

Martin Pohl

Angewandte Raumakustik für Stereo-Audio-Mischplatz
unter Anwendung des ESS-Konzepts

Diplomarbeit

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich Medien

Mittweida, 2009

Martin Pohl

Angewandte Raumakustik für Stereo-Audio-Mischplatz
unter Anwendung des ESS-Konzepts

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich Medien

Dresden, 2009

Erstprüfer:

Zweitprüfer:

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am:

Bibliographische Beschreibung:

Pohl, Martin:

Angewandte Raumakustik für Stereo-Audio-Mischplatz unter Anwendung des ESS-Konzepts - 2009. - 115 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Medien, Diplomarbeit, 2009

Referat:

Ziel der Diplomarbeit ist die raumakustische Konzeption eines Stereo-Audio-Mischplatzes unter Nutzung der gegebenen Räumlichkeiten. Dabei soll durch die Umsetzung des Early-Sound-Scattering-Konzepts eine vom Raum unbeeinflusste, einschätzbare Abhörsituation erreicht werden. Bei Planung und Umsetzung soll jeglichen, die Abhörsituation im Raum negativ beeinflussenden Aspekten, Rechnung getragen werden.

Hierzu wird zunächst in Planungsschritten den akustischen Effekten eine theoretische Lösung und deren praktische Umsetzung gegenübergestellt. Die Dimensionierung der akustisch wirkenden Elemente erfolgt durch eine rechnergestützte Raumakustiksimulation.

Abseits aller technischen Aspekte werden einige Gedanken zur ästhetischen Umsetzung, der technischen Notwendigkeiten dargelegt.

Zum Schluss erfolgt die messtechnische Untersuchung der akustischen Situation im real existierenden, gemäß den Planungen umgesetzten Raum.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	6
0 Einleitung.....	10
Über diese Arbeit.....	10
Vorgehensweise.....	10
1 Anforderungen an eine Audio-Regie allgemein.....	11
Die ideale Akustik.....	11
Akustik unbearbeiteter Räume.....	11
Regieraum Akustik.....	11
ESS-Regie.....	14
2 Planungsprozess Regieraum.....	15
Erklärung Planungsprozess.....	15
Zielstellung Regieraum.....	15
3 Primärstruktur Regieraum.....	16
3.1 Größe, Grundform.....	16
Einfluss von Raumproportionen auf den Frequenzgang.....	17
Eigenmodenverteilung in der Regie.....	17
3.2 Optimierung der Primärstruktur.....	19
Bestehende strukturelle Probleme.....	19
Lösung der strukturellen Probleme durch Umbau.....	20
4 Sekundärstruktur Regieraum.....	21
4.1 Regie Lautsprecher.....	21
4.1.1 Abstrahlverhalten von Lautsprechern und Raumakustik.....	21
Gewählter Hauptlautsprecher „Event ASP8“.....	21
Frequenzgang.....	23
Abstrahlverhalten eines Lautsprechers.....	24
Schallführungselement.....	25

Gehäusegröße.....	25
Simulation Abstrahlverhalten „Event ASP8“.....	27
4.1.2 Aufstellung von Regielautsprechern.....	29
Grundlegend zur Beachtung.....	29
Direktfeldmonitoring vs. Fernfeldmonitoring.....	29
Kammfilter-Effekte durch ungünstige Lautsprecheraufstellung.....	30
Problem bei Freifeldaufstellung von Regielautsprechern.....	32
Vorteile des Wandeinbaus von Regielautsprechern.....	33
Lautsprecheraufstellung Regie.....	33
4.2 Schallführung.....	35
4.2.1 Wahrnehmung im Raum.....	35
Frühe Reflexionen und ihr Einfluss.....	35
Maskierung / Verdeckung in Zeit- und Frequenzbereich.....	37
Die Anfangszeitlücke / Initial Time Delay Gap (ITDG).....	39
4.2.2 Vermeidung früher Reflexionen durch schallführende Elemente.....	40
Reflektoren.....	40
Grenzfrequenz für die Wirksamkeit einer Fläche als Reflektor.....	40
Deckenreflektor.....	41
Seitliche Abflektoren.....	42
Beispielrechnung zur Reflexionswirkung der Seitenabflektoren.....	43
4.3 Diffusität.....	44
4.3.1 Beeinflussung des Schallfeldes durch diffuse Reflexionen.....	44
Diffusität in ESS-Regie.....	44
Schröder-Diffusoren.....	45
Diffusität durch Phasengitter.....	46
4.3.2 Geplante Diffusoren in Tonregie.....	47
Schröder-Diffusorelementen in Tonregie.....	47
Phasengitter-Diffusorelemente in Tonregie.....	49
4.4 Schallabsorption.....	50
4.4.1 Beeinflussung des Schallfeldes durch frequenzselektive Absorption.....	50

4.4.2 Technische Schallabsorber.....	51
Poröse Absorber.....	51
Plattenresonatoren.....	53
Helmholtzresonatoren.....	54
4.4.3 Geplante Absorption in Tonregie.....	55
Absorption im Raumkörper.....	55
Absorber an Decke und Rückwand.....	55
Kantenbeugungseffekt.....	57
Holzfußboden.....	58
Absorption im unteren Frequenzbereich.....	58
Zusammenspiel von Diffusion und Absorption in Tonregie.....	59
4.5 Dimensionierung der Absorptionsflächen.....	60
4.5.1 geplante Raumakustik-Simulation mittels CARA.....	60
Erläuterung des Spiegelschallquellenverfahrens.....	60
Anwendung des Spiegelschallquellenverfahrens durch CARA.....	61
4.5.2 Materialrecherche.....	62
Übernahme der ISOVER®-Absorptionskurven in den Materialeditor.....	63
Anordnung der Absorber in der Simulation.....	67
4.5.3 Ergebnisse der CARA-Simulation.....	68
Kurzerläuterung Nachhallzeit (klassisch).....	68
Ergebnis der Nachhallzeit (klassisch).....	68
Kurzerläuterung Frühe Nachhallzeit (aus Echogramm).....	69
Ergebnis der frühen Nachhallzeit aus Echogramm.....	70
Raumimpulsantwort, Echogramm und Integral Echogramm.....	70
Echogrammvarianten in CARA.....	71
Ergebnis Raumimpulsantwort / Echogramm.....	72
5 Fotodokumentation und Designstudien.....	74
6 Messung der raumakustischen Kriterien.....	78
6.1 Messtechnik zur Raumakustik.....	78

Was wird gemessen?.....	78
Womit wird gemessen?.....	78
Wo wird gemessen?.....	79
6.2 Raumakustische Messungen mit Fuzzmeasure Pro 3	80
6.2.1 Nachhallzeitmessung über Sweeps.....	80
6.2.2 Kurzerläuterung messtechnische Kenngrößen.....	81
Nachhallzeit als EDT und RT20.....	82
Energie-Zeit-Verlauf - Energy-Time-Curve - ETC.....	82
Energieabfall-Diagramm - Energy-Decay-Curve - EDC.....	83
Energie-Zeit-Frequenz Diagramme - Energy-Time-Frequency-Curve - ETF/84	
6.3 Auswertung der Messungen.....	85
6.3.1 Akustik-Messbericht Tonregie.....	85
Messpunkte Tonregie.....	85
Messaufbau Tonregie.....	86
6.3.2 Messresultate Tonregie.....	87
Übertragungsfunktionen an der Abhörposition - Diagramme.....	87
Kommentar zur Übertragungsfunktionen an der Abhörposition.....	89
Nachhallzeiten in der Tonregie anhand der ETC-Diagramme.....	90
Energieabfall-Diagramme / EDC-Diagramme.....	92
Kommentar EDC.....	92
Energie-Zeit-Frequenz Diagramme / ETF-Diagramme.....	93
Kommentar ETF.....	93
6.3.3 Vergleich Messresultate ohne/mit Akustikausbau.....	94
Raumimpulsantwort (RIA) - Vergleich vorher / nachher.....	94
Energie-Zeit-Verlauf (ETC) Nachhallzeit - Vergleich vorher / nachher.....	95
Energieabfall-Diagramm (EDC) - Vergleich vorher / nachher.....	96
Energie-Zeit-Frequenz-Diagramm (ETF) nach Akustikausbau.....	96
6.3.4 Vergleich Messresultate ohne/mit Schroeder-Diffusoren.....	97
Das 100 Hz Problem.....	100
ASP8 auf der Meterbridge und anderes.....	103

7 Fazit.....	105
8 Bildquellenverzeichnis.....	106
9 Literaturverzeichnis.....	111
9.1 Bücher.....	111
9.2 Hochschulschriften.....	111
9.3 Sonstige Schriften.....	111
9.5. elektronische Quellen.....	112
9.6 Internetquellen.....	112
9.7 Online Lexikon.....	114
10 Erklärung zur Selbstständigkeit.....	115

