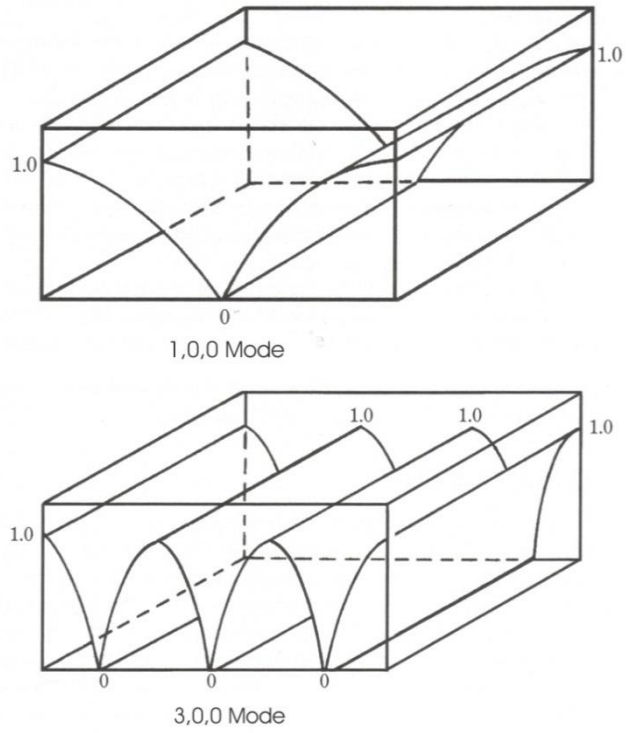


Abb. 3.3 Moden im Raum [12.03, S. 340]

3.1. Axiale Moden

Axiale Moden werden durch ein Wandpaar hervorgerufen (vgl. Abb. 3.4). Sie sind für die akustische Betrachtung von größter Bedeutung, denn bei einer Reflexion zwischen zwei Wänden geht nur ein geringes Maß der Schallenergie verloren. Die verbleibende Schallenergie ist groß und somit bedeutsam in ihren Auswirkungen. Die anderen Modenarten verlieren durch deutlich mehr Reflexionen auch mehr Schallenergie.

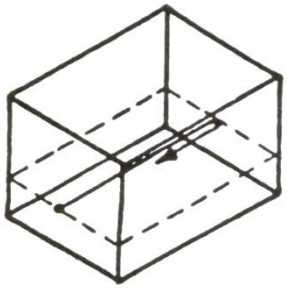


Abb. 3.4 Axiale Moden [12.07, Fig.1-2]

Moden allgemein werden über Indizes gekennzeichnet. Da bei jedem ganzzahligen Vielfachen der Grundmodenfrequenz, die Schalldruckmaxima und –minima sich wieder überlagern, spricht man von der Grundmode und weiteren Moden (vgl. Tab. 3.2). Die Kennziffern der Moden bezeichnen dabei jeweils die Anzahl der Schalldruckminima, welche innerhalb der drei Raumausbreitungsrichtungen auftreten.

Mode	**Indizes**
Axiale Grundmode der Raumlänge	(100)
Axiale zweite Mode der Raumbreite	(020)
Axiale Grundmode der Raumhöhe	(001)
Axiale zweite Mode der Raumhöhe	(002)

Tab. 3.2 Kennzeichnung von Axialen Raummoden

3.2. Tangentiale Moden

Tangentiale Moden bilden sich zwischen zwei Wandpaaren (vgl. Abb. 3.5), also vier Oberflächen aus. Für tangentiale Moden könnte sich zum Beispiel eine Modenaufschlüsselung wie folgt ergeben (022). Die tangentialen Moden verlieren durch die Reflexion zwischen vier Oberflächen mehr Schallenergie als axiale Moden bei der Reflexion zwischen zwei Oberflächen.

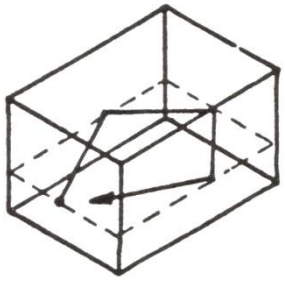


Abb. 3.5 Tangentiale Moden [12.07, Fig.1-2]

3.3. Oblique Moden

Schräge (oblique) Moden werden durch alle drei Dimensionen, also sechs Wandflächen verursacht. (vgl. Abb. 3.6). Sie finden bei grober Betrachtung des Raumes kaum Beachtung. Denn die Schallenergie wird durch die häufigen Reflexionen stark reduziert. Für oblique Moden könnte sich eine Modenaufschlüsselung wie (124) ergeben.

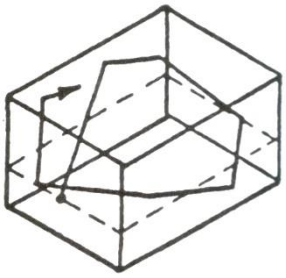


Abb. 3.6 Oblique Moden [12.07, Fig.1-2]

3.4. Frequenzgangbeeinflussungen durch Kammfilter

Durch die verschiedenen Raummoden entstehen Regionen im Raum mit resonanten Frequenzen, bei denen der Schalldruck stark überhöhte Werte annimmt, wenn eine Welle nach einer Reflexion wieder mit derselben Phasenlage am Ausgangspunkt ankommt. Im Gegenzug fallen an anderer Stelle gegenphasige Signale zusammen, was zu Auslöschungen führt. So kann zum Beispiel ein 92 Hz Ton innerhalb eines

kleinen begrenzten Raumes, an einer ortsfesten Stelle, 60dB Pegelunterschied[6] zu einer anderen Raumposition aufweisen (vgl. Abb. 3.7, die Darstellung des Schalldruckes in einem schallharten Raum in einer Ebene parallel zum Boden in 1,3 m Höhe).

Wenn man einen Raum mit mehreren für diesen Raum resonanten Sinustönen beschallt (im Extremfall ein Musiksignal), und im Folgenden durchschreitet, wandert man quasi durch einen statischen Kammfilter innerhalb des Raumes und hört die frequenzspezifischen Beeinflussungen durch Raummoden je nach Raumposition.

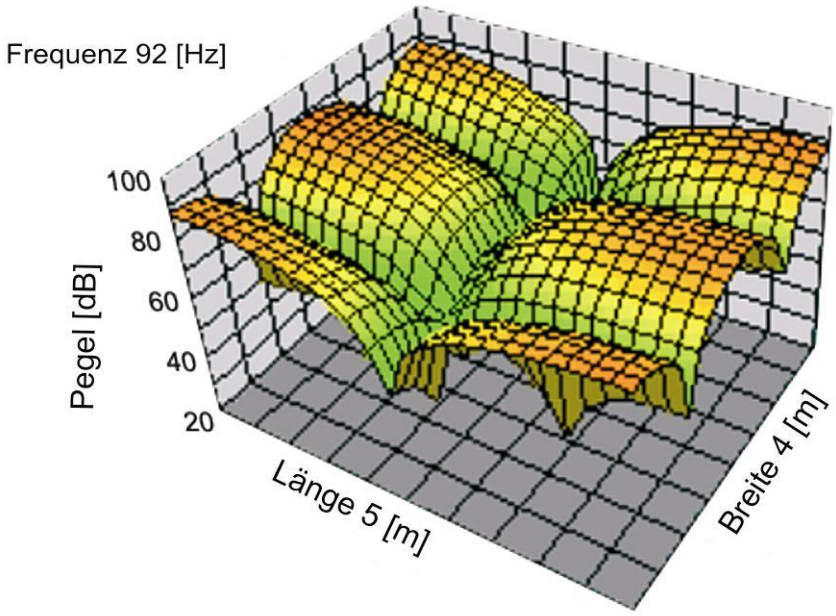


Abb. 3.7 3D-Darstellung des Schalldrucks [12.06]

So lässt sich das Schallfeld in einem begrenzten Raum als Summe der Eigenfunktionen (Moden) des Raumes darstellen.[7] Diese Eigenfunktionen sind jedoch nur für geometrisch einfache Räume relativ unkompliziert zu ermitteln. Für komplexere Bauformen und Bedingungen sind aufwendige Berechnungen, zum Beispiel nach der Finite-Elemente-Methode, erforderlich. Die Finite-Elemente-Methode ist ein numerisches Berechnungsverfahren, mit den Spannungen und Modulationen

[6] vgl. Fraunhofer Institut Bauphysik 2003

[7] vgl. Jochen Veith März 1999, S.45

komplexer geometrischer Strukturen berechnet werden können. Die zu untersuchende Struktur wird durch gedachte Flächen und Linien in Elemente unterteilt, die über Knoten miteinander verbunden sind. Für jedes dieser Elemente wird unter Berücksichtigung von Anfangs- oder Randbedingungen der physikalische Sachverhalt formuliert. Die Beschreibungen aller Elemente werden in einem Gesamtgleichungssystem zusammengefasst, das dann über die verbindenden Knoten gelöst werden kann.[8]

Für einfache, quaderförmige Räume lassen sich die Resonanzfrequenzen der Moden relativ einfach berechnen (vgl. Abb. 3.8 Formel zur Berechnung von Raummoden).

$$f = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

f	Resonanzfrequenz
c	Luftschallgeschwindigkeit
L_x, L_y, L_z	Abmessungen des Raumes
n_x, n_y, n_z	Indizes, Ordnungszahl der Moden

Abb. 3.8 Formel zur Berechnung von Raummoden

Die Anregung der Eigenfrequenzen des Raumes und die Verteilung der Schalldruckmaxima und –minima ist nicht ausschließlich von den Ausmaßen des Raumes abhängig. Je nach Position der Schallquelle variiert die Lage der Schalldruckmaxima und –minima im Raum.[9] In Abbildung Abb. 3.9 ist die Übertragungsfunktion des Schalldrucks bei Abstrahlung über den linken Lautsprecher einer Surround-Anordnung und über den Center dargestellt. Es werden jeweils die ersten tangentialen Moden angeregt. Die Schalldruckmaxima sind rot gekennzeichnet. Man erkennt in Abb. 3.9, dass es „*zu einer unterschiedlichen Anregung der einzelnen*

[8] vgl. www.asd-online.com 2002

[9] vgl. Jochen Veith März 1999, S.45

Moden, und damit zu starken Abweichungen in den Übertragungsfunktionen [kommt].“ [12.05, Seite 45]

Die Berechnung der Druck-Übertragungsfunktionen gestaltet sich jedoch sehr kompliziert und ist für eine vereinfachte Betrachtung der Moden verzichtbar.

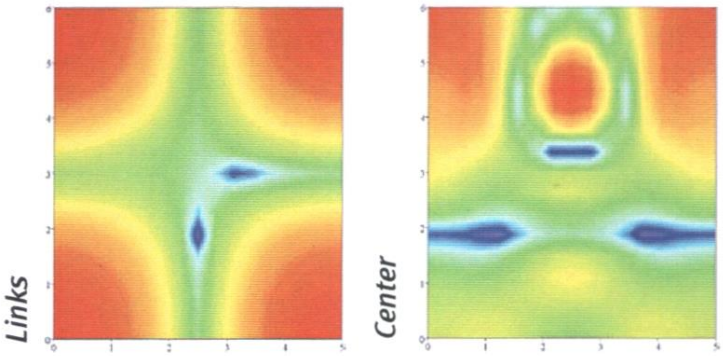


Abb. 3.9 Anregung der ersten tangentialen Moden (1 1 0) [12.05]

3.5. Frequenzspezifische Verteilung von Moden

Durch die spezifischen Ausmaße eines Raumes bilden sich bei konkreten Frequenzen Raummoden aus, welche durch die oben genannte Formel (Abb. 3.8) berechnet werden können. Für ein relativ anschauliches Beispiel wurden im Folgenden die axialen Raummoden eines Raumes mit den Ausmaßen 12,2 m / 9,75 m / 7,31 m (Länge /Breite /Höhe) berechnet (siehe Tab. 3.3 Axiale Resonanz Frequenzen). Hier wurden von der axialen Grundmode bis zur vierzehnten Mode alle Resonanzfrequenzen für alle drei Raumausdehnungsrichtungen berechnet.

Moden Indizes	Resonanzfrequenz [Hz]	Moden Indizes	Resonanzfrequenz [Hz]
(1 0 0)	14,06	**(0 8 0)**	140,72
(2 0 0)	28,11	**(0 9 0)**	158,31
(3 0 0)	42,17	**(0 10 0)**	175,90
(4 0 0)	56,23	**(0 11 0)**	193,49
(5 0 0)	70,29	**(0 12 0)**	211,08
(6 0 0)	84,34	**(0 13 0)**	228,67
(7 0 0)	98,40	**(0 14 0)**	246,26
(8 0 0)	112,46	**(0 0 1)**	23,46
(9 0 0)	126,52	**(0 0 2)**	46,92
(10 0 0)	140,57	**(0 0 3)**	70,38
(11 0 0)	154,63	**(0 0 4)**	93,84
(12 0 0)	168,69	**(0 0 5)**	117,31
(13 0 0)	182,75	**(0 0 6)**	140,77
(14 0 0)	196,80	**(0 0 7)**	164,23
(0 1 0)	17,59	**(0 0 8)**	187,69
(0 2 0)	35,18	**(0 0 9)**	211,15
(0 3 0)	52,77	**(0 0 10)**	234,61
(0 4 0)	70,36	**(0 0 11)**	258,07
(0 5 0)	87,95	**(0 0 12)**	281,53
(0 6 0)	105,54	**(0 0 13)**	304,99
(0 7 0)	123,13	**(0 0 14)**	328,45

Tab. 3.3 Axiale Resonanz Frequenzen

In der Darstellung (siehe Abb. 3.10) sind alle berechneten Resonanzfrequenzen über die Frequenz dargestellt. Alle Moden einer Raumausdehnung werden durch ein gemeinsames Symbol gekennzeichnet. Bei der Betrachtung der Grafik fällt auf, dass einige der Raummoden in einem engen Frequenzbereich zusammenliegen. Ein solcher Fokus liegt zum Beispiel bei circa 70 Hz. In dem Bereich von 56 bis 84 Hz rund um diesen Focus ist keine weitere Modenfrequenz enthalten. Diese drei Raummoden bei circa 70 Hz werden das Frequenzspektrum des Raumes hier unnatürlich betonen. Wobei im Gegenzug, die Frequenzen unmittelbar neben 70 Hz unnatürlich weit abgeschwächt wahrgenommen werden. Ein weiterer Fokus liegt bei 140 Hz, und 211 Hz.

Um solche unnatürlichen Frequenzbetonungen zu vermeiden, sollte zwischen zwei Modenfrequenzen in einem Raum, nicht mehr als 20 Hz Abstand liegen. Außerdem sollte bei einer angenommenen Moden-Breite von 5 Hz[10] zwischen zwei Moden, mindestens 3 Hz Abstand liegen, damit sich die Moden nicht gegenseitig verstärken.

[10] vgl. Mike Shea 2002, S.4

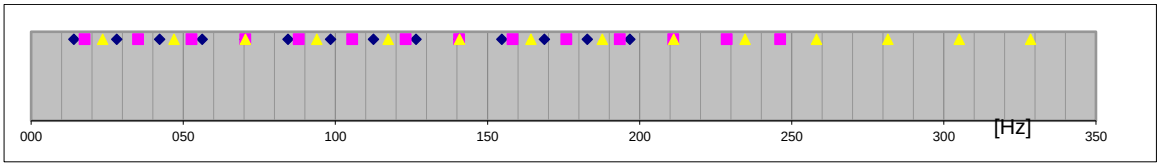


Abb. 3.10 Grafik der axialen Resonanz Frequenzen

3.6. Einfluss von Raumproportionen auf den Frequenzgang.

Wenn ein Raum viele solcher separaten Ansammlungen von Raummoden aus allen drei Dimensionen produziert, kann man davon ausgehen, dass der Raum sehr unausgewogen klingt. Für einen gut klingenden Raum sollte die Verteilung der Raummoden im tieffrequenten Bereich sich wie unter 3.5 beschrieben verhalten. Ohne Anhäufungen, und ohne lange Frequenzbänder ohne Moden.

Da die Lage der Moden in direktem Zusammenhang mit den Raumproportionen steht, sollte ein Raum, der akustisch ausgeglichen klingt, bestimmte Proportionen haben. Tatsächlich gibt es solche „*Golden Ratio's*“ für die Ausdehnung von Räumen. (vgl. Tab. 3.4)

Raummaß x	1,39	1,56	2,33
Raummaß y	1,14	1,28	1,60

Tab. 3.4 optimierte Raumgrößenverhältnisse [12.07, S.6]

Dabei sind die Angaben der Tab. 3.4 als Faktoren dargestellt. So sollte für den ersten Fall die Ausdehnung des Raumes in x 1,39-mal so groß sein wie die Ausdehnung in z und die Ausdehnung des Raumes in y 1,14-mal so groß wie die Ausdehnung in z.

Wenn man diese *Golden Ratio's* in eine Grafik überträgt, lassen sich relativ einfach günstige Raummaße ablesen. Dabei wird eine Raumausdehnung wieder mit eins angenommen, um die Grafik mit Faktoren darstellen zu können (siehe Abb. 3.11).