Abbildungsverzeichnis

Abb 1.1...	Schema Querschnitt Tonregieraum.....	12
Abb 1.2...	Schema Querschnitt Tonregieraum.....	13
Abb 1.3...	schematische Darstellung ESS-Prinzip.....	14
Abb 3.1...	Ursprüngliche Primärstruktur Regie- und Studioraum.....	16
Abb 3.2...	optimierte Raumgrößenverhältnisse - Bolt's Golden Ratios.....	17
Abb 3.3...	spektrale Verteilung der Raummoden / Raumeigenfrequenzen in Querausrichtung.....	18
Abb 3.4...	Bonello Kriterium für Raum mit L= 468 cm, B= 340 cm, H= 285 cm.....	18
Abb 3.5...	Nachteile der vorgefundenen Primärstruktur.....	20
Abb 3.6...	Regie- und Studioraum in optimierter Primärstruktur.....	21
Abb 4.1...	Event ASP 8, Studio Precision-Aktivmonitor, 8"-Tieftöner.....	22
Abb 4.2...	Anschlussfeld Event ASP8.....	23
Abb 4.3...	Frequenzgänge eines hochwertigen Lautsprechers.....	24
Abb 4.4...	Frequenzgang im Raum eines Lautsprechers mit nahezu idealem Freifeldfrequenzgang.....	24
Abb 4.5...	Abstrahlverhalten eines Lautsprechers_Horizontale Bündelung als Isobarendarstellung.....	25
Abb 4.6...	Schallführungselement der „EVENT ASP8“.....	26
Abb 4.7...	Beispielrechnung Zusammenhang Gehäusegröße-Beugungsverhalten.....	27
Abb 4.8...	Ballondarstellung der Abstrahlcharakteristik der ASP8 in 1 m Entfernung.....	28
Abb 4.9...	massstäbliche Darstellung Abstrahlcharakteristik LS - ESS-Diffuser.....	29
Abb 4.10...	Kammfilter durch Reflexionen der Mischpultoberfläche.....	31
Abb 4.11...	schematische Darstellung negativer Effekte durch Kammfiltereffekte.....	32
Abb 4.12...	Auslöschungen durch gegenphasige Reflexionen.....	33
Abb 4.13...	Schalldruck nach Lautsprecherposition.....	34
Abb 4.14...	Darstellung der Einbausituation der Lautsprecher.....	35
Abb 4.15...	Platzierung der Lautsprecher.....	35
Abb 4.16...	Schematisierte Raumimpulsantwort.....	36
Abb 4.17...	Darstellung des Einflusses der frühen Reflexionen auf Raumeindruck.....	37
Abb 4.18...	Anhebung der Wahrnehmbarkeitsschwelle bei Anwesenheit eines Störsignals.....	39
Abb 4.19...	Schematische Darstellung der zeitlichen Maskierung.....	39
Abb 4.20...	Prinzipdarstellung Anfangszeitlücke (ITDG).....	40
Abb 4.21...	Formel zu Mindestgröße für Reflexion.....	41
Abb 4.22...	Darstellung Deckenreflektor.....	42

Abb 4.23...	Darstellung der schallführenden Funktion des Deckenreflektors.....	42
Abb 4.24...	Formel zu Mindestgrösse für Reflexion.....	42
Abb 4.25...	Vergleichende Darstellung für das Prinzip der Abflectoren.....	43
Abb 4.26...	Aufbau Abflector.....	43
Abb 4.27...	Berechnung zu Mindestgrösse für Reflexion.....	44
Abb 4.28...	Berechnung zu Mindestgrösse für Reflexion.....	44
Abb 4.29...	schematische Darstellung ESS-Prinzip	46
Abb 4.30...	QRD - Diffusoren offen und geschlossen	47
Abb 4.31...	Phasengitter aus verschieden abgestimmten Lochplattenabsorbern.....	47
Abb 4.32...	Platzierung der QRD um Lautsprecher.....	48
Abb 4.33...	Anordnung der Diffusoren im Front End.....	49
Abb 4.34...	Maße für Diffusoren.....	49
Abb 4.35...	Wirkung des Phasengitter.....	50
Abb 4.36...	Wirkung Kombination	52
Abb 4.37...	Verbesserung Wirkung poröser Absorber.....	53
Abb 4.38...	Verbesserung Wirkung poröser Absorber.....	53
Abb 4.39...	Prinzip Plattenabsorber.....	54
Abb 4.40...	Anordnung der porösen Absorber im Raum.....	56
Abb 4.41...	Aufbau Absorber Rückwand.....	57
Abb 4.42...	durch unterschiedliche Wegstrecken effektiv unterschiedliche Wandabstände.....	57
Abb 4.43...	Verbesserung Wirkung poröser Absorber.....	58
Abb 4.44...	Vergleich CARA-Absorptionsgraphen Teppich und Parkett.....	59
Abb 4.45...	Raummodenlandschaft bei diversen Bassfrequenzen.....	59
Abb 4.46...	Anordnung der Plattenabsorber in der Regie.....	60
Abb 4.47...	Spiegelschallquellen für Rechteckraum.....	61
Abb 4.48...	ISOVER SSP2 Schallabsorbtionsgrad frequenzspezifisch.....	64
Abb 4.49...	Absorptionsgrade poröser Materialien - Ausschnitt.....	65
Abb 4.50...	Formel zur Verbesserung der Wirkung poröser Absorber bei Wandabstand.....	65
Abb 4.51...	berechnete Werte der Frequenzen im Schnellemax. bei versch. Wandabständen.....	65
Abb 4.52...	Verlauf des Absorptionsgrades von Akustikplatten.....	66
Abb 4.53...	Übersicht über diverse Absorptionsgradkurven aus der Literatur & Schätzkurve.....	66
Abb 4.54...	Editor Daten diverser Absorptionsgradkurven aus der Literatur & Schätzkurve	67
Abb 4.55 ...	CARA Bildschirmfoto Materialeditor_SSP2.....	67
Abb 4.56...	CARA Bildschirmfoto Materialeditor__Plattenabsorber_Spanplatte 8 mm.....	67

Abb 4.57...	CARA Bildschirmfoto; 3D Darstellung des Raumes.....	68
Abb 4.58...	Nachhallzeiten über die Frequenz der Regie von 80 Hz - 2 kHz nach klassischer Berechnung.....	69
Abb 4.59...	CARA T-10 der Regie von 80 Hz - 2 kHz.....	70
Abb 4.60...	Grafischer Vergleich der RIA aus Auralisation und Spezialberechnung in CARA.....	72
Abb 4.61...	Raumimpulsantwort aus der Auralisationsberechnung Regie 80 Hz - 2 kHz.....	73
Abb 4.62...	Raumimpulsantwort aus der Auralisationsberechnung Regie 80 Hz - 2 kHz Ausschnitt 0-24 ms.....	73
Abb 4.63...	Schallfelddarstellung Zeitverlauf Regie 80 Hz - 2 kHz.....	74
Abb 4.64...	Echogramm aus der Auralisationsberechnung Regie 80 Hz - 2 kHz.....	74
Abb 5.1...	Regie _ erste Stellproben.....	76
Abb 5.2...	Regie _ Bestückung.....	76
Abb 5.3...	Regie Endzustand.....	76
Abb 5.4...	Design Studien 01.....	77
Abb 5.5...	Design Studien 02.....	78
Abb 6.1...	Frequenzgang und Polardiagramm der Richtcharakteristik des ECM-8000.....	79
Abb 6.2...	Bildschirmfoto Fuzzmeasure-Pro 3.....	80
Abb 6.3...	Schematische Darstellung der Swept-Sine-Methode.....	81
Abb 6.4...	Loopback Verkabelung.....	81
Abb 6.5...	Impulsantwort MP01_L/R_LG (Compare Modus).....	82
Abb 6.6...	EDT, RT20 und RT30 über die Frequenz.....	83
Abb 6.7...	Energy Time Curve_MP01_L/R_LG (Compare Modus) Zoom -60 dB.....	83
Abb 6.8...	Energy Decay Curve / Schroederplot MP01 L+R.....	83
Abb 6.9...	Fuzzmeasure-Diagramme_Frequenzbereich aufgesplittet in Oktavbänder.....	84
Abb 6.10...	Energie-Zeit-Frequenz Diagramm_MP01_L/R_LG.....	85
Abb 6.11...	Anordnung Messpunkte.....	86
Abb 6.12...	Messaufbau in der Regie.....	87
Abb 6.13...	Prinzipdarstellung Messaufbau zur Messung mit Sweeps in der Regie.....	87
Abb 6.14...	Event ASP8; Übertragungsfunktion an der Abhörposition; linker Kanal.....	88
Abb 6.15...	Event ASP8; Mittelung Übertragungsfunktion an der Abhörposition; linker Kanal.....	88
Abb 6.16...	Event ASP8; Mittelung Übertragungsfkt. an der Abhörposition; linker Kanal; Zoom Out.....	88
Abb 6.17...	Event ASP8; Übertragungsfunktion an der Abhörposition; rechter Kanal.....	89
Abb 6.18...	Event ASP8; Mittelung Übertragungsfunktion an der Abhörposition; rechter Kanal.....	89