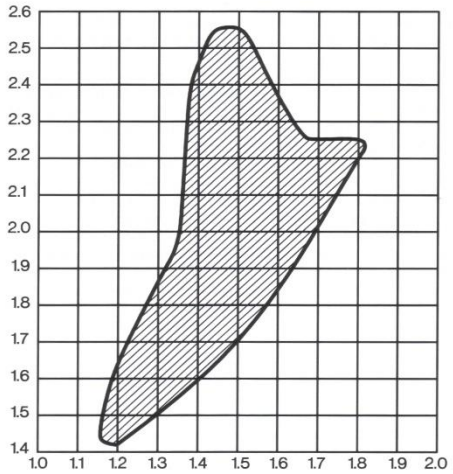


Abb. 3.11 Akustisch vorteilhafte Raumverhältnisse [12.04, S.190]

Für einen Raum mit optimierten Seitenverhältnissen (zum Beispiel mit den Ausmaßen 4 m / 4,56 m / 5,56 m) sind die Frequenzen der axialen Raummoden viel gleichmäßiger verteilt als im obigen Beispiel. (siehe Abb. 3.12)

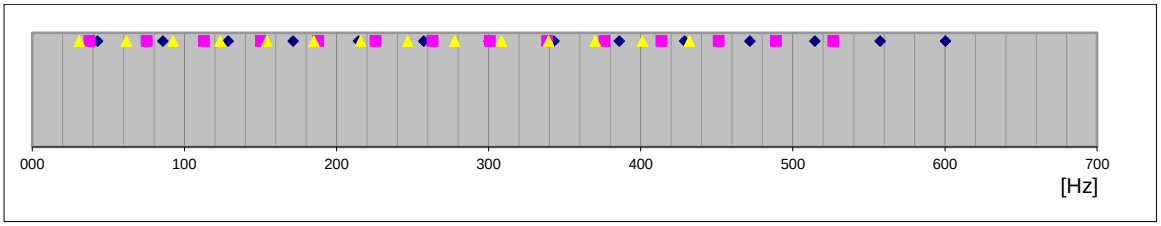


Abb. 3.12 Grafik optimierter axialer Resonanz Frequenzen

Bonello[11] hat diesbezüglich einige Kriterien für die Verteilung der Moden eines rechteckigen Raumes bis zur Frequenz von 200 Hz aufgestellt. Er sagt, dass die Modenverteilung innerhalb von Terzbändern, mit steigender Frequenz, niemals absinken sollte. Günstig wäre ein stetiger Anstieg oder die Stagnation der Modenanzahl innerhalb eines Terzabstandes. Diese *Eigenfrequenzdichte* macht eine Aussage darüber, wie häufig die Raummoden innerhalb eines angegebenen Frequenzbandes auftreten. Je größer diese *Eigenfrequenzdichte* ist, desto dichter

[11] vgl. A. Everest 2001, S.348

liegen die einzelnen Moden zusammen, so dass die Wahrnehmung einer einzelnen Mode nicht mehr möglich ist. Des Weiteren sollten Moden mit einer zufälligen Verteilung innerhalb eines Terzbandes nur auftreten, falls fünf oder mehr Moden innerhalb dieses Terzbandes vorhanden sind. Es wurden unter anderem von Knudsen, Olson und Bolt noch weitere Kriterien aufgestellt. Jedoch hat sich die Anwendung der Kriterien von Bonello in vielen Räumen gegenüber den anderen bewährt.

Weiterhin hat die Größe eines Raumes einen erheblichen Einfluss auf die Darstellbarkeit von tiefen Frequenzen. Unterhalb der ersten Grundmode findet keine Schallabstrahlung mehr statt. Denn die Schallwelle „*passt nicht mehr in dem Raum*“ [12.04, S.27]. Der Raum kann die Schallwelle nicht darstellen. Entweder sie baut sich nicht auf oder die Schallwelle wird durch eine dünne Wand nach außen gebrochen. Beginnend mit der Frequenz der Grundmoden, erfährt das Frequenzspektrum eine durchschnittliche Anhebung (durch die gleichmäßige Verteilung der Moden).[12] Mit steigender Frequenz steigt die Komplexität der Reflexionen, bis sich der Abstand aller modalen Frequenzen so weit verringert, dass man von einem statistischen Kontinuum sprechen kann.[13] Diesen Punkt nennt man die *Schröderfrequenz.* Die in den Frequenzen oberhalb der Schröderfrequenz steckende Gesamtenergie wird sich im Idealfall in alle Raumgebiete und Richtungen gleichmäßig verteilen. Unterhalb der Schröderfrequenz herrscht eine ungleichmäßigere Verteilung der Moden und eine damit verbundene ungleichmäßige Beeinflussung von Signalkomponenten.

Die Schröderfrequenz ist eine theoretische Aussage und berechnet sich über die Nachhallzeit T_N (siehe 5. Nachhallzeit) und das Raumvolumen V (siehe Abb. 3.13 die Formel für die Schroederfrequenz).

Aufgrund der abstrakten Herleitung über Nachhallzeit und Raumvolumen kann man über das Schallfeld oberhalb der Schröderfrequenz keine exakten Aussagen machen. Es ist diffus, und die Energiedichte ist im Raum gleichmäßig verteilt. Bei der Berechnung der Schröderfrequenz geht man zur statistischen Raumakustik über. Denn die geometrische Form des Raumes wird außer Acht gelassen.

---

[12] vgl. Mike Shea 2002, S.6

[13] vgl. Mike Shea 2002, S.9

$$f_{schroeder} \approx 2000\sqrt{\frac{T_N}{V}}$$

Abb. 3.13 die Formel für die Schroederfrequenz

Den Zusammenhang zwischen Nachhallzeit, Raumgröße und Schroederfrequenz in kleinen Räumen zeigt Abb. 3.14. Je größer ein Raum, und je kürzer die Nachhallzeit, desto tiefer sinkt die Schroederfrequenz.

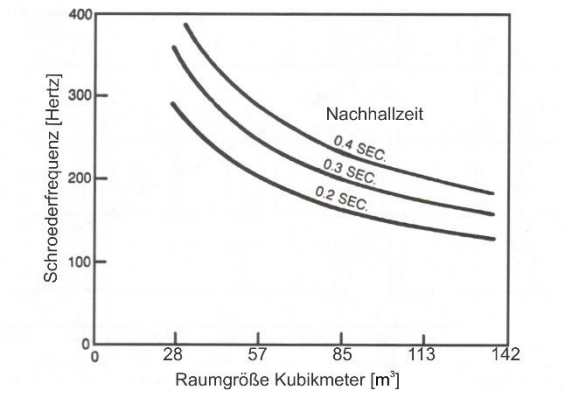
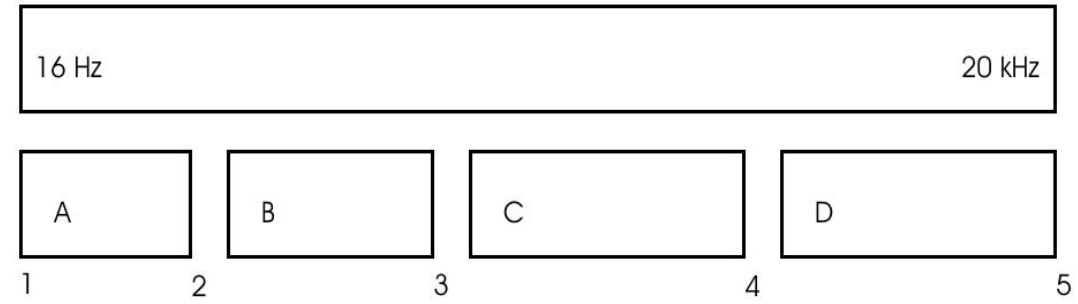


Abb. 3.14 Schroederfrequenz, Raumgröße, Nachhallzeit

Zwischen der Schroederfrequenz und dem vierfachen der Schroederfrequenz befindet sich ein Frequenzbereich, in dem Schallbeugung und Diffusion dominieren. Es ist ein Übergangsbereich zwischen den Gesetzmäßigkeiten der *Schallwelle* und des *Schallstrahls*. Erst in dem Frequenzbereich oberhalb der vierfachen Schroederfrequenz kann die Schallausbreitung als Strahl, mit den eindeutigen Gesetzmäßigkeiten der Reflexion, betrachtet werden. In den tiefen Frequenzen zwischen Grundmoden und Schroederfrequenz ist die Wellenlänge im Bereich der Raumabmessungen. Hier funktioniert das Konzept des Schallstrahls nicht (vgl. 2.1). Man definiert den Schall als Welle, wodurch auch die Moden mit ihren überlagerten Druckmaxima erklärbar werden. So kann man das Frequenzspektrum in vier Bereiche aufteilen (vgl. Abb. 3.15; A,B,C,D) welche allgemein in der Diskussion über die Raumakustik Anwendung finden.[14]

[14] vgl. A. Everest 2001 S. 324



1 Untere Hörschwelle
2 Frequenz der ersten Grundmode
3 Schroederfrequenz
4 Vierfache Schroederfrequenz
5 Obere Hörschwelle

Abb. 3.15 Die vier Regionen des Frequenzspektrums

Wenn man für einen sehr großen Raum mit den Ausmaßen 8 m / 12,8 m / 18,64 m die axialen Raummoden berechnet, stellen sich die Frequenzen der axialen Raummoden wie in Abb. 3.16 dar. Die axialen Grundmoden über die Raumlängen liegen hier bei 9, 13 und 21 Hz. Als Studio, in dem die Aufnahme eines Flügels stattfinden soll, wäre dieser Raum also geeignet. Er kann die Frequenz des Flügels, dessen tiefster Ton A'' bei 27,5 Hz liegt problemlos darstellen. Wenn wir eine Nachhallzeit von 3 Sekunden für den Raum annehmen, ergibt sich bei dem Raumvolumen von 1908 m^3, eine Schröderfrequenz von 79 Hz (vgl. Abb. 3.14). Das Vierfache der Schröderfrequenz liegt bei 316 Hz. Durch die tiefe Schröderfrequenz und die hohe Eigenfrequenzdichte großer Räume, sollte sich ein homogener Frequenzverlauf zeigen. Die Darstellung des Flügels und dessen Nachhall würde, zumindest theoretisch und ohne Rücksichtnahme auf die Beschaffenheit der Oberflächen im Raum, homogen klingen. Für kleine Räume ist die niedrigste darstellbare Frequenz relativ hoch (siehe Abb. 3.17, ein Raum mit 3 m x 3,42 m x 4,17 m). Die Aufnahme eines Flügels oder anderer Instrumente mit einem großen Tonumfang, würde in den tiefen Frequenzen beschnitten und sehr zerklüftet klingen.

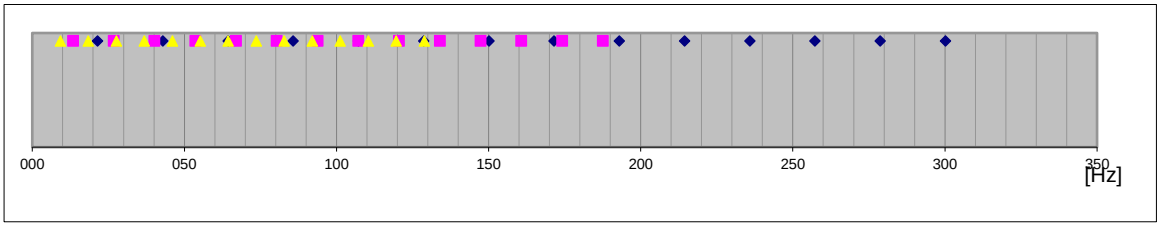


Abb. 3.16 Grafik axialer Resonanz Frequenzen eines großen Raumes

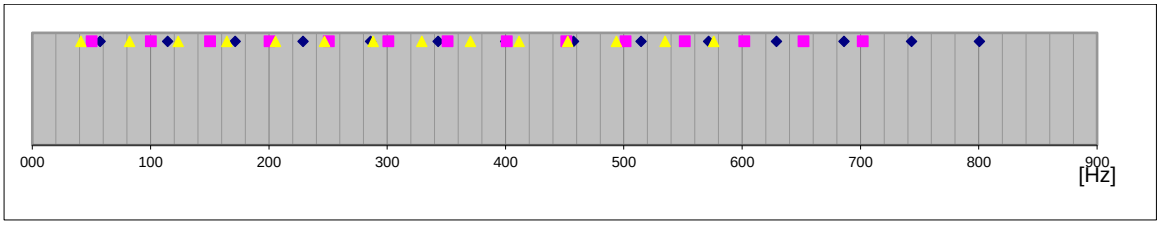


Abb. 3.17 Grafik axialer Resonanz Frequenzen eines kleinen Raumes

Wenn für den großen Raum mit den Ausmaßen 8 m / 12,8 m / 18,64 m alle axialen Moden, alle tangentialen Moden und alle obliquen Moden jeweils bis zur neunten Mode berechnet werden ergeben sich circa 1000 Moden. Wenn alle Moden in eine Grafik bis zu 200 Hz dargestellt werden (vgl. Abb. 3.18), und dabei zur Veranschaulichung der Absorptionsverluste axiale Moden mit der Modenstärke drei dargestellt, tangentiale mit der Modenstärke zwei und oblique mit der Modenstärke eins, kann man durch die Grafik einen sinnbildlichen Frequenzgang des Raumes erahnen.

In Abb. 3.18 kann man erkennen, dass die tangentialen und obliquen Moden schnell in ein statisches Kontinuum übergehen. Zusätzlich zu Ihrer Kontinuität sind die tangentialen und obliquen Moden stärker bedämpft. Deshalb ist es möglich für eine grobe Betrachtung der Raumresonanzen, nur die axialen Raummoden zu berechnen.[15]

[15] vgl. Mike Shea 2002, S.3

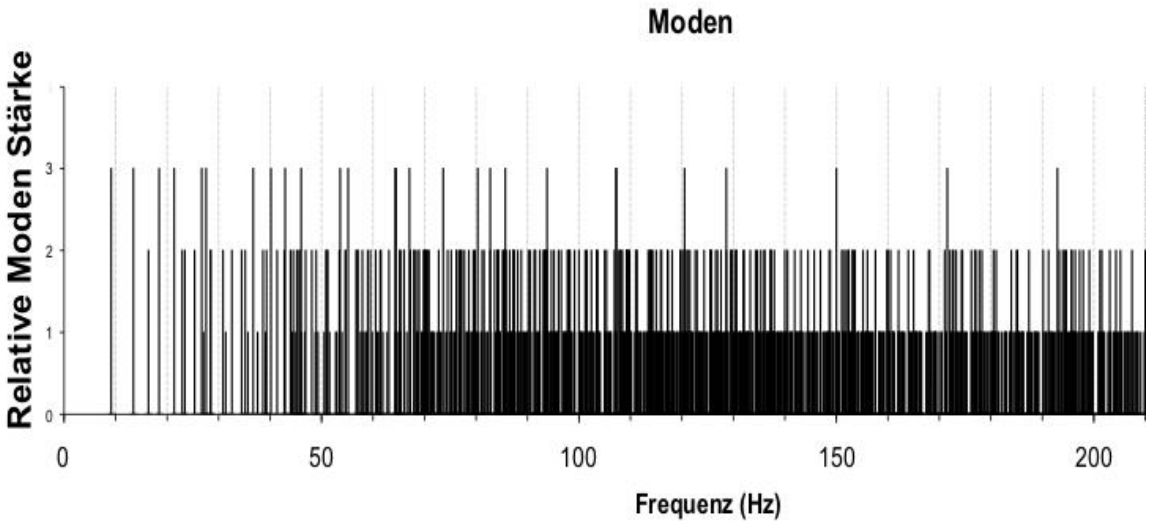


Abb. 3.18 Grafik axialer, tangentialer und obliquer Moden

4. Frequenzselektive Beeinflussung des Raumes

Neben den Raumproportionen haben auch die Oberflächen der Reflexionsflächen Auswirkungen auf die Ausbreitung des Schalls im Raum. Um Einfluss zu nehmen auf das Schallfeld innerhalb eines Raumes, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Durch den Einsatz von absorptiven Oberflächen (vgl. 2.3) wie schwere Teppiche oder Vorhänge lassen sich hochfrequente Signalanteile des Raumschalls bei der Reflexion bedämpfen. Dazu muss die Dicke des Dämmstoffes jedoch im Bereich der zu absorbierenden Wellenlänge liegen. Tieffrequente Frequenzbereiche können somit in den meisten Fällen nur durch Resonatoren bedämpft werden. Ein Resonator kann einzelnen tieffrequenten Raummoden, die einen großen Frequenzabstand zu anderen Moden haben, Energie entziehen. Dadurch kann an speziellen Raumpositionen eine Linearisierung der Übertragungsfunktion erreicht werden, wenn die Energie eines Frequenzbandes durch eine Raummode an der Abhörposition übermäßig verstärkt wird.

Die Nachhallzeit (siehe Punkt 5) kann frequenzbezogen linerarisiert werden, indem man bestimmte Frequenzen bedämpft, welche eine zu lange Nachhallzeit, bezogen auf die Nachhallzeiten der anderen Frequenzen, haben.

Durch Diffusoren kann der Schall in seiner Ausbreitungsrichtung, nach der Reflexion über Diffusoren, gestreut werden. Dies für zu einem diffusen Schallfeld, und kausal zu einem homogeneren Nachhallspektrum.

4.1. Helmholtzresonatoren

Helmholtzresonatoren werden genutzt, um eine Absorption tiefer bis mittlerer Frequenzen zu erreichen. Das Funktionsprinzip ist eine Luftmasse in einer Röhre, die auf der Federwirkung eines angekoppelten Luftvolumens schwingt. Analog zu einem Masse-Feder System ist die Luft innerhalb des Behältnisses die Feder und die Luft innerhalb des rohrähnlichen Zugangs die Masse. In einem begrenzten Bereich um die Resonanzfrequenz des Helmholtzresonators wird dem Schall durch mehrere Phänomene Energie entzogen.