Abb 6.19...	Event ASP8; Mittelung Übertr.-fkt. an der Abhörposition; rechter Kanal; Zoom Out.....	89
Abb 6.20...	Energie-Zeit-Verlauf (ETC) an MP01; linker Kanal.....	91
Abb 2.21...	Frühe Nachhallzeit (EDT); linker Kanal.....	91
Abb 6.22...	Energie-Zeit-Verlauf (ETC) an MP01; rechter Kanal.....	91
Abb 6.23...	Frühe Nachhallzeit (EDT); rechter Kanal.....	92
Abb 6.24...	Mittelwerte der Messungen EDT und T20.....	92
Abb 6.25...	Energy-Decay-Curve (EDC) an der Abhörposition; linker Kanal.....	93
Abb 6.26...	Energy-Decay-Curve (EDC) an der Abhörposition; rechter Kanal.....	93
Abb 6.27...	Zerfallsspektrum an der Abhörposition, linker und rechter Kanal.....	94
Abb 6.28...	Messaufbau zur Messung ohne Akustikausbau.....	95
Abb 6.29...	Raumimpulsantworten mit und ohne Akustikausbau.....	95
Abb 6.30...	Energie-Zeit-Verlauf (ETC) an Abhörposition; rechter Kanal.....	96
Abb 6.31...	Vergleich EDT,T20 - vorher/nachher.....	96
Abb 6.32...	Energy-Decay-Curve (EDC) an der Abhörposition vorher/nachher.....	97
Abb 6.33...	Zerfallsspektrum an MP01_L_LG_LEER.....	97
Abb 6.34...	abgedecktes Frontend.....	98
Abb 6.35...	Vergleich Frequenzantworten offene/geschlossene Struktur; linker Lautsprecher.....	99
Abb 6.36...	Vergleich Frequenzantworten offene/abgedeckte Struktur; rechter LS an MP01.....	99
Abb 6.37...	Vergleich Raumimpulsantworten offene/abgedeckte Struktur an MP01.....	100
Abb 6.38...	Vergleich Frequenzgang links/rechts bei abgedeckter Struktur an MP01.....	101
Abb 6.39...	Vergleich Frequenzgang links/rechts bei offener Frontstruktur an MP01	101
Abb 6.40...	Vergleich Frequenzgang links/rechts in 1 m Entfernung	102
Abb 6.41...	Vergleich ASP8 in 1 m Entfernung und an MP01 mit offener Struktur	102
Abb 6.42...	Berechnung Wellenlänge bei 100 Hz	102
Abb 6.43...	Messaufbau Freifeldmessung ASP8	103
Abb 6.44...	Vergleich Raumimpulsantworten vs. Freifeldmessung	103
Abb 6.45...	Messaufbau ASP8 auf Meterbridge	104
Abb 6.46...	Vergleich Frequenzantworten ASP8 auf Meterbridge vs. ASP8 in offenen Struktur ...	104
Abb 6.47...	Vergleich ASP8 auf Meterbridge an verschiedenen Messentfernungen	105
Abb 6.48...	Vergleich ASP8 vs. ALESIS Monitor One @ Meterbridge und ASP8 @ ESS	105

0 Einleitung

Über diese Arbeit

Der Inhalt dieser Diplomarbeit ist die Konzeption eines Mischstudios. Ausgehend von bereits bestehenden Räumlichkeiten im Rohbauzustand muss die akustische Ausstattung so geplant werden, dass eine vom Raum unbeeinflusste, einschätzbare Abhörsituation erreicht wird, welche Hören und Beurteilen jedes Aspekts des Audio Programms ermöglicht.

Dieses Ziel soll durch die Nutzung des ESS-Konzept (Early-Sound-Scattering/das Konzept der frühen Schallstreuung) erreicht werden, welches ein von Raumeinflüssen abgekoppeltes Hören verspricht. Das ESS-Konzept beruht auf der Idee, dem Direktsignal hinreichend viel Diffusschall beizugeben, wobei dieser genügend nah an der Schallquelle erzeugt wird. Die Erzeugung dieses Diffusschalls dient zur Maskierung störender Raumeinflüsse, so dass nur das direkte Signal lokalisiert wird.

Zusätzlich zur Umsetzung von ESS soll unter Betrachtung der relevanten akustischen Phänomene ein Plan entwickelt werden, um der vorhandenen Raumstruktur einen neutralen und damit einen guten, also präzisen Klang zu geben.

Vorgehensweise

Abschnitt 1 behandelt kurz das Thema Raumakustik allgemein sowie Akustik einer Tonregie. In den Abschnitten 2, 3 und 4 wird zunächst auf die akustischen Effekte eingegangen, welche das Verhalten des Schalls im Raum erklärbar machen. Den theoretischen Punkten wird eine Lösungsmöglichkeit, sowie die praktische Anwendung zugeordnet. Damit bekommt die Arbeit den Aufbau einer Planung.

Die eigentliche Planung der akustischen Massnahmen geschieht in Abschnitt „4.5 Dimensionierung der Absorptionsflächen“. In diesem Abschnitt erfolgt die Simulation der Nachhallzeiten, die Betrachtung der Energiekriterien, sowie anderer relevanten Phänomene mit Hilfe einer rechnergestützten Raumakustik-Simulation.

Die reale Gestaltung der Regie zeigt Abschnitt „Auf- und Einbau der Absorberelemente in der Regie“.

In Abschnitt „6 Messung der raumakustischen Kriterien“ werden die Eigenschaften des Raumes durch Messungen aufgeschlüsselt um ein Bild von der Raumakustik zu erhalten. So lassen sich die Vorgaben der Simulation mit den tatsächlichen Ergebnisse vergleichen, und die Notwendigkeit von Nachbesserungen ableiten.

1 Anforderungen an eine Audio-Regie allgemein

Die ideale Akustik

Die ideale Akustik stellt die Freifeldsituation dar. Hierunter kann man sich einen unendlichen Raum ohne Begrenzungsflächen vorstellen. Die Schallausbreitung findet ohne Reflexionen statt, es existieren keine Raumeinflüsse. Alle abgestrahlten Signale sind unverfälscht wahrnehm- und beurteilbar.

Akustik unbearbeiteter Räume

Eine akustische Situation im Raum wird durch diesen bestimmt und ist von der Beschaffenheit der Wände Fußböden und Raumdecken, sowie anderen im Raum vorhandenen anderen Flächen abhängig. Die akustischen Eigenschaften des Raums beeinflussen also den Klang der Lautsprecherwiedergabe. Der über die Schallwandler abgestrahlte Schall vermischt sich mit den von den Wänden zurückgeworfenen Schallanteilen. Diese reflektierten Signalanteile werden vom Hirn ausgewertet und bestimmen die Wahrnehmung des Raumes. Durch die spezifische Beschaffenheit des Raumes werden dem Hirn dessen Parameter übermittelt, und es entsteht ein charakteristischer Raumklang.

Das System „Raum“ hat dem Signal seinen Charakter aufgeprägt.

Regieraum Akustik

Bei der Beurteilung des Klangbildes werden die durch den Regieraum hinzugefügten Rauminformationen durch die Parameter Klangfärbung und Klangbalance, sowie Abbildungsqualität und Hallanteil beschrieben. Klangfärbung und Klangbalance werden von frequenzabhängigen Parametern der Lautsprecher und Regieraum beeinflusst. Abbildungsqualität und Hallanteil hängen direkt mit raumabhängigen Kriterien von ersten Reflexionen und Nachhall zusammen.¹

Die Abhörsituation in einer Tonregie soll adäquat sein: Musik fürs Wohnzimmer, sollte in wohnzimmerähnlicher Akustik produziert werden. Filmton entsprechend in einer Kinoakustik. Diese Forderung bezieht sich auf Raumgröße, Nachhallzeit, sowie die Wahl der Lautsprecher.

Der Regieraum soll störungsfrei, also frei von Resonanzen und frühen Reflexionen, sein.² Um optimale Bedingungen für die Beurteilung von Aufnahmen zu bieten, muss der Raum reflexionsarm sein und eine frequenzunabhängige Nachhallzeit von ca. 0,3 s aufweisen. Räume mit zu starken Schwankungen der Nachhallzeit zwischen 200 ms und 2000 ms über das Frequenz-

1 Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudioteknik (Band 1). - 6. Auflage. - München: K.G.Saur Verlag KG, 1997, S.43

2 Görne, Thomas: Tontechnik. - 1. Auflage. - München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006, S.100

spektrum klingen unausgewogen.³ Es entstehen Verdeckungseffekte (siehe 4.2.1), durch welche nur noch tiefe Frequenzen wahrgenommen werden. Der Raum klingt wummig und unausgewogen.⁴ Auch die Beurteilung von Schallereignissen, die über die Lautsprecher abgestrahlt werden, ist nicht mehr möglich. Informationen, wie die frühen Reflexionen (siehe 4.2.1) im abgestrahlten Audio-Programm, sind nicht mehr zu beurteilen.