Aufgrund der Resonanz der Luft innerhalb des Rohrzugangs, wird Schallenergie durch Reibung in Wärme umwandelt. Zusätzlich wird durch die Anregung der Luft innerhalb des Hohlraums weitere Energie entzogen. Der Effekt des Helmholtzresonators wird zusätzlich verstärkt, weil die Resonanz der Luft, der Phasenlage der Schallwelle entgegenwirkt. Dadurch entstehen Phasenauslöschungen bei der Resonanzfrequenz des Resonators, welche frequenzbezogen zusätzliche Energie entziehen. Der vom Helmholtzresonator reflektierte Schall, wird an den Kanten der Öffnung gebeugt und diffusiert, was zum Effekt eines homogeneren Schallfelds führt. Die Resonanzfrequenz des Helmholtzresonators berechnet sich über das federnde Luftvolumen und die Luftmasse im Rohr (Grundfläche x Höhe, siehe Abb. 4.19).

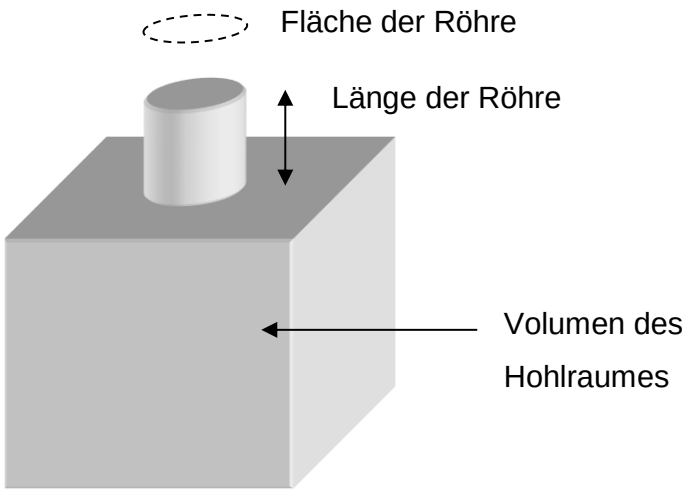


Abb. 4.19 Helmholtz Resonator

Dabei liegt die Bandbreite der Resonanzfrequenz als Q-Faktor angegeben, in einem Bereich von 1 bis 5.[16] Die Bandbreite lässt sich durch den Einsatz von porösen Materialien innerhalb des Hohlraumes vergrößern. Dadurch wird die Luftmasse im Hohlraum *träge* und die Federwirkung größer. Helmholtzresonatoren mit einer sehr tief liegenden Resonanzfrequenz werden als Bassfalle bezeichnet. Sie werden meist in Röhrenform realisiert (vgl. Abb. 4.20).

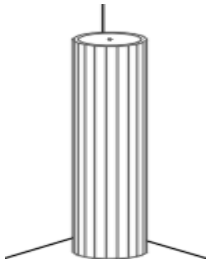


Abb. 4.20 Bassfalle

Eine weitere Möglichkeit ist die Zusammenfassung vieler einzelner Helmholtzresonatoren zu einem Lochplattenresonator. Dabei wird vor dem Hohlraum eine Platte mit Bohrungen angebracht (siehe Abb. 4.21). Die Luftvolumina innerhalb

[16] vgl. A.Everest 2001, S.226

aller Bohrungen addieren sich und verhalten sich wie die Luftmasse eines Gesamtvolumens (vgl. Abb. 4.19).

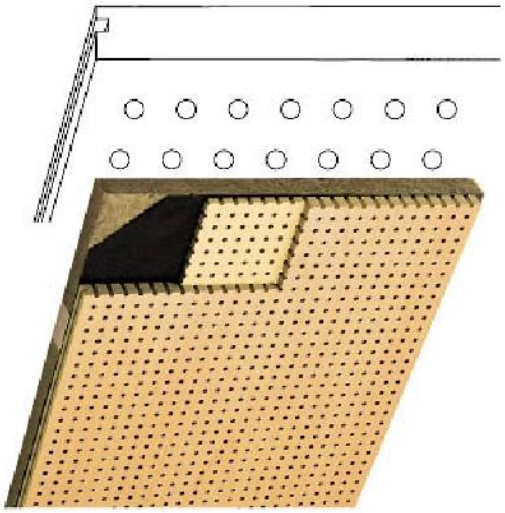


Abb. 4.21 Helmholtz Lochplatten-Absorber [12.10]

Die Resonanzfrequenz des Lochplatten-Absorbers lässt sich dabei näherungsweise wie in Abb. 4.22 dargestellt berechnen. Die Perforationsfläche ergibt sich aus dem prozentualen Anteil der Bohrungen an der Gesamtfläche des Absorbers. Die Plattendicke und der Lochradius werden angegeben, so dass auf die Luftvolumina innerhalb der Bohrungen geschlossen werden kann (Grundfläche x Höhe). Der Lochradius verrechnet zur Mündungskorrektur ist ein gemittelter Wert, der versucht die effektive Bohrungslänge, abhängig von der Geometrie der Bohrungen, darzustellen.[17] Es schwingt nicht nur die Luft innerhalb der Bohrungen, sondern auch die umgebende Luftmasse im Nahbereich der Bohrungen. Um das federnde Luftvolumen einbeziehen zu können, wird zusätzlich der Plattenabstand angeben.

[17] vgl. Mike Shea 2002, S.246

$$f_0 \sim 5400 \sqrt{\frac{p}{l' * d}}$$

d=Plattenabstand [cm]
p=Perforationsoberfläche [%]
l=Plattendicke [cm]
r=Lochradius[cm]
l'=Mündungskorrektur [l'=l+(1,6*r)]

Abb. 4.22 Formel zum Lochplatten Resonator [12.03, S.219]

In einer anderen Form des Helmholtzresonators wird die räsonierende Luft in Schlitzen anstelle von Bohrungen eingeschlossen. Dieser Schlitzplatten-Resonator ist vom Funktionsprinzip her gleich dem Lochplattenresonator. Die Resonanzfrequenz ist umso tiefer, je schmaler die Schlitze und je tiefer der Hohlraum hinter den Schlitzen ist.[18] (siehe Abb. 4.23)

$$f_0 \sim 5800 \sqrt{\frac{p}{d * b}}$$

p= Perforationsfläche [%]
d= Plattenabstand [cm]
b= Breite des Schlitzes [cm]

Abb. 4.23 Formel zum Schlitzplatten Resonator [12.03, S.224]

Helmholtzresonatoren bedämpfen Frequenzbereiche des Raumes nur bei großer Bandbreite der Resonanz. Helmholtzresonatoren mit einer sehr schmalen Bandbreite entwickeln eine eigene Nachhallzeit, da sie die Schallenergie speichern und nach der Anregung durch den Raumschall wieder abgeben. Durch diese Eigenschaft ist es möglich eine schmalbandige Erhöhung der Nachhallzeit einer Frequenz des Raumes

[18] vgl. A. Everest 2001, S.224

zu erreichen.[19] Um solche „*High-Q-Resonatoren*“ [12.03] zu konstruieren, muss man sehr harte und massereiche Materialien verwenden.

Die Anwendung von Helmholtzresonatoren im mittleren und tiefen Frequenzbereich kann man mit der Analyse von Zerfallsspektren verdeutlichen (vgl. Abb. 4.24 und Abb. 4.25). Bei Zerfallsspektren wird die Energie des Schalls über die Frequenz und Zeit dargestellt. Die Darstellungen der Zerfallsspektren in den Abbildung 5.5 und Abbildung 5.6 geben jeweils die Situation nach der Anregung durch einen Schallimpuls wieder. Nach der Installation von Absorbern in dem oben erwähnten Mischkino[20], sind die Frequenzen um 100Hz und die circa 1.9 Sekunden lang resonierende Raummode bei 50Hz erheblich bedämpft. Auch die Frequenzen bis zu 10kHz bauen Ihre Energie deutlich schneller als zuvor ab. Analog dazu hört man, dass nach der Installation der Absorber [Track 3] die Transparenz der Musikwiedergabe, gegenüber der vorherigen Situation [Track 2], erheblich verbessert wurde.

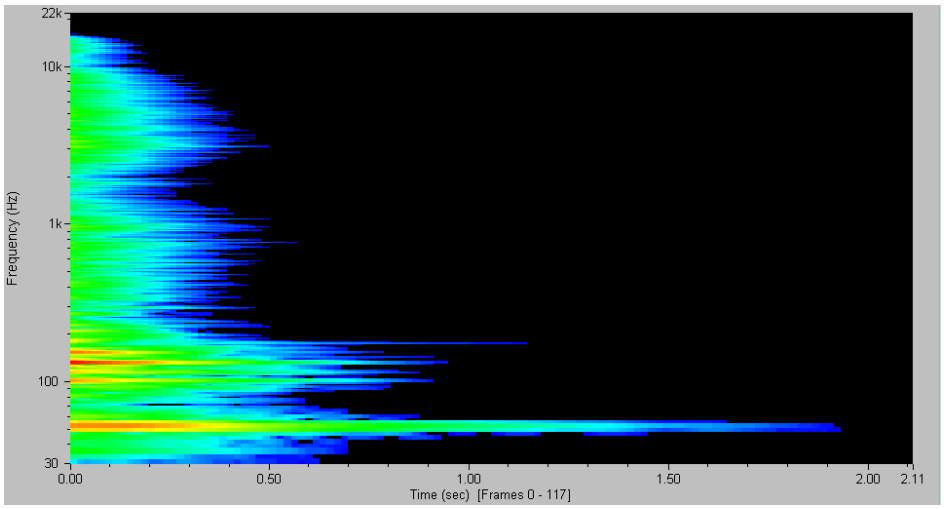


Abb. 4.24 Zerfallsspektrum ohne Mittenabsorber [12.14][Track 2]

[19] vgl. A.Everest 2001, S.229

[20] vgl. Abschnitt 1.1

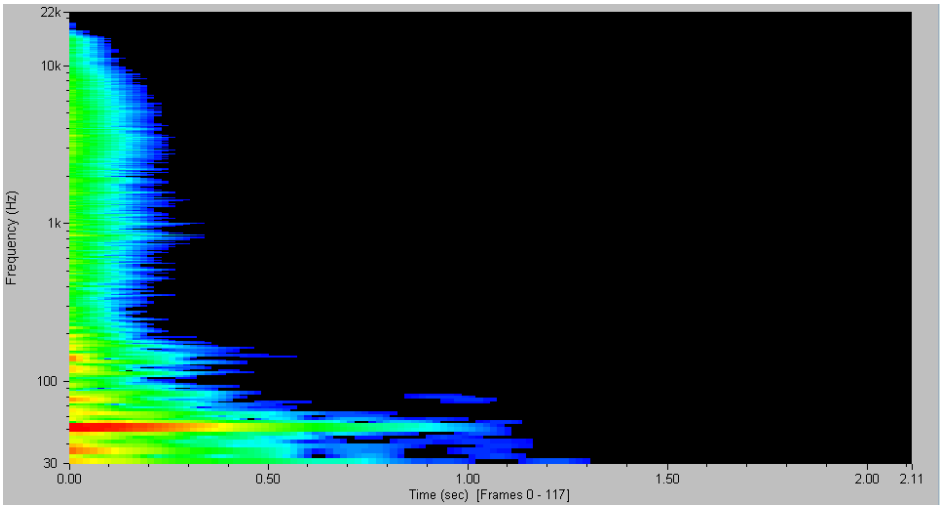


Abb. 4.25 Zerfallsspektrum mit Mittenabsorbern [12.14][Track 3]

4.2. Mikroperforierende Absorber

Mikroperforierte Absorber (vgl. Abb. 4.26) wirken in einem verhältnismäßig breiten Frequenzbereich von 125Hz bis 500 Hz. Sie sind ähnlich den Lochplattenabsorbern aufgebaut, haben aber einen Lochflächenanteil von wenigen Prozent. Sie erreichen die Absorption ohne zusätzliche Reibungswiderstände wie poröse Stoffe innerhalb der Luftkammer. Beim mikroperforierten Absorber ist nur die viskose Reibung der Luft in den Löchern von Bedeutung.[21] Sie entsteht in den akustischen Grenzschichten, also in den Bereichen der Luftschichten, in denen sich das Schallschnelleprofil ändert. Sind die Löcher so klein, dass die Grenzschicht den gesamten Lochquerschnitt ausfüllt, spricht man vom mikroperforierten Absorber. Die Effizienz des Absorbers ist von der Wärmeleitfähigkeit des Plattenmaterials abhängig, da die in der Luft entstehende Reibungswärme über die Platte abgeführt wird. Die mikroperforierten Absorber können aus unterschiedlichen Materialien hergestellt werden. Im Regiebau wäre der Einsatz eines mikroperforierten Absorbers als Deckenkonstruktion denkbar, um eine breitbandige Absorption zu erreichen.

[21] vgl. www.hunecke.de 2003

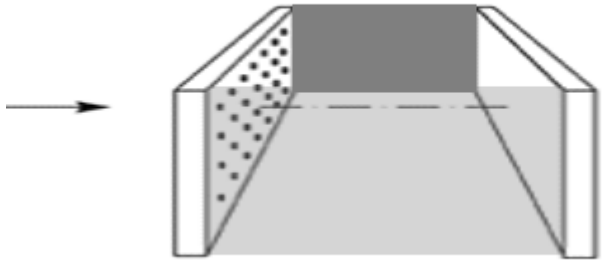


Abb. 4.26 Mikroperforierter Absorber

4.3. Plattenresonatoren

Plattenresonatoren basieren ähnlich den Lochplatten-Absorbern auf einem Masse-Feder Schwingungssystem. Eine Platte (Holz, Metall, Gipskarton oder Kunststoff) schwingt angeregt durch den Schall vor einem geschlossenen Luftvolumen (vgl. Abb. 4.27). Dem Schall wird durch das Umwandeln der Schallenergie in die Bewegungsenergie der Platte Energie entzogen. Durch das Auffüllen des Hohlraumes hinter der Platte mit porösen Stoffen, kann die Bandbreite der Resonanz vergrößert werden. Es sollte jedoch ein Luftpolster im Hohlraum verbleiben, um die Federwirkung des Resonators zu erhalten.

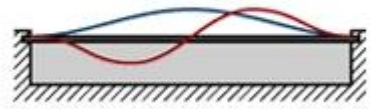


Abb. 4.27 Plattenabsorber [12.11]

Aus der Masse der Platte und der Federsteifigkeit der Luft lässt sich die Resonanzfrequenz des Plattenresonators anhand der Formel berechnen (siehe Abb. 4.28).

$$f_0 \sim \frac{600}{\sqrt{d * m}}$$

d = Plattenabstand [cm]
m = Flächengewicht (Masse) [kg/m²]

Abb. 4.28 Formel zum Plattenresonator [12.03, S.206]

Der Plattenabstand lässt die Federwirkung der Luft hinter der schwingenden Platte erschließen. Generell liegt die Resonanzfrequenz umso tiefer, je weicher die Federwirkung aus Luft und Schaumstoff ist und je größer die Masse der Platte ist. Durch die Platte in ihrer Wirkung als Membran entsteht neben der Resonanzfrequenz durch den Koinzidenzeffekt eine zweite Resonanzfrequenz. Beim Koinzidenzeffekt entstehen bei bestimmten Frequenzen Biegewellen auf der Platte. Geschickte Abstimmung ermöglicht es, die *„Resonanzen so nebeneinander zu legen und optimal zu bedämpfen, dass ein relativ breitbandiger Bassabsorber entsteht“* [12.11]. Im Allgemeinen lassen sich bei Plattenresonatoren Resonanzfrequenzen von 30-300Hz erreichen.

4.4. Diffusoren

Die Diffusion eines Schallfeldes in Regieräumen ist allgemein erwünscht und führt zu einem homogeneren Schallfeld. Der Nachhall wird diffuser und ist über die Frequenz kontinuierlich. Harte Reflexionen werden vermieden. Senkrecht einfallender Schall wird über einen Diffusor nicht senkrecht reflektiert, sondern diffus gestreut (vgl. Abb. 4.29).

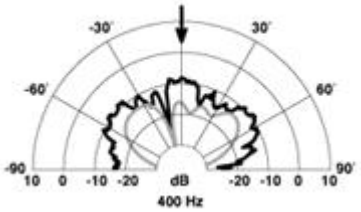


Abb. 4.29 Streudiagramm eines Diffusors

Diffuse Schallreflexionen lassen sich prinzipiell auf zweierlei Weise erzielen. Erstens durch räumlich unregelmäßige Strukturen wie Naturstein oder durch Oberflächen mit ortsabhängiger Wandimpedanz. *„Unter der Wandimpedanz wird das Verhältnis von Schalldruck zur Schallschnelle an der Wandoberfläche verstanden. Immer dort, wo zwei akustisch unterschiedlich wirksame Materialen nebeneinanderliegen, wird ein Teil der einfallenden Welle diffus gestreut“* [12.11]. Bei Oberflächen mit ortsabhängiger Wandimpedanz gilt, dass die Differenz der Wandimpedanz ausreichend groß sein muss, um die Streuung des Schalls zu bewirken. Ein Beispiel dafür sind Lochplatten-

Absorber. Hier ist die Wandimpedanz der Löcher unterschiedlich zu der Wandimpedanz der Platte, wodurch der einfallende Schall gestreut wird (vgl. 4.1).
Die Streuung des Schalls an geometrischen Formen ist ein Wellenphänomen. Somit müssen die Abmessungen der Strukturen in der Größenordnung der Wellenlänge des zu streuenden Schalls liegen. Aus Halbkugeln, Prismen oder ähnlichen Formen lassen sich dazu spezielle geometrische Strukturen mit einer sich wiederholenden Strukturperiode (g_s) aufbauen (siehe Abb. 4.30).

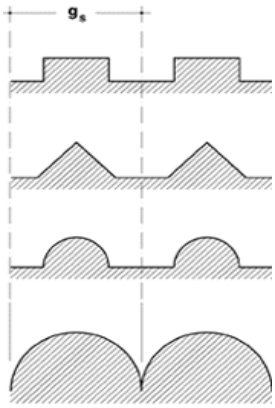


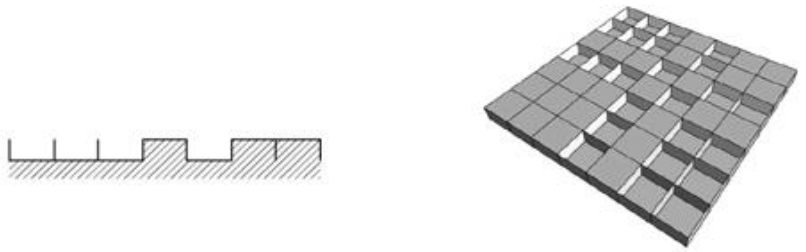
Abb. 4.30 Geometrische Strukturen zur diffusen Reflexion [12.11]

4.4.1. Maximalfolgen-Diffusoren

Manfred R. Schroeder (Universität zu Göttingen) entdeckte in den Siebzigern neue Möglichkeiten der Schalldiffusion. Er konstruierte spezielle Maximalfolgen-Diffusoren. Wie der Name schon sagt, basieren diese Diffusoren auf den aus der Zahlentheorie bekannten Maximalfolgen. Sie können die beiden Werte +1 und -1 annehmen, die sich nach einer bestimmten Länge periodisch wiederholen. Alle Maximalfolgen haben die Eigenschaft, dass ihre Fourier-Transformation[22] ein weißes Spektrum hat. Bildet man aus einer Maximalfolge ein Messsignal, so klingt dies wie weißes Rauschen. Baut man einen Maximalfolgen-Diffusor mit einer Wandoberfläche aus einzelnen Streifen mit zwei unterschiedlichen Tiefen, so wird der einfallende Schall gleichmäßig (wie die spektrale Verteilung in einem Rauschsignal) in alle Richtungen gestreut. Die Breite der Streifen sollte kleiner oder gleich der halben Wellenlänge sein, für die eine maximale Streuwirkung gewünscht wird. Zwischen zwei tiefen Streifen sollten sich idealerweise

[22] vgl. Dickreiter 1997, Bd.1, S.61

dünne senkrechte Trennwände befinden. Diese verbessern die Streuwirkung bei schrägem Schalleinfall. Maximalfolgen-Diffusoren arbeiten sehr schmalbandig und finden deshalb nur selten Verwendung. Die Bandbreite beträgt etwa eine Oktave um die Frequenz, deren viertel Wellenlänge der Streifentiefe entspricht. Wird eine Diffusor-Struktur streifenförmig aufgebaut, so hat sie nur in der Richtung senkrecht zu den Streifen streuende Wirkung (vgl. Abb. 4.31 a). Eine Möglichkeit Streuung in zwei Richtungen zu erzeugen, ist der Bau zweidimensionaler Diffusoren. Dazu werden zwei unabhängige Maximalfolgen so miteinander multipliziert, dass ein Muster aus einzelnen quadratischen Feldern entsteht (vgl. Abb. 4.31 b).



a) Eindimensionaler Maximalfolgen-Diffusor, gebildet aus einer Folge der Länge N=7

b) Zweidimensionaler Maximalfolgen-Diffusor, gebildet aus zwei Folgen der Länge N=7

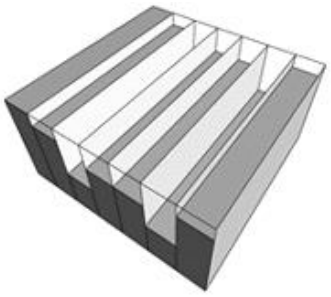
Abb. 4.31 Maximalfolgen Diffusor [12.11]

4.4.2. Quadratic-Residue-Diffusoren

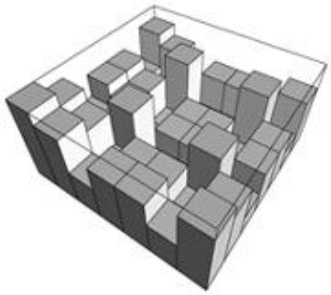
Quadratic-Residue-Diffusoren (QRD) gehören zu den sogenannten pseudostochastischen Diffusoren. Sie werden nach ihrem Erfinder auch Schroeder-Diffusoren genannt. Diese bestehen aus einzelnen, unterschiedlich tiefen Streifen, die durch eine dünne Wand voneinander getrennt sind. Das Material, aus dem die Struktur aufgebaut wird, muss schallhart sein. Es kann also beispielsweise Holz, Metall oder Stein verwendet werden. Man unterscheidet ein- und zweidimensionale Diffusoren (vgl. Abb. 4.32). Die eindimensionalen Diffusoren streuen Schall nur in einer Ebene, die senkrecht zu den Streifen verläuft. Die zweidimensionalen Quadratic-Residue-Diffusoren streuen dagegen Schall, der aus beliebigen Richtungen einfällt.

Damit die Diffusoren optimal wirken, muss die Anzahl der Streifen und deren Tiefe bestimmten Regeln folgen. Allgemein gilt, je tiefer die Streifen sind, desto tiefer ist die untere Grenzfrequenz. Die Schachtbreite bestimmt die höchste erfasste Frequenz. Man benötigt etwa eine Bautiefe von der halben Wellenlänge der unteren

Grenzfrequenz. Ein einzelner Diffusor besteht immer aus einer Primzahl von Streifen. (beispielsweise 7,11,13, ...). Je mehr Streifen verwendet werden, desto größer ist der Frequenzbereich in dem der Diffusor wirkt.



a) Eindimensionaler QRD, basierend auf der Primzahl 7, daraus folgen 7 Streifen



b) Zweidimensionaler QRD, basierend auf der Primzahl 7, daraus ergeben sich 49 Felder

Abb. 4.32 QRD-Diffusor [12.11]

4.4.3. Primitive-Root-Diffusoren

Primitive-Root-Diffusoren (PRD) sind ähnlich den Quadratic-Residue-Diffusoren aufgebaut.[23] Sie gehen ebenfalls auf Erkenntnisse von Schroeder zurück. Ihre Streifentiefe folgt einer Primitive-Root-Folge. Die besondere Eigenschaft ist die Reduzierung der geometrischen Reflexion bei sonst gleichmäßig streuender Reflexion. Durch eine unsymmetrische Anordnung der Schächte wird der Schall unregelmäßig diffusiert (vgl. Abb. 4.33). Da die unregelmäßige Diffusion in einer Tonregie in der Regel unerwünscht ist, werden Primitive-Root-Diffusoren selten eingesetzt. Das Schallfeld soll sich für alle Lautsprecher symmetrisch entwickeln können.

[23] vgl. www.hunecke.de 2003

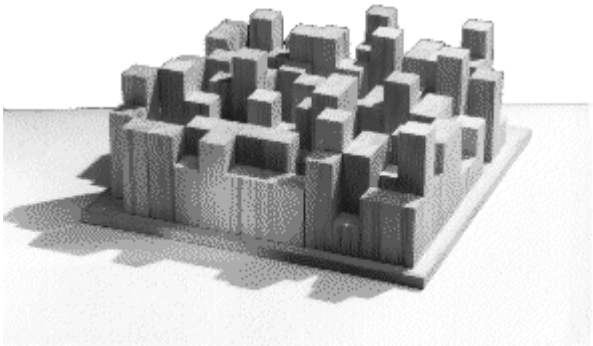


Abb. 4.33 Primitive-Root-Diffusor

5. Nachhallzeit

Die Nachhallzeit ist ein Maß für die Halligkeit eines Raumes. Sie beschreibt die Zeit, die vergeht, bis der Schallpegel in einem Raum um 60 dB abgefallen ist (R_T60), also bis der Schalldruck um 1/1000 gefallen ist.[24] Wie lang die Nachhallzeit in einem bestimmten Raum ist, hängt von den Absorptionseigenschaften der Wände, des Bodens, der Decke, der Einrichtung sowie dem Raumvolumen ab. Denn Stein, Holz oder Teppich absorbieren den Schall bei den verschiedenen Frequenzen unterschiedlich stark (vgl. 2.3.) und somit ist Nachhallzeit frequenzabhängig.

5.1. Vorgaben für Regieräume

Die Nachhallzeit in Regieräumen sollte bei 0,3 Sekunden liegen.[25] Sie sollte frequenzbezogen (für jeweils terzbreites Rauschen) nicht mehr als zehn Prozent vom Durchschnittswert abweichen oder mit steigender Frequenz leicht abfallen.[26] Angegeben wird die Nachhallzeit für Terzbänder im Allgemeinen von 125Hz bis 4kHz (DIN52216). Oberhalb von 4kHz wird die Absorption der Schallenergie über die Luft so groß, dass sich die Betrachtung relativiert. Bei genauerer Untersuchung sollte man jedoch das Spektrum von 50Hz bis 10kHz einbeziehen.

Das Verhalten ungleichmäßig abklingender Räume mit zu langer Nachhallzeit in den tiefen Frequenzen, ist sehr unausgewogen. Wenn die Nachhallzeit zwischen 2000 und 200 ms über das Frequenzspektrum schwankt (vgl. Abb. 5.34), entstehen

[24] vgl. M.Dickreiter 1997, Bd.1, S.31

[25] vgl. M. Dickreiter 1997, Bd.1, S.43

[26] vgl. Th. Görne 1994, S.189

Verdeckungseffekte, durch welche nur noch tiefe Frequenzen wahrgenommen werden. Der Raum kling „*wummig und unausgewogen*“ [12.04. S.189]. Auch die Beurteilung von Schallereignissen, die über die Lautsprecher abgestrahlt werden, ist nicht mehr möglich. Informationen, wie die Early Reflections im abgestrahlten Audio Programm, sind nicht mehr zu beurteilen. [vgl. Track 1]

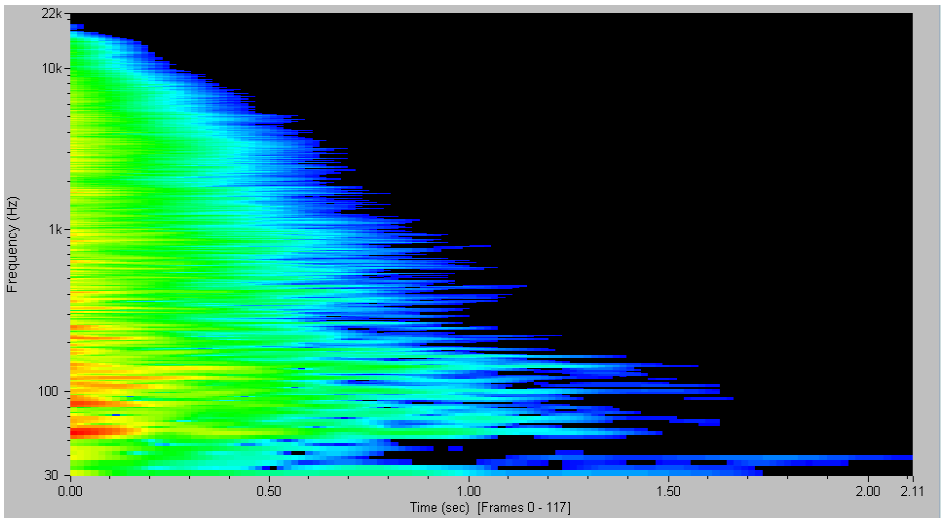


Abb. 5.34 Zerfallsspektrum im Raum mit glatten Betonwänden [12.14][Track 1]

5.2. Nachhallzeitmessung

Die Nachhallzeitbestimmung sollte an verschiedenen Raumpositionen in Ohrhöhe gemessen werden, da unterschiedliche Raumpositionen, je nach Eigenmodenverteilung des Raumes (vgl. 3.6), verschiedene Nachhallzeiten ergeben. Im Folgenden wird die Summe der Ergebnisse gemittelt. Man kann sich bei der Auswahl der Messpositionen auch auf die Abhörposition in der Regie konzentrieren und in deren Umfeld messen. Falls sich Kunden des Tonstudios in der Regie aufhalten sollen, ist natürlich auch an deren Position ein lineares Verhalten erwünscht. Außerdem sollte man darauf achten, nicht in der Nähe von reflektierenden Flächen zu messen oder durch zu starke Hintergrundgeräusche die Messung zu verfälschen.

Aufgrund der großen Dynamik von 60dB wird in der Praxis der R_T30 oder R_T20 Wert von Räumen (DIN52216) gemessen und verdoppelt bzw. verdreifacht um R_T60 zu erhalten. Dies ist problemlos möglich. Denn die Nachhallzeit verhält sich linear, da der Absorptionsgrad eines Raumes konstant ist.

5.2.1. Nachhallzeitmessung über Pegelschreiber

In den siebziger Jahren wurde die Nachhallzeit über Pegelschreiber ermittelt. Dabei wurde oktavbandig gefiltertes Rauschen [Track 24] über Lautsprecher (meist die Regielautsprecher) abgestrahlt und mit einem Messmikrofon aufgezeichnet. Nach Abschalten des Rauschens wird die Impulsantwort des Raumes über Pegelschreiber aufgezeichnet (siehe Abb. 5.35). Durch die Zufälligkeit des Rauschens ist es nötig viele Messungen zu mitteln, da man nicht weiß, welche Frequenzen im Moment der Messung angeregt wurden. Das Rauschen alterniert in seiner Amplitude durch alle Frequenzbereiche. Bei einer Messung über fünf Versuche an drei Messpositionen über sechs Oktaven sind somit 120 Messungen vorzunehmen. Damit hat man genug Daten erhoben, um die Nachhallzeit oktavbezogen zu ermitteln.

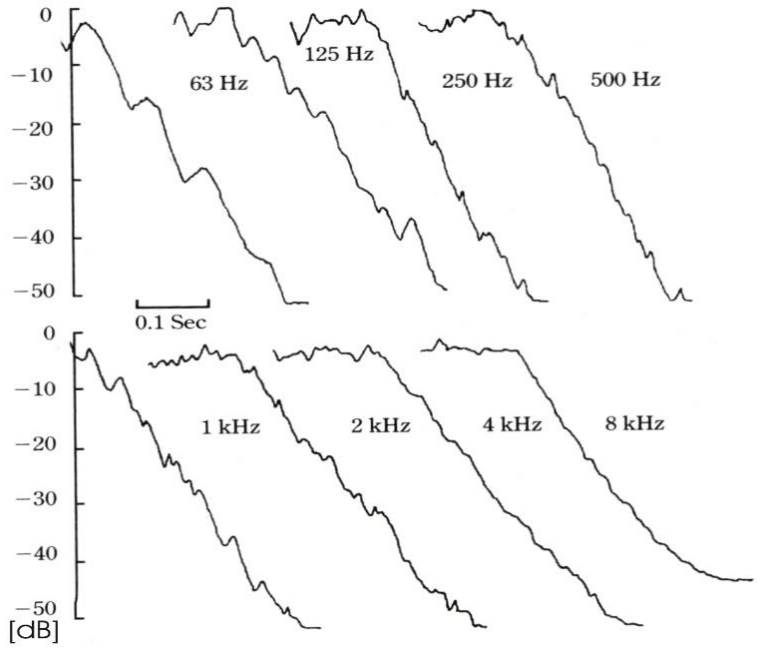


Abb. 5.35 Impulsantworten nach Oktavbandrauschen [12.03, S.145]

5.2.2. Nachhallzeitmessung über Maximalfolgen

Seit den achtziger Jahren wird die Nachhallzeit über computergestützte Systeme berechnet. Dabei kann man anstellte des zufälligen Rauschens eine Maximalfolge (Maximum-Length-Sequence) verwenden. *„Die Maximalfolge lässt sich am einfachsten als pseudo-zufälliges Rauschen mit einem weißen Spektrum beschreiben“*

[12.13, S.26]. Der Vorteil der Maximalfolge ist, dass das Rauschspektrum den Raum anregt, dabei aber vorhersehbar ist. Im Gegensatz zum Weißen Rauschen[27], welches im Pegel in allen Frequenzen unvorhersehbar alterniert. Für den nötigen Vergleich der Impulsantwort mit der MLS *„gibt es einen Algorithmus (Hadamard Transformation), der den Rechenaufwand extrem reduziert“* [12.13, S.26]. Durch den Vergleich von Impuls und Antwort, lässt sich die Reaktion des Raumes auf den Impuls erschließen.

5.2.3. Nachhallzeitmessung über Sweeps

Eine weitere Möglichkeit für einen Raumimpuls ist der Sinussweep [Track 22]. Ein Sweep bietet prinzipiell die gleiche Information wie eine Maximalfolge. Er kann jedoch spektral weiß und rosa verteilt sein.[28] Mit einer Rosa-Verteilung erhält man im unteren Frequenzspektrum ein besseres Signal/Rausch-Verhältnis von bis zu 20dB, da unsere Ohren in den tiefen Frequenzen unempfindlicher sind (Fletcher-Munson-Kurven). Somit kann der Sweep um etwa 20dB lauter sein. Weiterhin ist es möglich durch eine geringe Geschwindigkeit des Sweep mehr Schallenergie in den Raum abzugeben, wodurch das Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) weiter steigt. Dies erklärt sich über die Mittelung über die Zeit. Da Nebengeräusche meist unkorreliert zur Frequenz des Sweeps sind, mittelt sich Fehler über die ansteigende Dauer weg.