Die zweite Bedingung lässt sich durch Bekämpfung der tieffrequenten Raumresonanzen, sowie der Absorption, Streuung oder Umlenkung der frühen Reflexionen erfüllen. Wand- und Deckenreflexionen können durch eine entsprechende Raumgeometrie verhindert werden, indem der reflektierte Schall so geführt wird, dass er zunächst nicht zum Hörer gelangen kann (siehe 4.2.2) so entsteht eine reflexionsfreie Zone (RFZ).

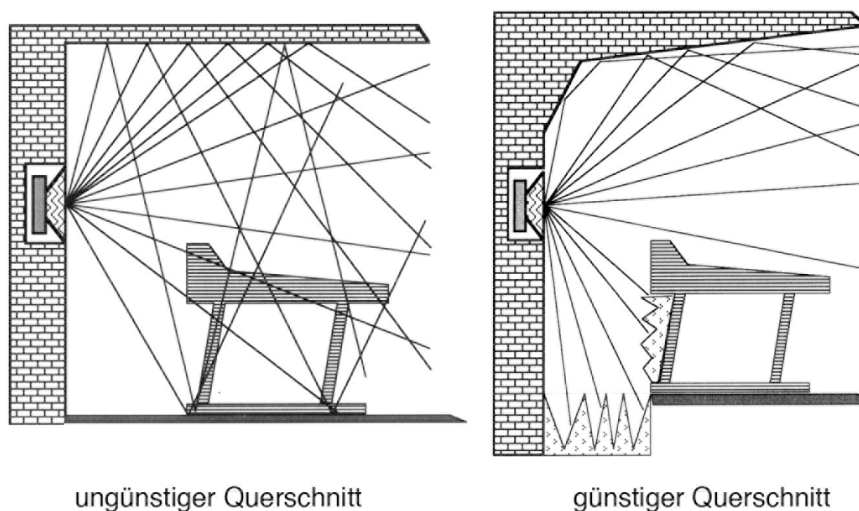


Abb 1.1 Schema Querschnitt Tonregieraum

Wenn eine Schallführung nicht möglich ist muss der Schall absorbiert werden, um eine störende Reflexion gar nicht erst entstehen zu lassen. Im allgemeinen werden die absorbierenden Flächen gleichmäßig auf Wände und Decken verteilt, wobei mit der jeweiligen Anordnung gezielt zu starke Reflexionen vermieden werden. Reflexionen in Form von permanenten Schallrückwürfen einer Seiten- oder Rückwand aber auch von reflektierenden Flächen im Schallfeld, wie der Mischpultoberfläche oder anderen Gegenständen in der Nähe der Lautsprecher, tragen nicht unwesentlich, bis hin zu Kammfiltereffekten, zur Klangfärbung bei (siehe 4.1.2).

Kleine Räume mit bis zu 40 m³ sind im tiefen Frequenzbereich besonders kritisch, da stehende Wellen (auch Raumresonanzen oder Raummoden genannt) in Räumen dieser Größe in dem besonders kritischen Bereich zwischen 100 Hz und 1000 Hz auftreten. Diese Raummoden bilden ein Muster von Schalldruckminima und -maxima, die zur Ortsabhängigkeit der Klangfarbe führen. Diese Raummuster sind frequenzabhängig. Die Klangfarbe kann sich damit innerhalb eines

3 Görne, Thomas: Mikrophone in Theorie und Praxis. - 5. Aufl. - Aachen: Elektor-Verlag GmbH, 1994, S.189

4 Görne, Thomas: Mikrophone in Theorie und Praxis, - 5. Aufl. - Aachen: Elektor-Verlag GmbH, 1994, S.189

Raumes ganz erheblich ändern (siehe 3.1). Raumproportionen mit ganzzahligen Vielfachen der Seitenlängen sind wegen der Eigenfrequenzen zu vermeiden. Wegen der Eigenfrequenzen sind tieffrequente Schallabsorber in großem Maß erforderlich (siehe 4.4.2).⁵

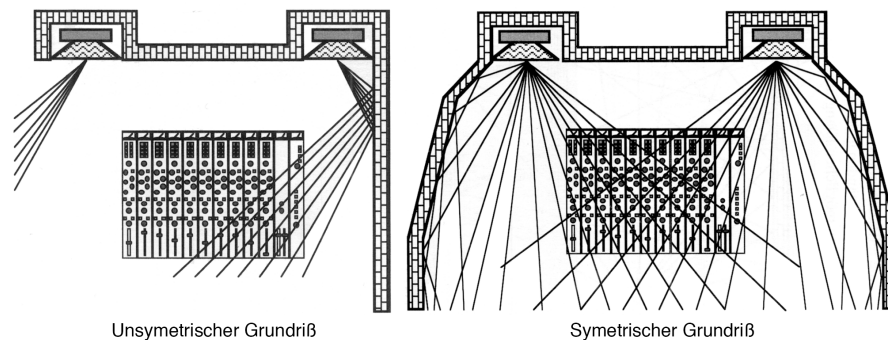


Abb 1.2 Schema Querschnitt Tonregieraum

Der Raum sollte symmetrisch zur Hörachse gestaltet sein, sowohl geometrisch als auch akustisch.

Es ist nicht sinnvoll, den Frequenzgang eines Lautsprechers durch Messungen am Abhörplatz des Regieraumes, also unter Einbeziehung der Raumakustik im Frequenzgang zu korrigieren. Dies würde zugleich den vom Raum unabhängigen Freifeldfrequenzgang erfassen, was unerwünscht ist. Der Raum muss von vornherein gut geplant sein.⁶

Zusammengefasst lauten die Anforderungen an einen Regieraum

1. adäquate Situation

- Situation entsprechend künftiger Nutzung
 - Größe
 - Stereosituation
 - Wahl der Lautsprecher

2. Störungsfreiheit

- Vermeidung von Resonanzen
- symmetrische Raumgestaltung für symmetrisches Schallfeld
- Vermeidung störender früher Reflexionen / Phantomschallquellen
- Vermeidung von Flatterechos / stehender Wellen
- konstante Nachhallzeit über gesamten Frequenzbereich
- möglichst diffuses Schallfeld

⁵ Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1. Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S. 183

⁶ Henle, Hubert: Das Tonstudio Handbuch. 4. Aufl. - München: GC Carstensen Verlag, 1998, S.366

ESS-Regie

Beim ESS-Konzept soll durch ein hochdiffuses „Front End“ genügend Schalldiffusität in der direkten Nähe zur Schallquelle erzeugt werden, welche keine Merkmale des Raumes trägt. Dieses aus der Front kommende, homogene Diffusschallfeld trägt keine raumspezifische Informationen. Es überlagert sich dem normalen, im Raumkörper entstandenen Diffusschallfeld und dessen Raumantwortsinformation. Das nahe der Quelle erzeugte diffusierte Schallfeld maskiert bzw. verdeckt dabei auch andere problematische Reflexionen, wie beispielsweise Pult- und Nahfeldreflexionen an Bildschirmen. Dadurch kann der Direktschall der Lautsprecher besser beurteilt werden. Die Ausbreitung des Nachhalls im Raum wird homogener.

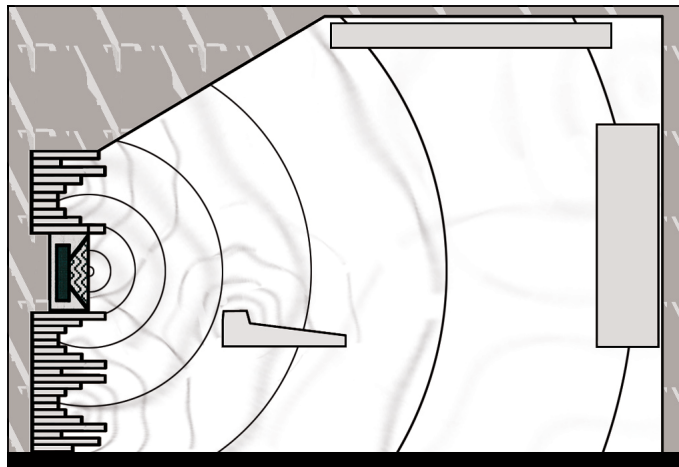


Abb 1.3 schematische Darstellung ESS-Prinzip

Dabei werden die physikalischen Eigenschaften bezüglich der Abstrahlcharakteristik des Lautsprechers ausgenutzt. Durch die Beugung des Schalls um den Lautsprecher herum, gelangt ein Teil des abgestrahlten Schalls nach sehr kurzem Umweg stark gestreut in den Raum. Die Diffusität im „Front End“ wird durch den Einsatz von $\lambda/2$ - bzw. Schröder-Diffusoren erreicht.