Im Verlauf der Messung wird die Raumantwort (als Impulsantwort) aufgezeichnet. Durch den Sweep werden alle Moden des Raumes separat angeregt und der Nachhall für jede Frequenz beginnt nach dem Impuls durch den Sweep.

Eine sehr elegante Methode ist hier die von Angelo Farina[29] beschriebene. Er schlägt vor den Sweep durch einen inversen Sweep zu einem Impuls zurück zu Falten (*„deconvolution“*). So wird die angesprochene Verbesserung der SNR automatisch verrechnet und der entstehende Impuls enthält alle Informationen zur Übertragungsfunktion respektive der Nachhallzeiten bei allen Frequenzen (siehe auch Punkt 6. Messtechnische Kenngrößen).

Aus dem Impuls kann im Folgenden eine Grafik der Raumantwort erstellt werden. Solch ein Wasserfalldiagramm (vgl. Abb. 5.36) stellt den Energieabbau des Raumes über die Frequenz und Zeit dar. Über das Wasserfalldiagramm kann man leicht eine

---

[27] siehe Punkt 13 Audiobeispiele

[28] vgl. Fritz Fey, Juni 2002, S.26

[29] vgl. Angelo Farina, Mai 2006

ungleichmäßige Nachhallzeit im Frequenzspektrum erkennen und die Nachhallzeit grob ablesen.

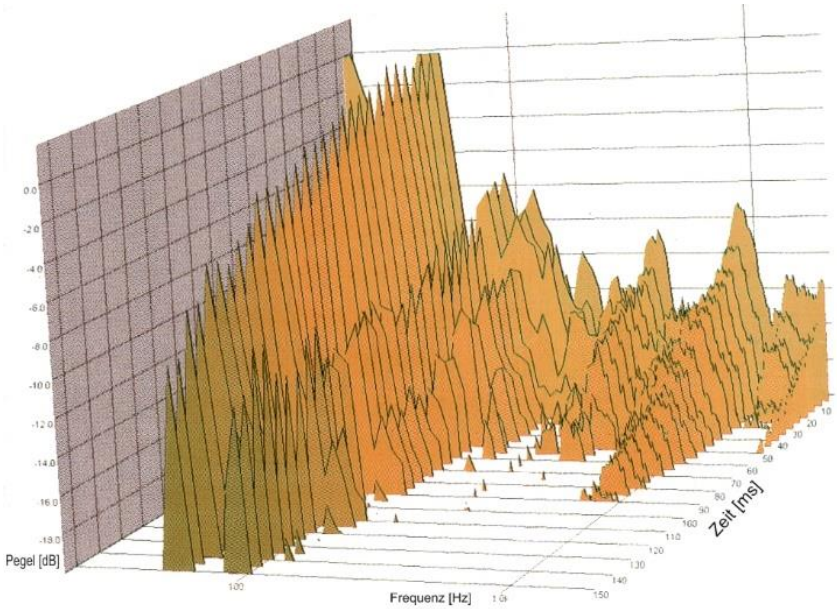


Abb. 5.36 Wasserfalldiagramm einer Raumantwort [12.13, S.30]

6. Messtechnische Kenngrößen

Um einen Raum zu analysieren, lassen sich noch andere akustische Kenngrößen wie die Nachhallzeit berechnen. Die aufgezeichnete Impulsantwort beschreibt alle akustischen Eigenarten des Raumes, und sämtliche raumakustische Größen lassen sich durch die Impulsantwort berechnen. Die Differenz der Zeit vom Eintreffen des Direktschalls, bei einer bestimmten Frequenz, bis zum Eintreffen der ersten Raumreflexion in diesem Frequenzbereich ist die Early Decay Time (EDT siehe Abb. 6.37, Blau dargestellt). Ist der Pegel einer speziellen Frequenz nach der EDT um 20dB gesunken, bestimmt die Differenz von der EDT bis zu dieser Zeit die Nachhallzeit (R_T20) für diese Frequenz. (vgl. Abb. 6.37, Violett dargestellt). In einem homogen klingenden Raum liegen diese beiden Kurven, ähnlich wie hier dargestellt, eng zusammen[30].

[30] vgl. F.Fey 2002, S.30

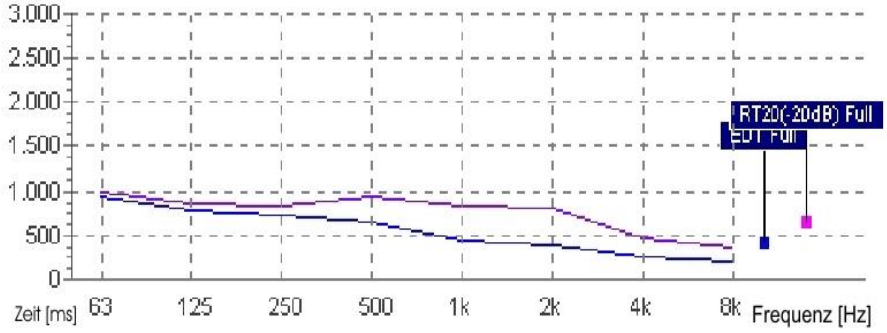


Abb. 6.37 Nachhallzeit (RT20), und EDT über die Frequenz [12.12]

Eine Darstellung der Schallenergie über die Zeit ist die Energy-Time-Curve (ETC) Die ETC eignet sich zur Analyse des Reflektionsverhaltens von Räumen (vgl. Abb. 6.38). In dieser Darstellung können spezielle Reflexionsmuster wie frühe Reflexionen (EDT), Flatterechos und Nachhall sehr gut analysiert werden.

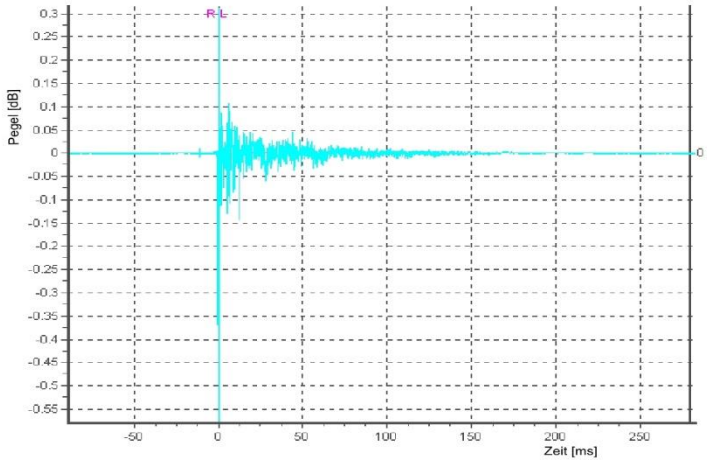


Abb. 6.38 ETC (Energy Time Curve) [12.12]

Der Schroederplot ist eine gemittelte[31] Darstellung der Schallenergie. Diese wird über die Zeit betrachtet (vgl. Abb. 6.39). In der hier gezeigten Darstellung nach Oktaven aufgeteilt und farblich kodiert um alle Frequenzbänder gleichzeitig darzustellen zu können. Die Linien zeigen den Energieabfall in den einzelnen Frequenzbändern und sollten im optimalen Fall nah beieinanderliegen und zusammen abfallen. Dies lässt auf eine über den Frequenzgang gleichmäßige Nachhallzeit schließen.

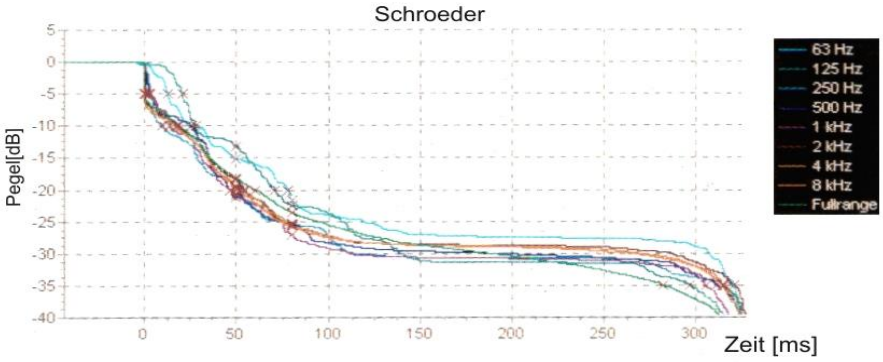


Abb. 6.39 Oktavegefilterter Schroederplot [12.13, S.36]

Zur Berechnung eines Schroederplot wird die Impulsantwort des Raumes (vgl. Abb. 6.40 a) über eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzbereich transformiert[32] (vgl. Abb. 6.40 b). Der *Frequenzbereich* wird hier sinnbildlich als Wasserfalldiagramm dargestellt. Dort wird mittels Fensterung die Antwort in Oktavbänder zerlegt (vgl. Abb. 6.40 c). Die Fensterung kommt einem Bandpass-Filter gleich, hat aber unendlich steile Flanken, da sie mathematisch ermittelt wird. Durch eine inverse FFT wird die Oktavbandinformation des *Fensters* wieder in den Zeitbereich zurück transformiert (vgl. Abb. 6.40 d). Daraus entsteht eine oktavbandgefilterte Impulsantwort. Damit positive Werte für alle Zeitinformationen entstehen, wird die oktavbandgefilterte Impulsantwort punktweise quadriert. Es entsteht eine ETC (vgl. Abb. 6.40 e). Durch die Rückwärtsintegration erhält man aus einer ETC ein Schroederplot (vgl. Abb. 6.40 f). Der Schroederplot ist prinzipiell eine durch die Integration geglättete Kurve der ETC. Durch mehrmaliges Wiederholen des

[31] vgl. Ascendo, Manual S.22

[32] vgl. Ascendo, Manual S.22

gesamten Vorganges erhält man Schroederplots in Oktavbandbreite (vgl. Abb. 6.40 g).

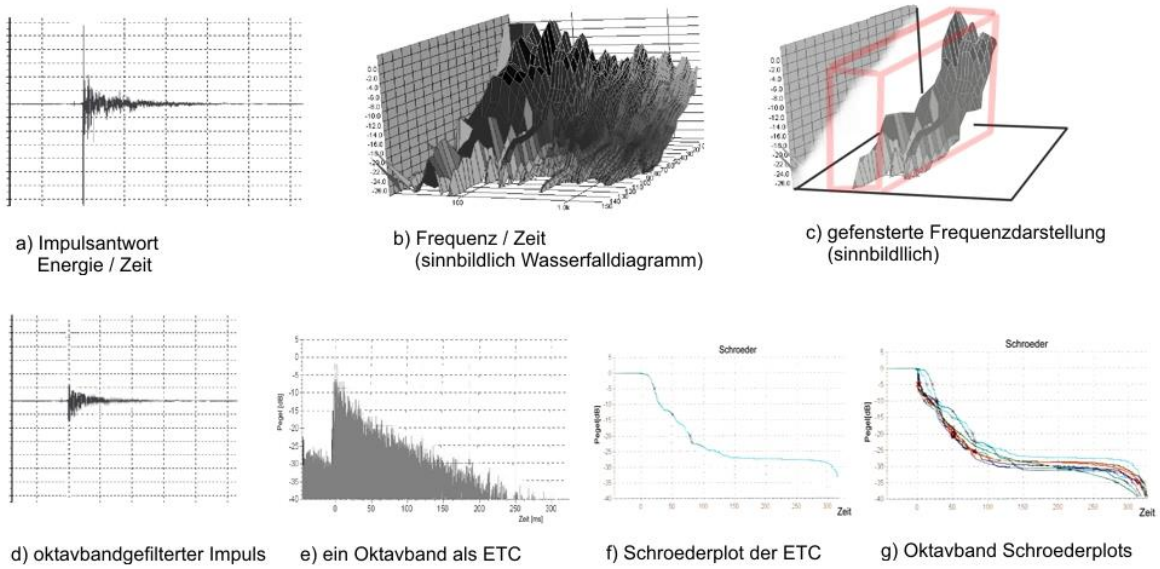


Abb. 6.40 Sinnbildliche Berechnung von Schroederplots

Ein computergestütztes System wie das ASCENDO Room-Tools[33] berechnet in einfachster Weise das oben genannte Verfahren. Es ist möglich die Diagramme des Schroederplot, ETC, EDT, R_T20, R_T30, R_T60, Sprachverständlichkeit (STI, Rasti, Alcons), das Verhältnis früher und später Hallanteile bei 50 und 80 Millisekunden zum Gesamtschall in Prozent, Wasserfalldiagramme und Tabellarische Darstellungen aller Kenngrößen darzustellen zu lassen. Auch die Darstellung einer oktavbandgefilterten Impulsantwort, zusammen mit einem Schroederplot sind möglich (vgl. Abb. 6.41). Die aufwendige Auswertung von Pegelschreibern entfällt und somit lassen sich die akustischen Kenngrößen eines Raumes einfach bestimmen und bewerten.

[33] vgl. Studio Magazin, Juni 2002

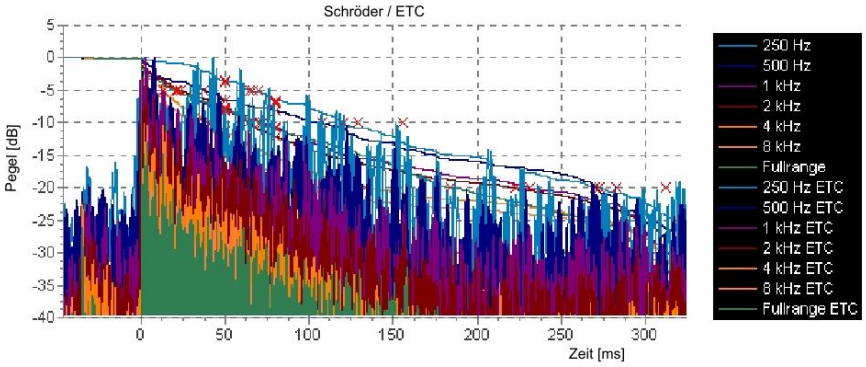


Abb. 6.41 Schroederplot und ETC Darstellung [12.12]

Eine alternative Software ist der Room EQ Wizard[34] (REW). Der REW ist als Freeware unter EULA lizensiert und stellt somit eine kostengünstige Alternative für das Messen und Darstellen von Akustikparametern dar.

Im REW gibt es einige weitere Darstellungsmöglichkeiten der oben genannten Parameter. So kann im Spektrogramm zeitgleich das Abklingverhalten und der zeitliche Verlauf der Anregung dargestellt werden.

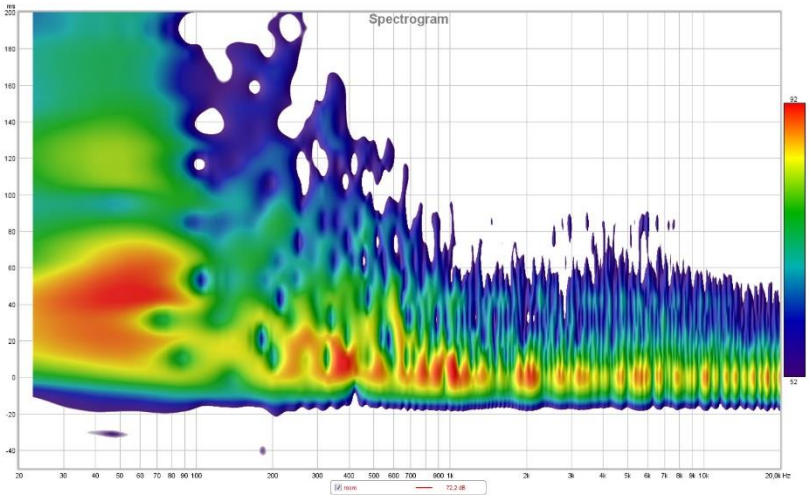


Abb. 6.42 Spetrogramm im REW [12.17]

[34] siehe [12.17] REW

Der zeitliche Verlauf der Anregung durch den Lautsprecher wird auch „Group Delay“ genannt. Damit ist es möglich die reale Abweichung des Lautsprechers von der theoretisch korrekten gleichzeitigen Wiedergabe aller Frequenzen zu bewerten. Das Group Delay ist also eine qualitative Aussage über das Lautsprechersystem und kein raumakustischer Aspekt.