2 Planungsprozess Regieraum

Erklärung Planungsprozess

Beim Planungsprozess wird zwischen Primärstruktur, sowie Sekundärstruktur unterschieden. Parameter wie Größe und Grundform des Raumes werden als Primärstruktur, Oberflächengestaltung und Verteilung reflektierender, sowie absorbierender Teilflächen als Sekundärstruktur bezeichnet. Im Zuge der Planung wird das Augenmerk auf die Optimierung der Primärstruktur und darauf aufbauend auf die zweckmässige Festlegung der Sekundärstruktur gerichtet. Zuerst jedoch gilt es, die Zielstellung für die Planung zu verdeutlichen.

Zielstellung Regieraum

Ziel ist es, ausgehend von den gegebenen Räumlichkeiten, einen Stereo-Regie-Arbeitsplatz nach dem ESS-Prinzip einzurichten. Aufgrund der geringen Grundfläche von ca. 16 m² kommt es zu gewissen Problemen und Einschränkungen, welche durch Nutzung von ESS lösbar sind. Erstreflexionen sollen durch Reflektoren und Absorberelemente sowie durch ESS vermindert bzw. vermieden werden. Die Beeinflussung des Schallfeldes zum Zweck der frequenzbezogenen Linearisierung der Nachhallzeit ist durch Einsatz von absorptiven Oberflächen zu realisieren.

Ein weiteres Ziel besteht in der Vorgabe der Flexibilität. Der akustische Ausbau soll nicht durch einen Festeinbau realisiert werden, sondern ein modulares, flexibles und offenes System bilden. Die absorptiven und schallstreuenden Elemente sollen nötige Veränderungen, Optimierungen oder Erweiterungen auch im Nachhinein ermöglichen.

3 Primärstruktur Regieraum

3.1 Größe, Grundform

Der Regieraum wie auch der Aufnahmeraum wurden aus einem größeren Raumkomplex geschnitten. In Abb 3.1 ist die Struktur zu erkennen. Rote Flächen stehen für massive Wände, orange Flächen markieren Gasbetonaufbauten, grau entspricht Trockenbau. Fussboden, Decke und die zur Gebäudestruktur gehörenden Wände bestehen aus massivem Material. Die neu gesetzten Wände wurden in einer Gasbeton Doppelschale (Schale jeweils 5 cm stark) ausgeführt.

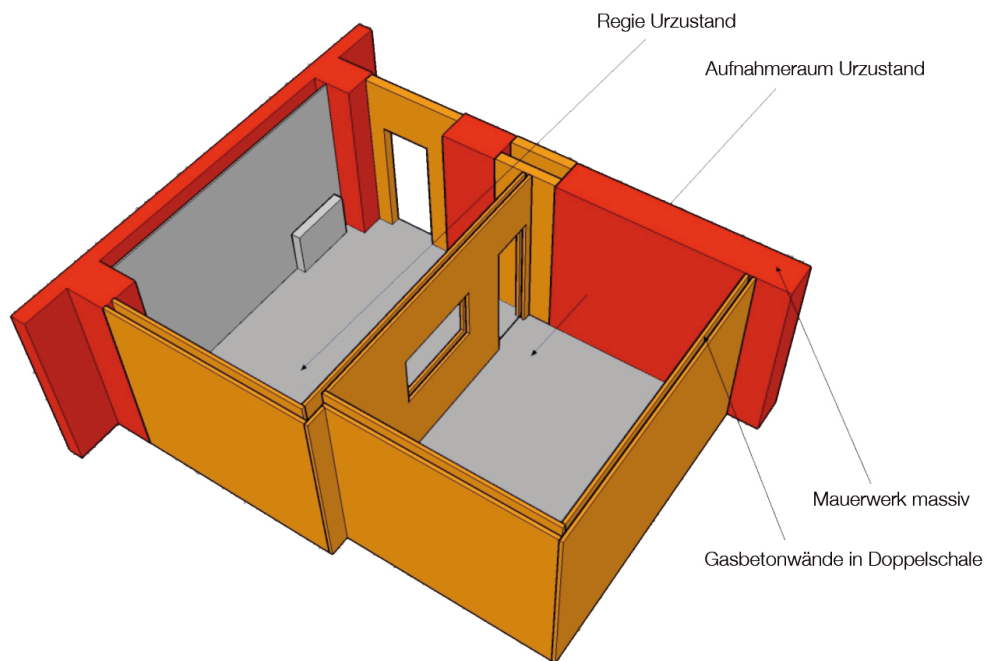


Abb 3.1 ursprüngliche Primärstruktur Regie- und Studioraum

Der neugeschaffene Raum für die Regie hat die Abmessungen von 340 cm in der Breite, 285 cm in der Höhe und 468 cm in der Tiefe, woraus sich ein Volumen von 45,35 m³ ergibt. Die Raumseitenverhältnisse liegen bei 1:1,19:1,64. Da durch diese Verhältnisse in jeder Dimension unterschiedliche Eigenfrequenzen dominieren und somit keine Frequenz ein Übergewicht bekommt, sollte die Raummodenverteilung also ausgewogen sein.

Einfluss von Raumproportionen auf den Frequenzgang

Ein Raum, welcher viele Ansammlungen von Raummoden in allen drei Dimensionen produziert, klingt sehr unausgewogen. Da die Lage der Moden in direktem Zusammenhang mit den Raumproportionen steht, sollte ein Regieraum bestimmte Raumkantenverhältnisse aufweisen. Es existieren einige ideale Verhältnisse für die Ausdehnung von Räumen⁷. Diese idealen Raumkantenverhältnisse werden in der englischsprachigen Literatur als die „Golden Ratio’s“ bezeichnet.

Raummaß x	Raummaß y	Raummaß z
1,39	1,14	1
1,56	1,28	1
2,33	1,6	1

Abb 3.2 optimierte Raumgrößenverhältnisse - the Golden Ratios

Eigenmodenverteilung in der Regie

Prinzipiell entsteht eine Raummode durch die Überlagerung der Schallwelle mit sich selbst, z.B. wenn die halbe Wellenlänge des Schalls dem Abstand zwischen zwei parallelen Wänden entspricht. Durch die Reflexion an der Wand ist die Schallschnelle gleich Null. Zur Raummitte nimmt die Schallschnelle wieder zu und hat im Wellenbauch ihr Maximum.

Bei der doppelten Frequenz entstehen zusätzliche Schnelleknoten im Raum. Dort und vor allem an den Wänden ist der Schalldruck maximal, im Schnellebauch dagegen gleich Null. Bei einem statischen Schallsignal ist dieses Modenmuster, sich überlagernder Druckminima und -maxima ortsfest, besonders ausgeprägt und deutlich hörbar.

In dem Diagramm sieht man sehr gut, wie dicht die stehenden Wellen beieinander liegen. Und ob mehrere Moden auf die gleiche Frequenz fallen. Die obliquen Moden sind als kurze Striche, die tangentialen als mittellange Striche und die axialen als lange Striche gekennzeichnet. Dies entspricht auch der akustischen Wahrnehmbarkeit dieser verschiedenen Arten der Moden. Axiale Moden sind in der Praxis die problematischsten, da sie zwischen zwei parallelen Wänden auftreten und ihre Energie langsamer verlieren als Moden, welche zwischen vier bzw. sechs Wänden auftreten.

⁷ Sengpiel, Eberhard <eberhard@sengpielaudio.com> : Raummoden - Stehende-Wellen-Berechnung.
URL:<<http://www.sengpielaudio.com/Rechner-raum-moden.htm>>, 20.08.2006:

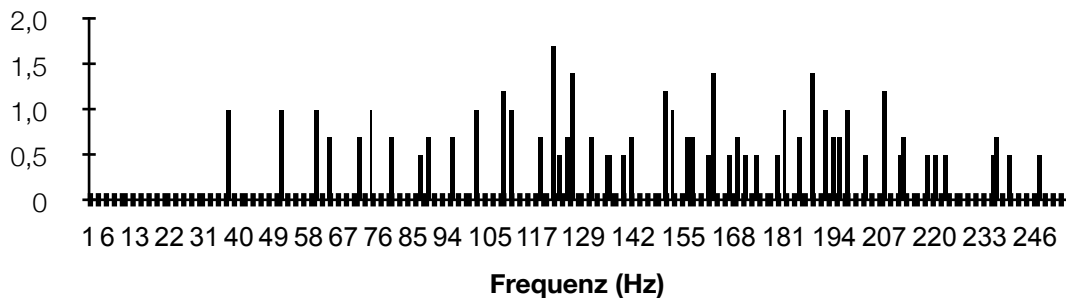


Abb 3.3 spektrale Verteilung der Raummoden / Raumeigenfrequenzen in Querausrichtung

Liegen mehrere Moden auf der gleichen Frequenz, ergibt sich durch Addition der Strichlängen ein sehr langer Strich. Dieser Fall tritt bei 121 Hz und bei 126 Hz ein. Im Diagramm werden stehende Wellen nur als Striche dargestellt. Man kann jedoch in der Praxis von einer breiteren Resonanz ausgehen, die in etwa 5 Hz Bandbreite hat.⁸ Die Dichteverteilung der stehenden Wellen ist ein Kriterium für ihre Auswirkung auf die Akustik des Raumes. Treten die Wellen nur vereinzelt auf, so können sie ein störendes Dröhnen oder heftige Pegelschwankungen im Frequenzgang auslösen. Je gleichmässiger allerdings die einzelnen Wellen beieinander liegen, desto mehr wirken sie sich einfach nur als Nachhall aus. Bei Betrachtung von Abb 3.3, ist eine recht regelmässige Verteilung zu erkennen. Anhäufungen existieren um die 120 Hz, 160 Hz und 200 Hz.