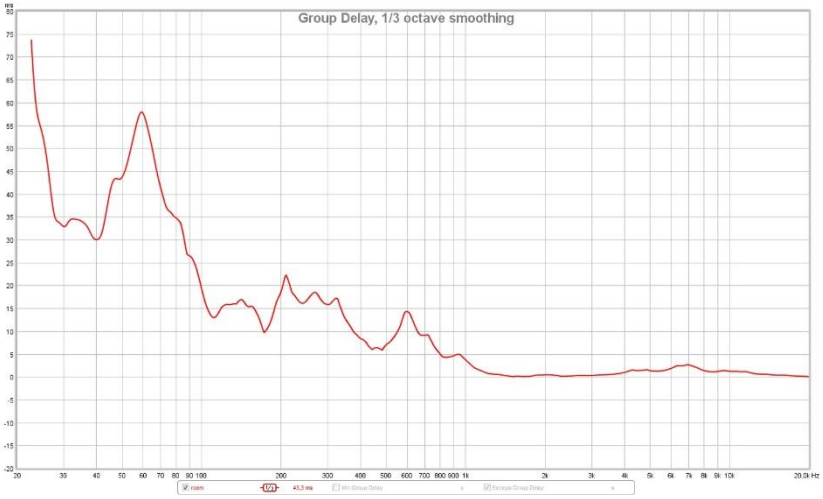


Abb. 6.43 Group Delay Darstellung im REW [12.17]

Eine weitere Option im REW ist die Darstellung nach Nachhallzeit (RT60) über die Frequenz als Stufendiagram. Hier lassen sich EDT, Topt, T30, T20 gleichzeitig anzeigen. T20 basiert hier auf einer Tangente am Schroeder-Plot zwischen -5dB und -25dB. T30 basiert auf einer Tangente am Schroeder-Plot zwischen -5dB und -35dB. “Topt” ist eine optimierte Nachhallzeitberechnung mit einer variablen Tangente am Schroeder-Plot.

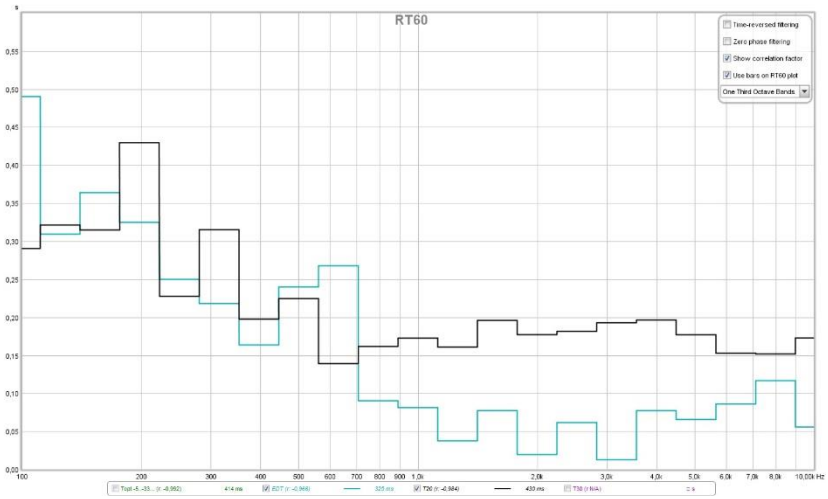


Abb. 6.44 RT60 Darstellung im REW [12.17]

7. Berechnung von Nachhallzeiten

Schon in der Planungsphase eines Regieraumes sollte man die Nachhallzeiten frequenzspezifisch berechnen. Im Folgenden kann man durch Verändern der Beschaffenheit von Begrenzungsflächen die Nachhallzeiten der Frequenzbänder beeinflussen. So kann die Nachhallzeit bei der Raumplanung auf ein vorgegebenes Maß (vgl. 5.1 Vorgaben für Regieräume) optimiert werden. Dadurch lassen sich Kosten für eine späte bauliche Korrektur der Regie sparen.

7.1. Berechnung nach Sabine

Um ohne Messung die Nachhallzeit für einen Raum mit bekanntem Volumen und Absorptionsgrad zu bestimmen, leitete im Jahre 1900 Wallace Clement Sabine durch empirische Versuche, einen Bezug zwischen Nachhallzeit, Raumvolumen und äquivalenter Schallabsorptionsfläche her. Die äquivalente Schallabsorptionsfläche ist die Fläche eines idealen Absorbers (mit $a=1$, vgl. 2.3) der die Summe aller Oberflächen im Raum durch seine Absorption ersetzt. In der Praxis berechnet man die Oberflächen aller Begrenzungsflächen und multipliziert diese mit ihrem Absorptionsgrad um a_n zu erhalten. Die Summe aller a_n ist A (die äquivalente Schallabsorptionsfläche). Diese Größe setzt man mit dem Raumvolumen in die Sabine'sche Formel ein (siehe Abb. 7.45).

$$RT_{60} = 0{,}163 \frac{V}{A} \qquad RT_{60} = 0{,}163 \frac{V}{\sum S_n a_n}$$

V = Raumvolumen
A = Äquivalente Schallabsorptionsfläche

Abb. 7.45 Die Sabine'sche Formel

Um zu überprüfen ob die Nachhallzeit sich über die Frequenz konstant verhält, werden die Nachhallzeiten für die Absorptionsgrade bei unterschiedlichen Frequenzen im Terz- oder Oktavabstand berechnet (siehe Tab. 2.1). Die frequenzspezifischen Nachhallzeiten für eine Regie sollten sich dann wie unter Abschnitt 5.1 beschrieben verhalten.

Die Sabine'sche Formel ist nur für große und hallige Räume anwendbar. Da W.C. Sabine die Nachhallzeiten mit der Taschenuhr stoppte, konnte er nur lange Nachhallzeiten von Kirchen und ähnlichen Gebäuden messen. Vermutlich durch diesen Umstand, liefert die Sabine'sche Formel für Räume über 500m^3 und durchschnittliche Absorptionsgrade kleiner als *a=0,25* bessere Ergebnisse als bei kleinen Räumen.

7.2. Berechnung nach Eyring

Bei der Sabine'schen Formel wird bei vollständiger Absorption (*A=1*) die Nachhallzeit nicht Null.[35] Von diesem Wiederspruch ausgehend, hat Eyring 1930 eine genauere Formel abgeleitet. Er hat in der Sabine'schen Formel die äquivalente Schallabsorptionsfläche *A* durch einen Faktor aus negativer Raumoberfläche und dem natürlichen Logarithmus von eins minus mittlerem Absorptionsgrad a_m ersetzt (vgl. Abb. 7.46). Der gemittelte Absorptionsgrad a_m ist die Summe aller äquivalenten Schallabsorptionsflächen des Raumes, geteilt durch die Gesamtoberfläche. Wenn der mittlere Absorptionsgrad a_m über einen angestrebten R_T60 Wert berechnet wird, und

[35] vgl. M.Dickreiter 1997, Bd.1, S.32

alle Oberflächen im Raum für alle Frequenzen diesen Wert besitzen, ist die Nachhallzeit für alle Frequenzen dem gewünschten R_T60 Wert entsprechend.
Durch die logarithmische Aufschlüsselung der Absorptionsfläche gilt die Formel bei kürzeren Nachhallzeiten, speziell bei kleinen stark bedämpften Räumen bis circa 500m³.

$$A = -S \ln(1 - a_m)$$

-S = Oberfläche des Raumes
ln = Logarithmus Naturalis

a_m = mittlerer Absorptionsgrad $\quad a_m = \frac{\sum S_n * a_n}{\sum S_n}$

$$RT_{60} = 0{,}163 \frac{V}{-S \ln(1 - a_m)}$$

Abb. 7.46 Die Formel nach Eyring

Die noch genauere Knudsensche Nachhallformel berücksichtigt auch die Luftabsorption, hat aber in der Praxis eine geringe Bedeutung, da sie meist genauer als entsprechende Messungen (siehe 5.2) ist[36].

8. Lautsprecher- und Abhörposition

Bei der Stereowiedergabe ist im Allgemeinen der Aufbau als gleichseitiges Dreieck zwischen Abhörposition und den beiden Lautsprechern gegeben. Der Hörer sitzt meist etwas nach hinten in der Stereohörfläche positioniert. Durch den Aufbau des Schallfeldes im Raum ergeben sich Kriterien, die bei der Lautsprechaufstellung beachtet werden müssen. Wie schon unter Punkt 3.6 erwähnt, ist die Position der Lautsprecher relevant für die Übertragungsfunktionen des Raumes.

[36] vgl. M.Dickreiter 1997, Bd.1, S.32

8.1. Lautsprecherposition

Werden die Lautsprecher in Raumkanten oder Raumecken positioniert, wird der Schalldruck in den verbleibenden Abstrahldichtungen um 12dB bzw. 18dB erhöht (vgl. Abb. 8.47). Da Raummoden an Wänden, Raumkanten und in den Raumecken ihr Maximum haben, werden diese dort noch verstärkt. Man sollte also vermeiden Lautsprecher in die Schalldruckmaxima der Raummoden zu positionieren.

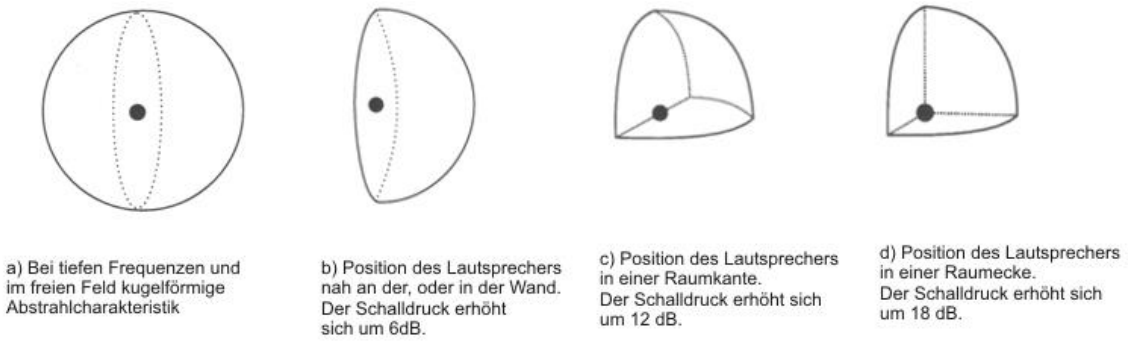


Abb. 8.47 Schalldruck nach Lautsprecherposition [12.15]

Die in Tonstudios häufig gesehene Aufstellung der Nahfeld-Lautsprecher auf der Meterbridge des Mischpultes hat fast immer nachteilige Einflüsse auf den Frequenzgang. Im Extremfall entsteht die komplette Auslöschung einer Frequenz und deren Obertönen, welche über die Mischpultoberfläche um die halbe Wellenlänge der Frequenz verzögert wurde (vgl. Abb. 8.48).

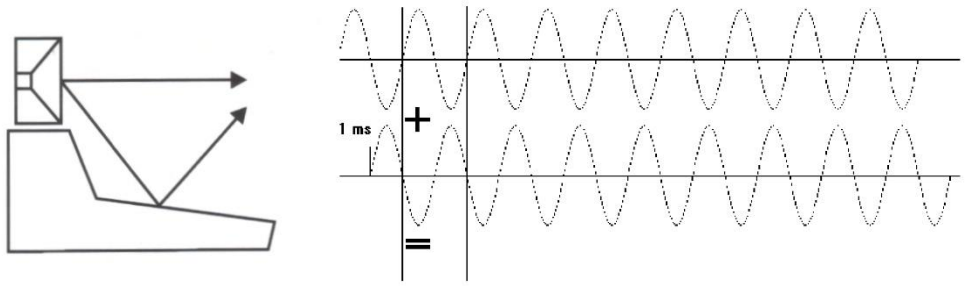


Abb. 8.48 Kammfilter durch Reflexionen der Mischpultoberfläche [12.15]

Meist liegen diese Auslöschungen in einem sehr relevanten Frequenzbereich von 1kHz bis 2kHz. Durch die Aufstellung der Lautsprecher hinter der Meterbridge kann

man diesen Effekt umgehen, muss dann jedoch die Abschattung durch die Meterbridge hinnehmen.

8.2. Auslöschungen durch Wandreflexionen

Bei der Positionierung der Lautsprecher kurz vor einer Begrenzungsoberfläche wird vor allem der tieffrequente, omnidirektional abgestrahlte Schall von der Wand reflektiert. Ist der Abstand von der Wand zum Lautsprecher dabei gleich einem Viertel der Wellenlänge des Schalls wird diese Frequenz durch die gegenphasige Reflexion der Wand ausgelöscht (vgl. Abb. 8.49).

Ist durch die Gegebenheiten des Raumes die Aufstellung im freien Feld nicht möglich, kann man den Lautsprecher in die Wand einbauen. Durch dieses *Studio-Monitoring* umgeht man den Effekt der Auslöschungen. Die Aufstellung direkt vor der Wand ist auch möglich und verschiebt die Auslöschungen in hochfrequente Bereiche, welche gerichtet nach vorn abgestrahlt werden.

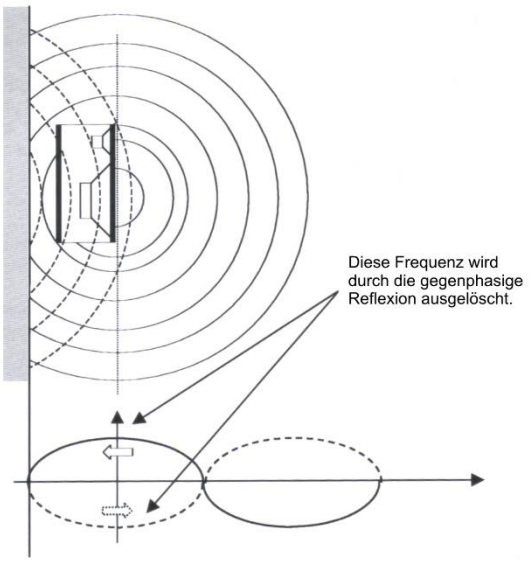


Abb. 8.49 Auslöschungen durch gegenphasige Reflexionen [12.15]

8.3. Abhörposition

Um die ungleichmäßige Schalldruckverteilung einer stehenden Welle zu beachten, sollte die Abhörposition im Raum nicht genau auf dem Druckmaximum einer Raummode liegen (vgl. Abb. 8.50). Die in der Abbildung dargestellten Abhörpositionen sind dabei eher die Position des Tonstudio Kunden in der Regie als die des

Tonmeisters. Die Position des Tonmeisters ist durch die Ausmaße des Mischpultes in den Möglichkeiten sehr beschränkt, sollte aber, wenn möglich berücksichtigt werden.

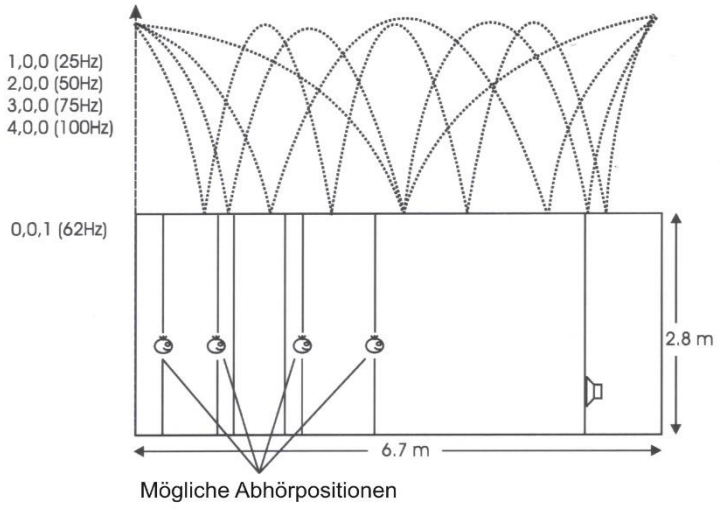


Abb. 8.50 Abhörposition im Raum [12.15]

9. Akustische Gestaltung einer Regie

Vorrangig bei der Gestaltung einer Regie ist die Idee, dass die ersten Reflektionen der Rauminformation einer Aufnahme den Hörer immer vor der ersten Reflektion des Regieraumes erreichen. Entscheidend hierbei ist der Haaseffekt, der besagt, dass der erste Schall den Richtungseindruck bestimmt. Die Ortbarkeit ist unabhängig davon aus welcher Richtung der folgende Schall kommt, auch wenn der zuerst eintreffende Schall 10dB leiser wie der folgende Schall ist.

Die ersten Reflektionen des Regieraumes sollten innerhalb von 20-25 ms beim Hörer eintreffen, später wird eventuell ein Echo hörbar. Dieses *Initial-time-delay gap* ist verantwortlich dafür, dass der Direktschall der Lautsprecher von den Ohren klar interpretiert werden kann. Die ersten Reflektionen nach dem *IDT-gap* geben dem Hörer den Eindruck eines größeren Raumes und erhöhen die Lautheit ohne die Ortbarkeit zu beeinflussen. Das gesamte Schallfeld sollte homogen und diffus gestaltet sein und die Ausbildung der Raummoden sollte bei der Raumgestaltung berücksichtigt werden.

9.1. Raumkonzepte

Das Live-End / Dead-End (LEDE) Prinzip verfolgt die Idee in den ersten 15 bis 20 Millisekunden alle Reflexionen zu vermeiden bzw. so niederpegelig wie möglich zu halten (vgl. Abschnitt 9). Dabei wird der gesamte vordere Bereich der Regie reflexionsarm ausgelegt. Das ist für tiefe Frequenzen unter 200 Hz kaum zu erreichen. Deshalb erweitert man die LEDE-Idee, und lenkt tiefe Frequenzen durch die Raumgeometrie so um, dass eine reflexionsfreie Zone (RFZ) entsteht, in welcher der Direktschall nicht unmittelbar auf die Abhörposition reflektiert wird (vgl. Abb. 9.51 rote Feile). Man wählt man also eine Kombination aus der Umlenkung von tiefen Frequenzen, und eine Mitten-/ Höhen-Absorption im Frontbereich. Der hintere Bereich wird über Diffusoren lebendig-diffus gestaltet.[37] So werden die Reflexion diffusiert beim Hörer eintreffen und ein homogenes Schallfeld erzeugen. Dieses Konzept wird Westlake-Prinzip genannt.

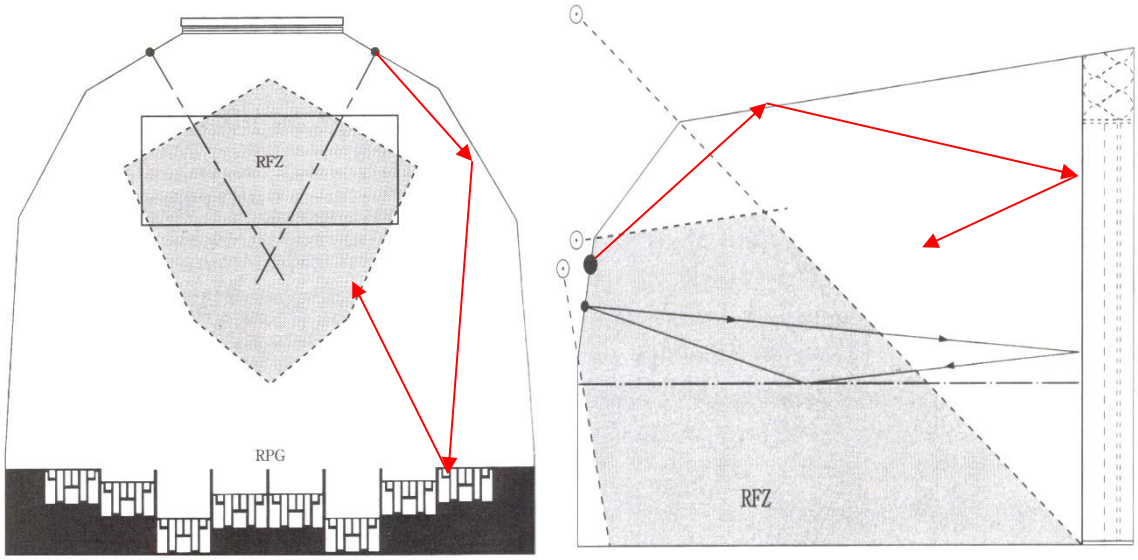


Abb. 9.51 Regie mit reflektionsfreier Zone (RFZ)

9.2. Raumgeometrie und Reflexionsverhalten.

Durch die Vorstellung der Schall wäre Licht und die reflektierenden Wände wären Spiegel, kann man bei der Planung eines Raumes gezielt eine Vorstellung davon

[37] vgl. Jochen Veit, März 1999, S.41

entwickeln, wie der Schall sich während der ersten Reflexionen im Raum ausdehnt (vgl. Abb. 9.51). Es sollte verhindert werden, dass der Direktschall der Lautsprecher von einer hart reflektierenden Begrenzungsfläche zum Hörer reflektiert wird. Solche harten Reflexionen nur um einige Millisekunden verzögert, würden den Höreindruck immens verschlechtern, und zu schlechtem Ortungsverhalten und Kammfiltern führen. Des Weiteren verhindern schräg angeordnete Wände (vgl. Abb. 9.51) die Entstehung von Raummoden und Flatterechos. So können sich nur Raummoden über mehrere Reflektionsflächen bilden, und diese sind in ihrer Energie durch die häufige Reflexion nicht stark ausgeprägt (vgl. 3.3).

9.3. Positionierung von Diffusoren

Reflexionen welche nach dem *IDT-gap* den Hörer erreichen, sollten möglichst diffus und homogen sein (vgl. Abschnitt 9). Somit sollte der Schall an den Reflexionsflächen diffusiert werden. Diffusoren an der Rückwand der Regie (vgl. Abb. 9.51 RPG-Diffusoren) reflektieren den Schall diffus zum Hörer zurück, und die Ausbreitung des Nachhalls im Raum wird homogener. Harte Reflexionen werden vermieden, wodurch der Direktschall der Lautsprecher besser beurteilt werden kann. Einzelne Reflexionen werden durch die Diffusion in viele Reflexionen aufgeteilt, welche viele einzelne Kammfiltereffekte verursachen, die von unserem Ohr als viel angenehmer wahrgenommen werden wie die durch einzelne schallharte Reflexionen hervorgerufenen Kammfilter[38]. Dabei sollte man beachten, dass eindimensionale Diffusoren (vgl. 4.4) nur in der Richtung senkrecht zu den Streifen eine streuende Wirkung haben. Da in einer Regie akustisch symmetrische Verhältnisse herrschen sollen, müssen auch die Diffusoren in Bezug auf ihre Ein- oder Zweidimensionalität symmetrisch angeordnet sein. Durch die Streuung der Reflexionen über Diffusoren wird der „*Sweet Spot*“ an der Hörposition größer, weil der Bereich im Raum, in dem ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Direktschall und Diffusschall herrscht, größer wird.

[38] vgl. A.Everest 2001, S.433

9.4. Positionierung von Absorbern und Resonatoren

Vergleicht man die Schallausbreitung eines Musiksignals im Rohbau des Mischkinos in Hamburg[39] [Track 8] mit dem Originalsignal [Track 14] fällt auf, dass der Effekt des kurzen Delays auf der Stimme der Sängerin bei der Schallausbreitung im Rohbau nicht mehr zu hören ist. Das Delay wir vom Diffusschall verdeckt. Nach dem Einbau einer akustischen Decke, welche vor allem Frequenzen von 50Hz bis zu 2kHz bedämpft (vgl. Abb. 9.52) ist das Delay auf der Stimme der Sängerin wieder wahrnehmbar [vgl. Track 9]. Somit lassen sich Absorber und absorbierende Resonatoren dazu einsetzen die Nachhallzeit frequenzselektiv auf ein gewünschtes Maß zu senken.

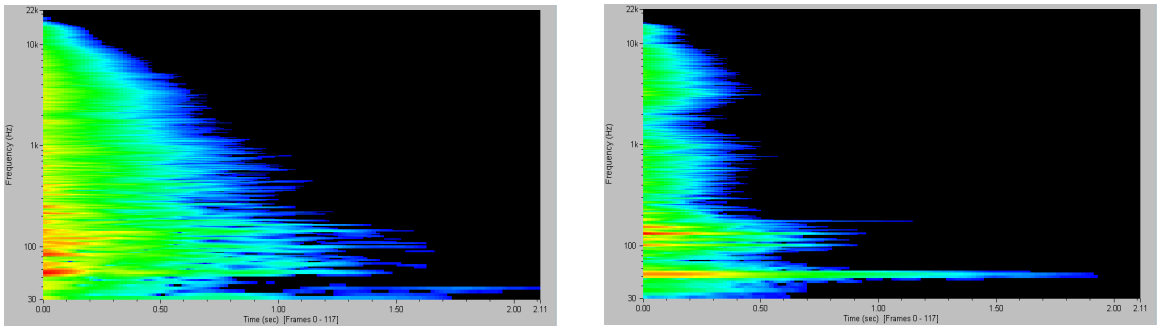


Abb. 9.52 Zerfallsspektrum der Schallenergie ohne (links) und mit absorptiver Decke

Im mittleren und hohen Frequenzbereich ist die Position der Absorber im Raum weniger von Bedeutung als im tieffrequenten Bereich. Im mittleren und hohen Frequenzbereich baut sich das diffuse Schallfeld sehr schnell auf, und wird durch die geringen Wellenlängen sehr schnell durch absorbierende Oberflächen bedämft. Somit ist die absorbierende Decke im obigen Beispiel problemlos an allen Raumpositionen messtechnisch zu belegen (vgl. Abschnitt 6). Im tieffrequenten Bereich breitet sich der Schall als Welle aus. Hier muss der Absorber im Druckmaximum der zu dämpfenden Frequenz positioniert sein.

Lässt sich eine schlechte Raummodenverteilung nicht durch die Raumgeometrie verhindern, kann man bestimmte Frequenzen bedämpfen, welche durch Moden unverhältnismäßig verstärkt werden. Das Mischkino in Hamburg hat durch seine Raumdimensionen ausgeprägte Raummoden (vgl. Abb. 9.53 oben). In der Darstellung ist deutlich eine Energiespitze bei circa 45 Hz zu erkennen. Nach der Installation einer

[39] siehe Punkt 13

Bassfalle (vgl. Abschnitt 4.1) ist die Energie in dem Bereich um 45Hz deutlich zurück gegangen (vgl. Abb. 9.53 unten). Vergleicht man die Hörbarkeit der Bässe eines Filmes vor [Track 17] und nach der Installation der Bassfalle [Tack18] wird deutlich, dass durch die Bassfalle die Explosionen zu Beginn des Films akzentuierter wahrnehmbar sind. Die Transienten der Explosionen sind deutlicher auszumachen. Bei den installierten Bassfallen handelt es sich um Helmholtz-Resonatoren deren Resonanzfrequenz bei 45Hz liegt. Sie werden dort positioniert, wo die Raummoden ihr Druckmaximum haben. Am effektivsten ist die Position in den Raumecken, wo die Moden sich gegenseitig verstärken. Eine Position an den zwei Wänden welche circa 3,8 Meter Wandabstand haben, um bei 45Hz eine (0,1,0) Mode zu erzeugen ist ebenfalls möglich. Oder an den parallelen Wänden mit 7,6 Meter Abstand, die bei 45Hz eine (2,0,0) Mode bilden.

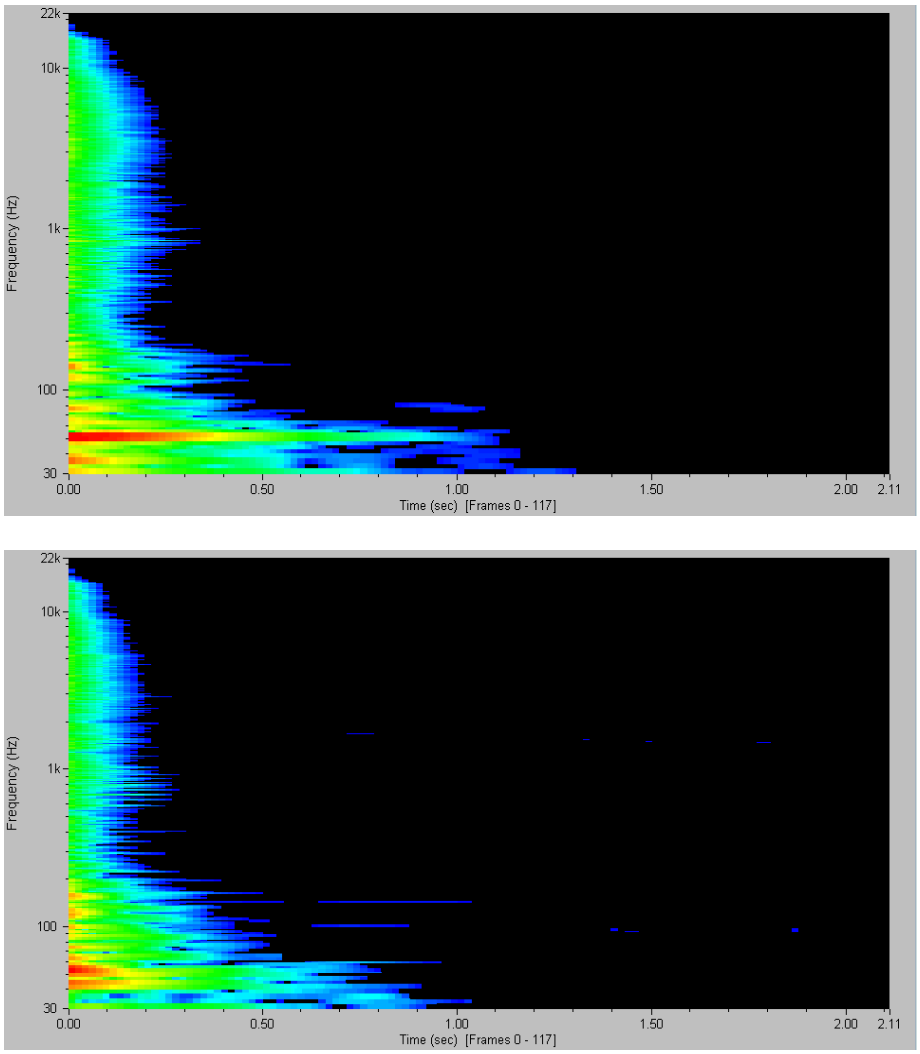


Abb. 9.53 Zerfallsspektrum der Schallenergie ohne (oben) und mit Bassfalle

9.5. Kombination der Raumoberflächen

Somit ergibt sich ein komplexes Bild von reflektierenden, absorbierenden und diffusierenden Flächen im Raum. Die Kombination der absorptiven Flächen sollte so gestaltet sein, dass sich eine wie unter Abschnitt 5.1 beschriebene Nachhallzeit ergibt. Dabei ist auch auf eine Auswahl von absorptiven Oberflächen zu achten, welche in Ihrer Gesamtheit eine über die Frequenz lineare Nachhallzeit erzeugen. Flächen, die den durch die Schallwandler abgestrahlten Schall zum Hörer zurück reflektieren,

sollten diffus gestaltet sein. Dabei führt ein zu hohes Maß an Diffusion zu einer Erhöhung der Nachhallzeit.
Lassen sich harte Reflexionen (zum Beispiel durch die Regiescheibe) nicht vermeiden, sollten sie auf eine absorptive Oberfläche strahlen, oder stark diffusiert werden. Dazu sollte die Raumgeometrie und die Oberflächen im Raum ein *IDT-gap* von 15-20ms erzeugen. So entsteht eine reflexionsfreie Zone, in der das Beurteilen des vom Schallwandler abgestrahlten Signals möglich ist.
Dabei kann der Frontbereich, welcher keine direkten Reflexionen zum Hörer leiten soll, absorptiv gestaltete werden. Eine weitere Variante ist die etwas diffus gestaltete Front.[40] Dies beseitigt Probleme mit den Pult- und Nahfeldmonitorreflexionen welche dabei durch den Diffusschall verdeckt werden.
Beim *Studio-Monitoring* mit eingebauten Schallwandlern ist es möglich die Front als schallharte Wand auszulegen. Dabei werden die über die Rückwand diffus reflektierten Schallwellen über die Front zum Hörer geleitet. Durch die Diffusion der Rückwand und die Laufzeit ist dies eine mögliche Variation um die Nachhallzeit durch ein zu viel an absorptiven Flächen nicht zu kurz werden zu lassen.

10. Das Einmessen einer Regie

Das „Einmessen“ einer Regie bedeutet umgangssprachlich eine Anpassung der Lautsprecherwiedergabe an die akustischen Bedingungen des Raumes. Sollten alle vorher angesprochenen Punkte beim Bau eines Tonstudios beachtet worden sein, ist ein Einmessen der Lautsprecher nicht nötig.
Professionelle Lautsprecher sind auf eine frequenzlineare Wiedergabe und auf ein korrektes Zeitverhalten hin konzipiert. Dazu werden diese vom Entwickler im Vollfreifeld vermessen um die Wiedergabe ohne störende Reflexionen beurteilen zu können. In einer guten Regie werden die Lautsprecher daher wie vom Hersteller vorgesehen klingen. Zwar wird es unter realen Bedingungen immer Reflexionen geben. Aber diese können wie unter Punkt 9 (Akustische Gestaltung einer Regie) beschrieben diffus, verzögert und kontrolliert am Ohr eintreffen.

[40] vgl. Jochen Veith, März 1999, S.42

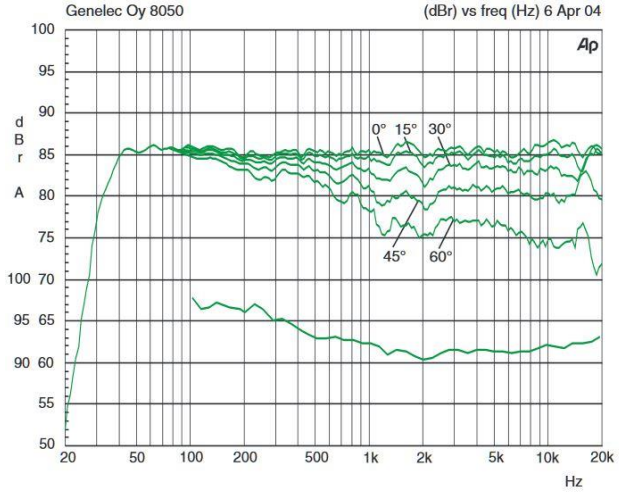


Abb. 10.54 Frequenzgang Genelec 8050B Lautsprecher [12.19]

Da ein völlig kompromissloses Vorgehen beim Studiobau aber selten anzutreffen ist bietet sich die Möglichkeit über das Einmessen eine Verbesserung der Abhörsituation zu erreichen. Im Stereobetrieb werden dazu beide Lautsprecher getrennt betrachtet. Im Surroundfeld oder als „Stereo plus Subwoofer Setup“ erhöht sich dementsprechend der Aufwand.

Nach der Messung mittels entsprechender Software (zum Beispiel Room EQ Wizard[41]) ergibt sich aus der Übertragungsfunktion vom Lautsprecher zum Mikrofon der Frequenzgang der Lautsprecher im Raum. Trotz Einsatz von Absorbern ist der Einfluss der Raummoden in Räumen ohne „Golden Ratio“ (siehe Punkt 3.6) meist erheblich. Die Energie wird zwar schneller abgebaut, aber es besteht immer noch eine Verzerrung im Bereich der Schalldruckminima und Schalldruckmaxima. In der Ansicht der Übertragungsfunktion entspricht eine Dartstellung mit 1/3 Oktavbandglättung in etwa der Wahrnehmung des menschlichen Ohres. Die Kerben und Überhöhungen welche in einer nicht geglätteten Grafik sichtbar werden kann das Ohr nicht vollständig wahrnehmen. Anhand dieser Informationen kann mittels Equalizer der Frequenzgang des Lautsprechers angepasst werden. Hier ist das Absenken von Überhöhungen effektiver als das Anheben der Schalldruckminima. Zusätzlich schränken starke Anhebungen die Dynamik der Lautsprecher ein.