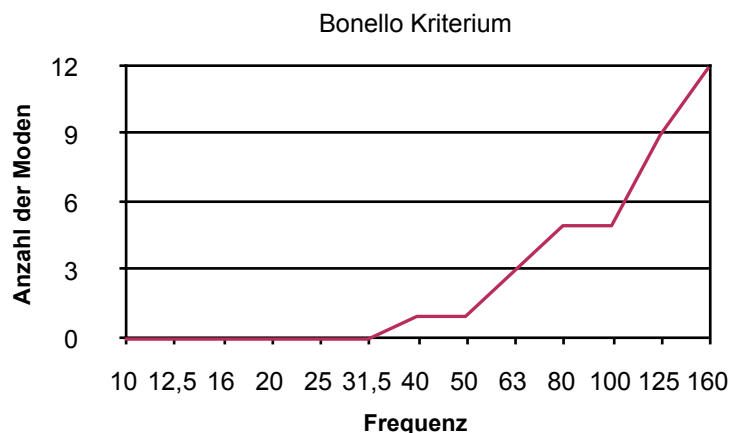


Abb 3.4 Bonello Kriterium für Raum mit L= 468 cm, B= 340 cm, H= 285 cm

Die Modenverteilung sollte bei steigender Frequenz bis 200 Hz, innerhalb von Terzbändern niemals absinken. Günstig ist 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 liegen die einzelnen Moden zusammen, so dass die Wahrnehmung einer einzelnen Mode nicht mehr möglich ist.

Wie in Abb 3.4 zu sehen ist, steigt die Dichteverteilung bei zweimaliger Stagnation, jedoch ohne Abfall. Somit sind die Raumproportionen in Ordnung.⁹

⁸ Frieseke, Andreas: Studio Akustik. -1. Aufl. - Bergkirchen: PPVMEDIEN , 2006, S. 57

⁹ Frieseke, Andreas: Studio Akustik. -1. Aufl. - Bergkirchen: PPVMEDIEN , 2006, S. 58

3.2 Optimierung der Primärstruktur

Bestehende strukturelle Probleme

Die künftigen Studioräumlichkeiten weisen in ihrer vorliegenden Gestaltung einige Probleme auf. Regie und Aufnahmeraum sind direkt durch eine dünne Tür verbunden. Diese Verbindung stellt zum einen eine Schallbrücke dar, zum anderen ergibt sich durch diese Tür eine, für ein Tonstudio, ungünstige Struktur. Durch die Anordnung der Räume und die Verbindung zueinander, ergeben sich Laufwege, welche freigehalten werden müssen. Bei einer Grundfläche von jeweils nur ca. 16 m² Grundfläche wird der verfügbare Platz schnell knapp. Schwierig ist auch die Festlegung des Raumes auf eine Nutzungsrichtung. Bei Ausrichtung in der Raumtiefe befände sich die Tür im Rücken des Nutzers, was sich ungünstig auf die Arbeitsatmosphäre auswirken würde. Linksseitig vom Hörplatz befände sich das Regiefenster. Damit sind die Stellen, welche zur Anbringung absorbierender Elemente in dieser Nutzungsausrichtung in Frage kommen würden, durch Fenster und Tür bereits vergeben, oder würden z.B. durch ihre geplante Bautiefe den Zugang zum Aufnahmeraum behindern.

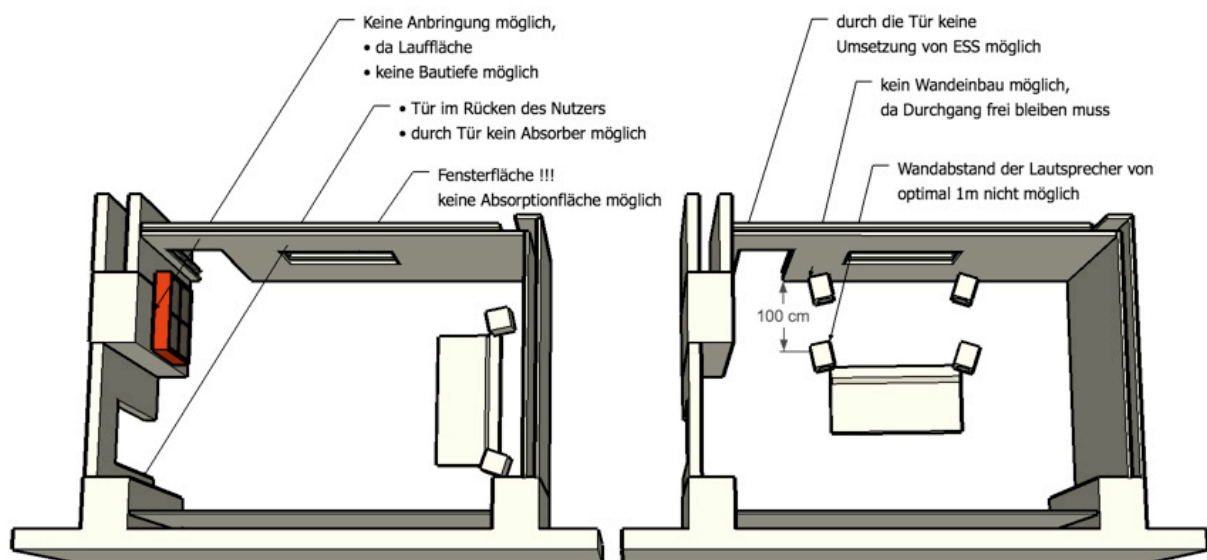


Abb 3.5 Nachteile der vorgefundenen Primärstruktur

Die vorhandene Verbindungstür zwischen Regie und Aufnahmeraum stellt nicht nur eine akustische Schwachstelle dar, sondern erschwert durch ihre Position auch die Umsetzung des ESS-Konzepts, welches vom frontbündigen Einbau der Lautsprecher in die Wand ausgeht. Um die genannten drei Probleme auszuräumen und das gewählte Konzept im Querformat umzusetzen, ist es nötig, die Struktur zu verändern.

Lösung der strukturellen Probleme durch Umbau

Im Zuge des Umbaus der Primärstruktur erfolgt eine Änderung des Zugangs zum Aufnahme-
raum nach außen. Ersetzt wird die geöffnete Wand durch eine Rigips-Trockenbauwand in ange-
stelltem Winkel, welche die drei Probleme in einem Zug löst. Die akustische Schwachstelle zwi-
schen Regie und Aufnahme-
raum verschwindet. Die neue Wand wird dem Lautsprecher, sowie
den Akustikaufbauten Platz bieten. Schließlich gewährt der neue Zugang zum Aufnahme-
raum den leichteren und direkteren Zugang, gerade für Musiker mit sperrigen Instrumenten. Außer-
dem wird für die Regie der Einbau eines Soundlocks¹⁰ vorgesehen, einer doppelten Tür, welche
die Schallemission nach außen dämmen soll. Der Bau der schräg angestellten Wände erfolgt in
einem Winkel von 26° bezogen auf die Trennwand zwischen Regie und Aufnahme-
raum. Die neue Wand hat einen zweischaligen Aufbau. Der Zwischenraum wird mit ISOVER® TP1 gefüllt,
einem schalldämmenden Trennwanddämmstoff aus Mineralfaserwolle. Der Aufbau der Wand
besteht aus einer Schicht Holzfaserplatten und einer Doppelschicht Gipskarton.