[41] Siehe Room EQ Wizard [12.17]

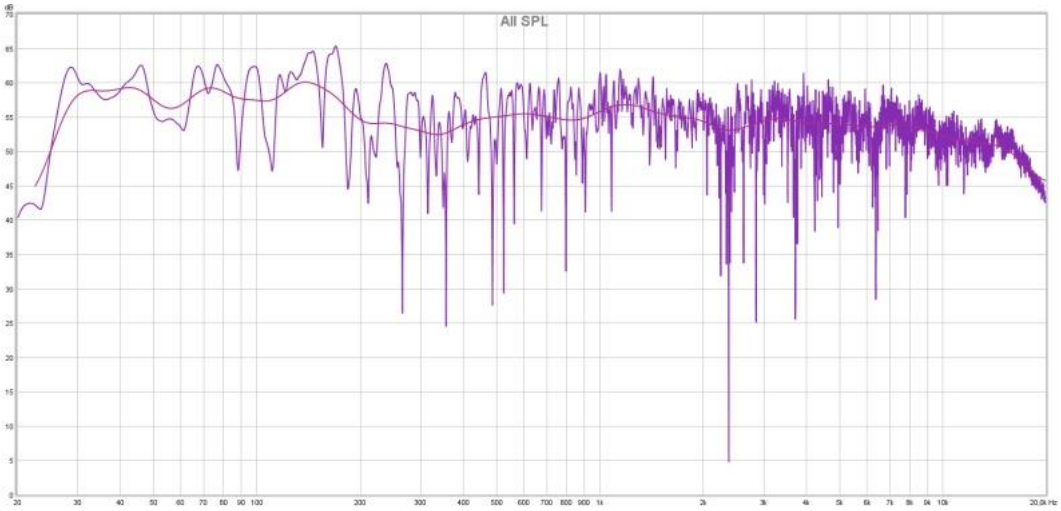


Abb. 10.55 Frequenzgang Lautsprecher (1/3 Oktavglättung und ungeglättet) [12.17]

Jede Bearbeitung kann jedoch nur für einen Teilbereich des Raumes eine Verbesserung bringen, da die Korrelation der Moden an jedem Punkt des Raumes unterschiedlich ist (siehe Punkt 3.4)[42]. Hier sollte man auf jeden Fall neben der Software auf die Wahrnehmung über die Ohren vertrauen. Im Bereich über ca. 500 Hz (siehe Punkt 3.6 Schoederfrequenz) sollte man von einer Entzerrung absehen, da dort die Raummoden kaum noch Einfluss haben.

Nach entsprechender Planung (siehe Punkt 7) kann über die Messung nun auch die Nachhallzeit (siehe Punkt 5.2.3) bestimmt werden. Abweichungen zur Planung können durch Absorber (siehe Punkt 4) entsprechend angepasst werden.

In der Planung wird versucht über die Raumgeometrie, Diffusoren und Absorber das Reflexionsmuster an der Abhörposition möglichst diffus und mit definierter Abklingzeit (siehe Punkt 5 Nachhallzeit) zu gestalten. In der Darstellung der Impulsantwort lassen sich mögliche Probleme durch einzelne Reflexionen erkennen. Sollte 11,65 ms nach dem Direktschall eine deutliche Reflexion erkennbar sein und der Weg des Schalls vom Lautsprecher über die Rückwand zum Messmikrofon (bei einer angenommenen Schallgeschwindigkeit von 343,2 m/s bei 20°C) 4 m betragen, dann sollte in der Planung an der reflektierenden Fläche ein Diffusor oder Absorber vorgesehen werden.

[42] siehe „Überlegungen zum Bau eines Tonstudios“ [12.20]

Ein zusätzlicher Absorber verändert die Nachhallzeit im Raum. Falls diese schon geplant und optimal umgesetzt wurde ist der Einsatz eines Diffusors sinnvoll. Jedoch haben auch Diffusoren eine absorbierende Wirkung, welche in der Planung berücksichtigt werden sollte.

In Excel nennt man dieses Patt Zirkelbezug. Daher ist eine gute, durchdachte und im Vorfeld berechnete Planung in der Auslegung der Akustik enorm wichtig.

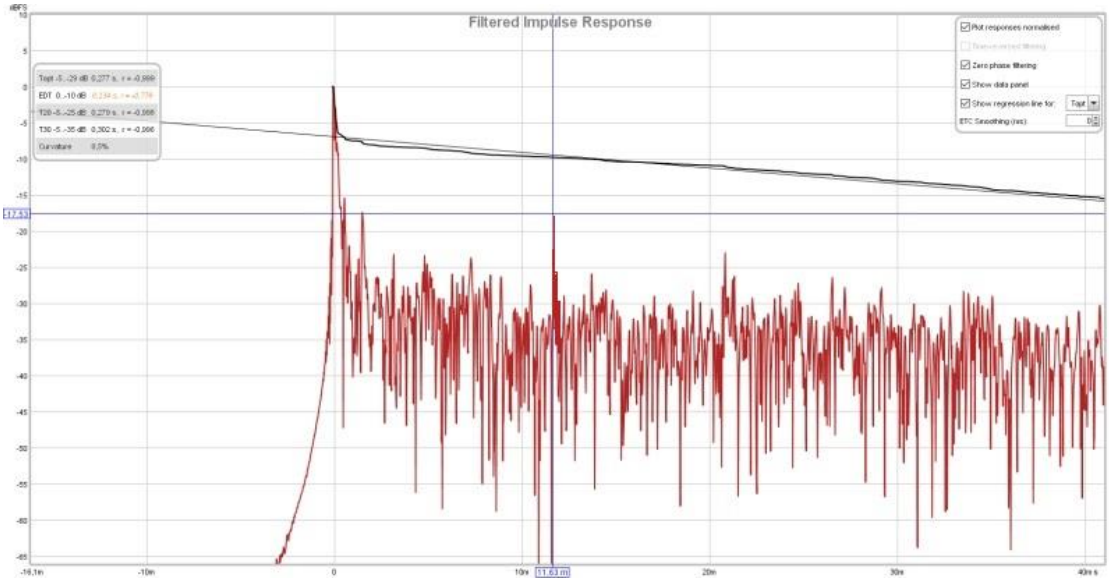


Abb. 10.56 Darstellung Impuls [12.17]

11. Fazit

Raumakustik ist ein ausgedehntes Feld. Angefangen bei den einfachsten Grundregeln der Schallreflexion bis zur Berechnung eines RPG-Diffusors oder dem Umgang mit Maximalfolgen. Dennoch ist der Umgang damit faszinierend wie Superstring Theorien von Stephen W. Hawking. Wenn man einmal akustisch wahrgenommen hat, zu welchem Ergebnis Konsequenz bei der Akustik führt, ist man überwältigt. Das Hören von Musik in der Regie-A des Studio301 in Köln, über Neil Grant's BoxerT5 Monitore, gehört für mich als audiophilen Menschen zu den Höhepunkten meiner Hörerlebnisse. Als hätte man Jahre seines Lebens mit einer Sehschwäche von sechs Dioptrin verbracht, und bekommt dann eines Tages eine Brille geschenkt.

Musik wahrzunehmen ist eine wunderbare Sache, und im Laufe der Zeit versucht der aufmerksam Hörende alle noch so kleinen Details hörbar zu machen. Womit wir wieder bei der Raumakustik sind.

Der Vergleich von Track1 und Track6 zu Anfang der Facharbeit verdeutlicht, was gemeint ist. Eine Akustik wie in der Regie-A des Studio301 ist nur über immens teure bauakustische Maßnahmen und Umsetzungen der Raumakustik zu erreichen. Alles um *nur* Musik hören zu können. Schön, dass es so etwas gibt.

Mittlerweile gibt es das Studio 301 in Köln und mein Studio in Goslar leider nicht mehr. Ich arbeitet heute im Bereich Automotive-Akustik für eine der führenden Firmen in der Automobilentwicklung. Immer noch bin ich als Musiker, Produzent, Akustiker und audiophiler Enthusiast tätig. Musik produziere ich heute in meinem Studio in Sarstedt. Immer noch fasziniert von gutem Klang!

Bedanken möchte ich mich hier im Besonderen bei Fritz Fey für seine freundliche Unterstützung und bei Ralph Kessler für die Freigabe der Hörbeispiele und vieles mehr.

Und bei Sabine, die mich immer unterstützt und gefordert hat.

12. Quellenverzeichnis

[12.01] **Michael, Dickreiter**: *Handbuch der Tonstudiotechnik,* Band 1, 6. Auflage, München: K.G. Saur Verlag, 1997

[12.02] **Michael, Dickreiter**: *Handbuch der Tonstudiotechnik*, Band 2, 6. Auflage, München: K.G. Saur Verlag, 1997

[12.03] **F. Alten, Everest**: *Master Handbook of Acoustics*, Fourth Edition, o. O.: McGraw Hill, 2001

[12.04] **Thomas, Görne**: *Mikrofone in Theorie und Praxis,* 5. Auflage, Aachen: Elektor-Verlag GmbH, 1994

[12.05] **Jochen, Veit**: *Eiertanz. Akustische Lösungswege für die Surroundwiedergabe in Tonstudios*, In: Studio Magazin, März 1999, Studio Presse Verlag GmbH

[12.06] **Fraunhofer Institut Bauphysik**: FhG-IBP 2003 http://www.pia-alfa.de/de/anim.htm [Letzter Zugriff 12.6.2003]

[12.07] **Mike Shea, F. Alton Everest***: How to Build a Small Budget Recording Studio From Scratch*, o. O.: McGraw-Hill, 2002

[12.08] **ASD Advanced Simulation & Design GmbH**: 2002 http://www.asd-online.com/ger/ger_jsmindex.htm?fem-analyse.htm [Letzter Zugriff 13.5.2003]

[12.09] **O.J. Bonello**: *A new criterium for the distribution of normal room modes*, *J. Audio Eng. Soc*., 1981

[12.10] **K. Eggenschwiler** EMPA/HSR-Tagung 2001 *Holz in der Raumakustik* Download: http://www.arch.ethz.ch/eggenschwiler/vortrag6.pdf [Letzter Zugriff 19.5.2003]

[12.11] **akustik.info**. Die Infoline / Raumakustik http://www.hunecke.de/german/infoline/raumakustik.htm [Letzter Zugriff 24.5.2003]

[12.12] **ASCENDO**: *Room Tools Manual V 2.4* Download: http://www.ascendo.de/pdf/Room-Tools_2.4_Manual.pdf [Letzter Zugriff 24.5.2003]

[12.13] **Fritz, Fey**: *Action Pack. ASCENDO Room Tools und DFM Fir-BOX2*, In: Studio Magazin, Juni 2002, Studio Presse Verlag GmbH

[12.14] **Ingenieurbüro Pinguin**: *Auralisation* http://www.masterpinguin.de/neu/files/posthouse/main.html [Letzter Zugriff 25.2.2003]

[12.15] **Dynaudio**: *Placing the Monitors. Manual AIR monitor system* http://www.dynaudioacoustics.com/Default.asp?Id=413 [Letzter Zugriff 25.6.2003]

[12.16] **Angelo Farina**: *Advancements in impulse Advancements response measurements by sine sweepssine sweeps* http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Presentations/aes122-farina.pdf [Letzter Zugriff 12.9.2018]

[12.17] **Room EQ Wizard:** https://www.roomeqwizard.com/ [Letzter Zugriff 12.9.2018]

[12.18] **Youngbloodstudios:** http://www.youngbloodstudios.de/ [Letzter Zugriff 12.9.2018]

[12.19] **Genelec 8050B Manual:** https://www.genelec.com/sites/default/files/media/Studio%20monitors/8000%20Series%20Studio%20Monitors/8050B/8050b_datasheet_c.pdf [Letzter Zugriff 12.9.2018]

[12.20] **Christian Jungebluth:** *Überlegungen zum Bau eines Tonstudios* http://www.youngbloodstudios.de/image/Artikel_Studiobau_SM0309.pdf [Letzter Zugriff 12.9.2018]

13. Audiobeispiele

Quelle der Tracks [1 - 22]: Mit freundlicher Genehmigung des Ingenieurbüro Pinguin (Ralph Kessler, Mexikoring 33, D-22297 Hamburg) Online im Internet: URL: http://www.masterpinguin.de/-2013/posthouse/proj-services-3D-posthouse.html [Letzter Zugriff 11.09.2018]

Die CD Tracks sind vom Ingenieurbüro Pinguin zur Veranschaulichung Ihrer Arbeit als Raumakustikplaner erstellt worden. Der gehörte Raum ist ein Mischkino der „Posthouse AG“ in Hamburg. Die einzelnen, raumakustisch wichtigen, baulichen Schritte wurden mit jeweils drei Audio-Beispielen festgehalten. Die jeweils ersten fünf Beispiele sind mit einem Lautsprecher in der Raumecke als Quelle aufgezeichnet worden (siehe Abb. 13.57). Im sechsten Beispiel dienen alle elf Lautsprechern als Quelle (siehe Abb. 13.58). Aufgezeichnet wurde die Raumantwort mit Messmikrofonen in einer Groß A-B Anordnung (Mikrofonbasis 40cm).

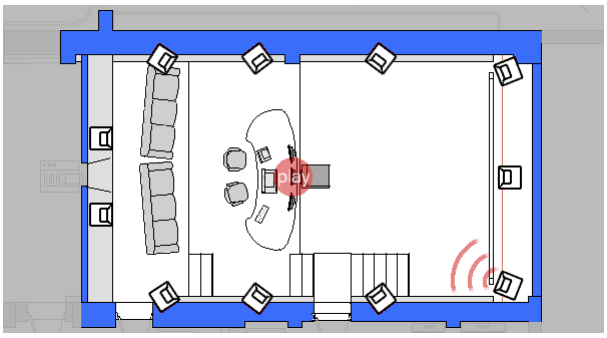


Abb. 13.57: ein Lautsprecher als Quelle

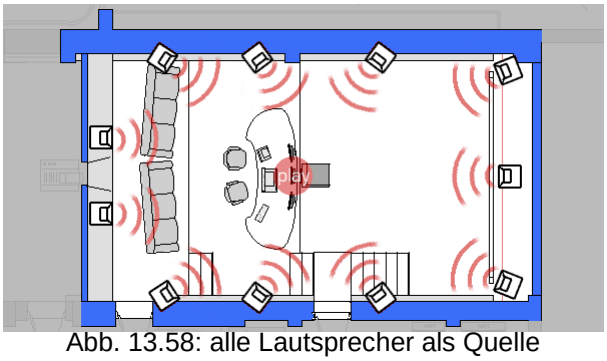


Abb. 13.58: alle Lautsprecher als Quelle

13.1. Aufstellung aller Audiobeispiele mit Beschreibung

Track 1	Pop Musik	im Raum mit glatten Betonwänden ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 2	Pop Musik	im Raum mit akustischer Decke ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 3	Pop Musik	im Raum mit akustischer Decke und Mittenabsorber ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 4	Pop Musik	im Raum mit akustischer Decke, Mittenabsorbern und Bassfalle ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 5	Pop Musik	in der endgültigen Raumgestaltung mit Kinoleinwand ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 6	Pop Musik	in der endgültigen Raumgestaltung mit Kinoleinwand alle Lautsprecher dienen als Schallquelle
Track 7	Pop Musik	das Ursprungssignal
Track 8	Sprache	im Raum mit glatten Betonwänden ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 9	Sprache	im Raum mit akustischer Decke ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 10	Sprache	im Raum mit akustischer Decke und Mittenabsorber ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 11	Sprache	im Raum mit akustischer Decke, Mittenabsorbern und Bassfalle ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 12	Sprache	in der endgültigen Raumgestaltung mit Kinoleinwand ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 13	Sprache	in der endgültigen Raumgestaltung mit Kinoleinwand alle Lautsprecher dienen als Schallquelle
Track 14	Sprache	das Ursprungssignal
Track 15	Film	im Raum mit glatten Betonwänden ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 16	Film	im Raum mit akustischer Decke ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 17	Film	im Raum mit akustischer Decke und Mittenabsorber ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 18	Film	im Raum mit akustischer Decke, Mittenabsorbern und Bassfalle ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 19	Film	in der endgültigen Raumgestaltung mit Kinoleinwand ein Lautsprecher dient als Schallquelle
Track 20	Film	in der endgültigen Raumgestaltung mit Kinoleinwand alle Lautsprecher dienen als Schallquelle
Track 21	Film	das Ursprungssignal
Track 22		Sweep Messsignal (30Hz – 21kHz über 45 Sekunden, linker und rechter Kanal, -6 dBFS)
Track 23		Rosa Rauschen (-6 dBFS Peak, -16 dBFS RMS, mono)
Track 24		Weißes Rauschen (-8 dBFS RMS, mono)
Track 25		Terzband gefiltertes weißes Rauschen (f_c=1 kHz, f_1=891 Hz; f_2=1122 Hz; -6 dBFS vor dem Filter, -27 dBFS RMS nach Filterung, mono)
Track 26		Sweep Messsignal (16Hz – 20kHz über 4 Sekunden, zuerst der linke, dann der rechte Kanal, -6 dBFS)