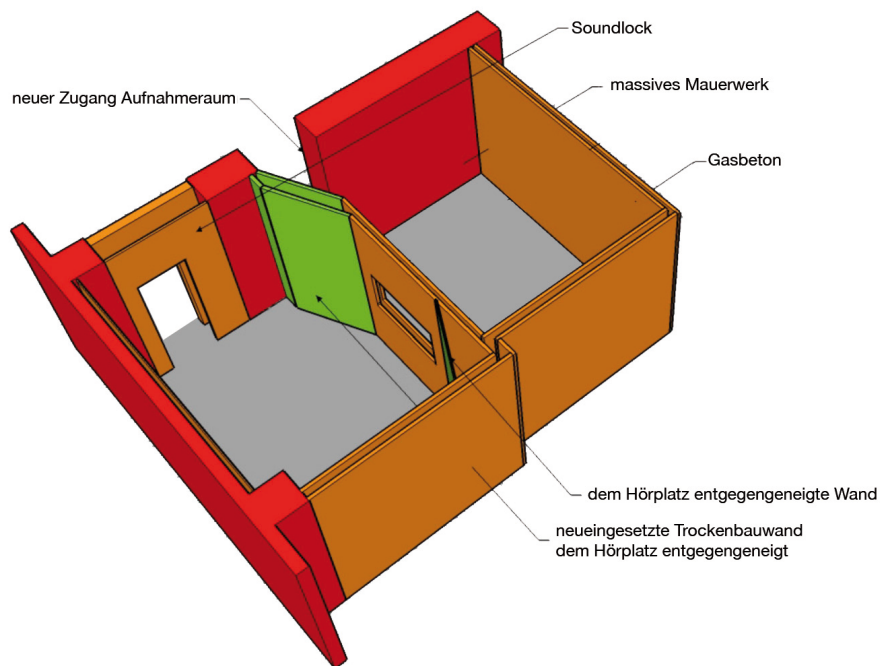


Abb 3.6 Regie- und Studioraum in optimierter Primärstruktur

Für die Verringerung der Schallemission durch Wand gilt es als günstig, die Wand aus mehreren
Materialschichten aufzubauen. An jeder neuen Schicht wird der Schall aufs Neue gebrochen
und erfährt damit eine Verringerung seiner Energie. Weiterhin hat die Holzwand den ganz prakti-
schen Nutzen, das auf diese Art und Weise im folgenden ganz einfach mit Schnellbauschrauben
gearbeitet werden kann, um etwas auf der Wand zu montieren.

¹⁰ Frieseke, Andreas: Studio Akustik. - 1. Aufl. - Bergkirchen: PPVMEDIEN, 2006, S. 84

4 Sekundärstruktur Regieraum

4.1 Regie Lautsprecher

4.1.1 Abstrahlverhalten von Lautsprechern und Raumakustik

Dieser Abschnitt erläutert den Zusammenhang zwischen dem Abstrahlverhalten eines Lautsprechers und der Raumakustik. Dieser Zusammenhang ist wichtige Grundlage für das Funktionalisieren von ESS, denn dieses Konzept nutzt den Umstand der Abstrahlung von Schallanteilen in rückwärtiger Richtung.

Gewählter Hauptlautsprecher „Event ASP8“



Abb 4.1 Event ASP 8, Studio Precision-Aktivmonitor, 8"-Tieftöner

Als Hauptlautsprecher wurde der ASP8 der Firma Event gewählt. Es handelt sich um einen aktiven Nahfeldmonitor. ASP steht für „Active Studio Precision“ die 8 für den 8"-Tieftöner. Die elliptischen Schallführungselemente der Hochtöner sorgen für ein breites Stereobild.

Auf der Vorderseite befindet sich eine LED, die 3 dB vor dem Clippen durch Blinken vor Übersteuerung warnt.

Die ASP8 verfügt auf der Rückseite über HF- und LF-Trimmer mit Kuhschwanzcharakteristik zur Anhebung bzw. Absenkung von jeweils ± 3 dB. Ein weiterer Trimmer erlaubt die Anpassung der Eingangsempfindlichkeit an die jeweilige Signalquelle. Will man die ASP8 zusammen mit einem Subwoofer betreiben, lässt sich per Schalter ein Hochpassfilter bei 80 Hz aktivieren.

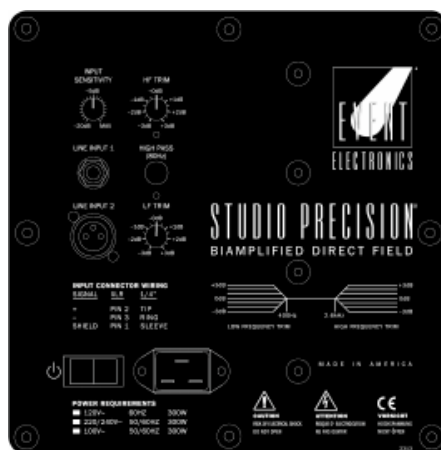


Abb 4.2 Anschlussfeld Event ASP8

Die angegebenen Technische Daten lesen sich wie folgt:

- Tieftöner: mineralgefüllte 8"-Polypropylen-Membran mit Gummisicke, 1,5"-Hochtemperatur Schwing-spule, magnetisch geschirmt
- Hochtöner: 1"-Gewebekalotte mit Neodym-Magnet, Ferrofluid-gekühlte Schwingspule, magnetisch geschirmt
- Frequenzgang: 35 Hz - 20 kHz, ± 3 dB, Referenz 500 Hz
- Frequenzweiche: aktiv, vierter Ordnung, Trennfrequenz 2,6 kHz
- Eingangsempfindlichkeit: 1,1 V für Vollaussteuerung
- Ausgangsleistung: 200 W (Tiefton-Endstufe), 80 W (Hochton-Endstufe)
- Max. Schalldruckpegel: 111 dB @ 1 W, 1 m
- Fremdspannungsabstand: >105 dBA (Tieftonendstufe), >106 dBA (Hochtonendstufe)
- Klirrfaktor: <0,03 % (Tieftonendstufe), <0,04 % (Hochtonendstufe)
- Eingänge: XLR symmetrisch, 1/4"-Klinke symmetrisch/unsymmetrisch, Cinch unsymmetrisch
- Regelmöglichkeiten: Eingangsempfindlichkeit 0 bis -20 dB
- Tiefen-Korrekturverzerrung ± 3 dB @ 100 Hz - 400 Hz, Höhen-Korrekturverzerrung ± 3 dB >2,6 kHz
- Schutzschaltungen: Subsonic-Filter, Ausgangsstrombegrenzer, thermische Schutzschaltung, Einschaltverzögerung
- Sonstiges: Schaltbares Hochpassfilter zweiter Ordnung @ 80 Hz, kombinierte Betriebs-/Clipping-LED
- Gehäuse: 19 mm MDF-Platte, innen bedämpft, Hochglanzfront
- Abmessungen: 318 x 407 x 302 mm (BHT)
- Gewicht: 14,8 kg / Stück¹¹

Den Lautsprechern der Firma EVENT wird der „easy on the Ear“ - Sound nachgesagt. Auch die Fachpresse zeigte sich beeindruckt. Die ASP8 erhielt bei einem Test des US-Fachmagazins „Electronic Musician“ in allen fünf Kategorien die Maximalpunktzahl 5 und wurde konsequenterweise mit dem begehrten „Editors Choice Award“ 2005 ausgezeichnet.¹²

¹¹ <info@eventelectronics.com> : STUDIO PRECISION USER GUIDE . URL: <http://www.eventelectronics.com/Support/Manuals/SP_Man.pdf>, 20.08.2006:

¹² By the EM Staff (Redaktion ElectronicMusician) <emeditorial@emusician.com> : 2005 EDITORS CHOICE. URL: <http://emusician.com/mag/emusic_editors_choice_4/>, 01.01.2005:

Frequenzgang

Der angegebene Frequenzgang eines Lautsprechers gilt für die Hauptabstrahlachse 0°. Sehr gute Boxen haben einen nahezu linearen Frequenzgang mit geringen Abweichungen vom Ideal, z.B. „40 Hz - 22 kHz $\pm 1,5$ dB“¹³. Für die gewählte „Event ASP8“ ist der angegebene Frequenzgang: „35 Hz - 20 kHz, ± 3 dB“¹⁴.

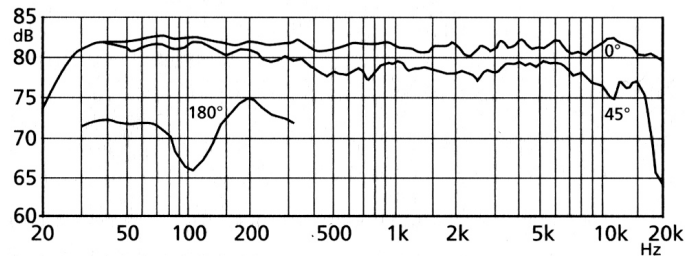


Abb 4.3 Frequenzgänge eines hochwertigen Lautsprechers

Auf Hauptabstrahlachse gemessene Frequenzgangkurven entsprechen allerdings einer eindimensionalen Darstellung. Im Raum verhält sich ein Lautsprecher anders, als über den Frequenzgang dokumentiert. Die Ursache dafür liegt im frequenzabhängigen Abstrahlverhalten des Lautsprechers (siehe 4.1.1).

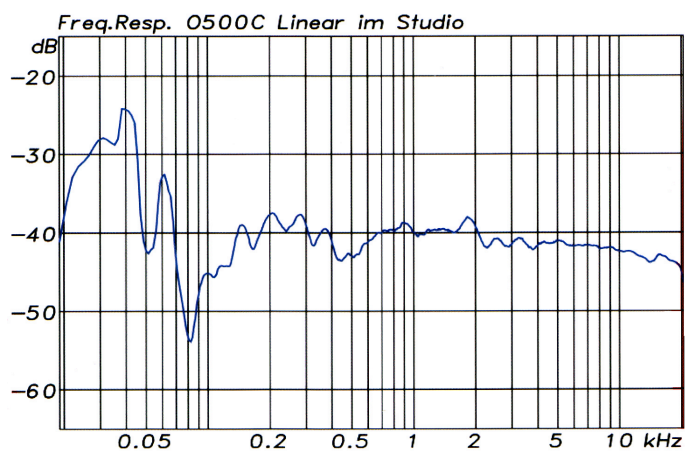


Abb 4.4 Frequenzgang im Raum eines Lautsprechers mit nahezu idealem Freifeldfrequenzgang

13 Görne, Thomas; Bergweiler, Steffen: Monitoring. -1.Aufl. - Bergkirchen: PPVMEIDIEN, 2004, S.104

14 <info@eventelectronics.com> : STUDIO PRECISION USER GUIDE . URL: <http://www.eventelectronics.com/Support/Manuals/SP_Man.pdf>, 20.08.2006:

Abstrahlverhalten eines Lautsprechers

Das Abstrahlverhalten eines Lautsprechers hängt von dessen Grösse ab. Je größer ein Lautsprecher bzw. Lautsprecherchassis ist, um so stärker die Bündelungsfähigkeit und umgekehrt. Bei Betrachtung der einzelnen Chassis ist zu beobachten, dass mit steigender Frequenz auch die Bündelung immer mehr zunimmt, bis der Übernahmepunkt zum nächsten Chassis erreicht ist. Dort bricht das Abstrahlverhalten wieder auf etwa 180° auf, um dann mit steigender Frequenz wieder stärker zu bündeln. In der Isobarendarstellung entsteht ein so genanntes „Tannenbaummuster“. Dies bedeutet, dass abhängig vom Frequenzbereich in unterschiedlichem Grad Energie seitlich abgestrahlt wird, die von den seitlichen Reflexionsflächen auf die Hörposition zurückgeworfen wird. Diese seitlich abgestrahlten Anteile führen in Addition mit dem Direkt-schall zu einer tonalen Verfärbung.¹⁵

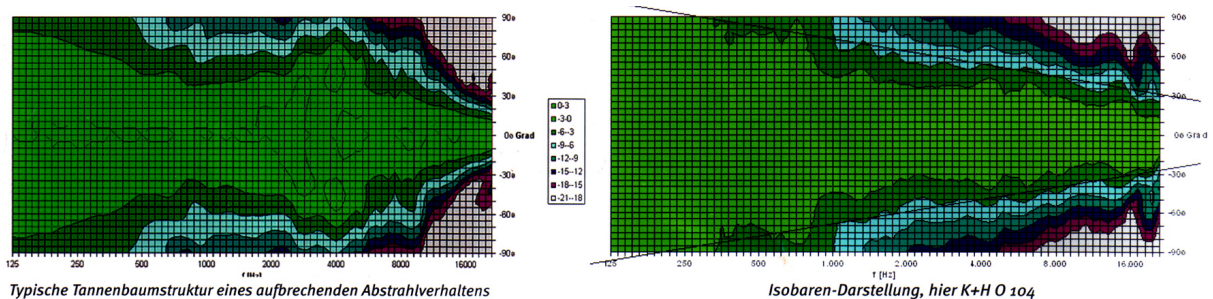


Abb 4.5 Abstrahlverhalten eines Lautsprechers_Horizontale Bündelung als Isobarendarstellung

Die Ideale Lautsprecherbox ist unendlich klein und damit eine Punktquelle, welche bei allen Frequenzen eine identische Abstrahlcharakteristik besitzt. Leider ist die ideale Box unmöglich da für die Abstrahlung von Schall bestimmte Membranabmessungen erforderlich sind. Reale Boxen sind bei tiefen Frequenzen Kugelstrahler, bei hohen Frequenzen strahlen sie gerichtet ab. Je kleiner der Lautsprecher desto breiter der optimale Abhörbereich im Stereobild (Sweet-Spot-Bereich), denn die Bündelung der hohen Frequenzanteile resultiert direkt aus einer Reflexion an der Gehäusewand.

¹⁵ Wolff, Markus: Gestatten, Studiemonitor...Grundlagen und Qualitätsparameter. In: Studio Special Studiomonitring. - Oberhausen: Studio Presse Verlag GmbH. -2006 Studio Magazin Sonderausgabe. S.22

Schallführungselement

Damit ein Lautsprecher unabhängig vom Raum und Hörposition immer gleich klingt, muss er eine frequenzunabhängige Abstrahlcharakteristik haben. Dies ist mit einem enormen Aufwand verbunden und nur einige sehr hochwertige Lautsprecher besitzen diese Eigenschaft.

Um das Abstrahlverhalten des gesamten Lautsprechers zu optimieren wird von einigen Herstellern eine Schallführung, ein so genanntes kurzes Horn, direkt in die Schallwand integriert, um die Abstrahlung beim Übergang von Hoch- und Mitteltönern an die der Tieftöner anzupassen. Horizontal entsteht dadurch ein erweiterter Abhörbereich. In der vertikalen Ebene wird der Abstrahlwinkel dagegen eingeengt.



Abb 4.6 Schallführungselement der „EVENT ASP8“

Gehäusegröße

Das Abstrahlverhalten hängt direkt mit den Abmessungen des Gehäuses zusammen. Wäre ein Lautsprecher klein gegen die Wellenlänge, würde er als Kugelstrahler funktionieren. Mit zunehmender Gehäusegröße steigt jedoch die Grenzfrequenz für eine kugelförmige Abstrahlung. Hier herrscht ein direkter Zusammenhang zwischen dem Beugungsverhalten des Schalls und der Gehäusegröße.

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. Selbst bei doppelter Grösse bezüglich Wellenlänge erfolgt fast vollständige Beugung. Erst bei fünffacher Ausdehnung erscheint vollständiger Schallschatten. Bei steigender Frequenz wird die Wellenlänge des Schalls immer kürzer bis der Schall vom Hindernis reflektiert wird. Hinter dem Hindernis entsteht ein Schallschatten, der Klang hinter einem Hindernis ist dumpfer, da die hohen Frequenzen vom Hindernis reflektiert wurden. An den Kanten eines Hindernisses werden mit abnehmender Frequenz immer mehr Schallwellen in den Schallschatten hinein gebeugt.

Wenn man also zugrunde legt, dass selbst bei doppelter Größe bezüglich Wellenlänge eine fast vollständige Beugung erfolgt, kann man bezüglich des Lautsprechergehäuses folgende Schlussfolgerung ziehen. Alle Wellen, länger als der halbe Abstand von Hochtöner zum Gehäuse- serand, werden von der Gehäusekante in den Schallschatten gebeugt.

Dazu eine kleine Rechnung um die theoretische Grenzfrequenz zu ermitteln, ab welcher die Dif- fusoren wirksam werden. In dieser Gleichung wird über die Formel zur Schallwellenlänge eine Beziehung zwischen der Entfernung von Hochtöner zur Gehäusekante, der entsprechenden Wellenlänge und der zugehörigen Wellenfrequenz, und dem oben aufgeführten Sachverhalt be- züglich des Beugungsverhaltens hergestellt.

$$a = 0,16 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{a}{2} = 0,08 \text{ m}$$

mit Formel für die Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{344 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{f}$$

umgestellt nach:

$$f = \frac{344 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\lambda} = \frac{344 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,08 \text{ m}}$$

$$\underline{\underline{f = 4300 \text{ Hz}}}$$

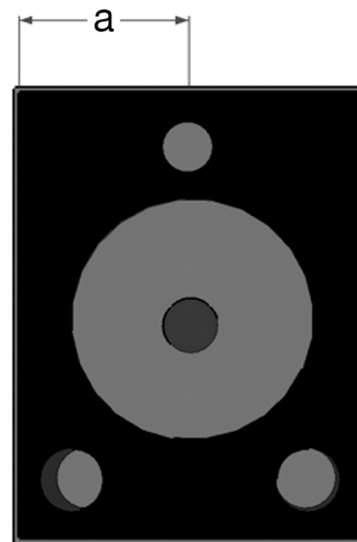


Abb 4.7 Beispielrechnung Zusammenhang Gehäusegröße-Beugungsverhalten

Die theoretische obere Grenzfrequenz ab der eine Auswirkung der Diffusoren auf das Schallfeld einsetzt liegt demnach bei 4300 Hz. Dies lässt sich auch in der Simulation des Abstrahlverhaltens ablesen, welche im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Simulation Abstrahlverhalten „Event ASP8“

Die Tabelle zeigt in Ballondarstellungen das simulierte Abstrahlverhalten des in CARA mit dem Boxeditor erstellten Lautsprechers „Event ASP8“ (siehe 4.1.1). Die Darstellung entspricht einer Sicht seitlich von hinten.

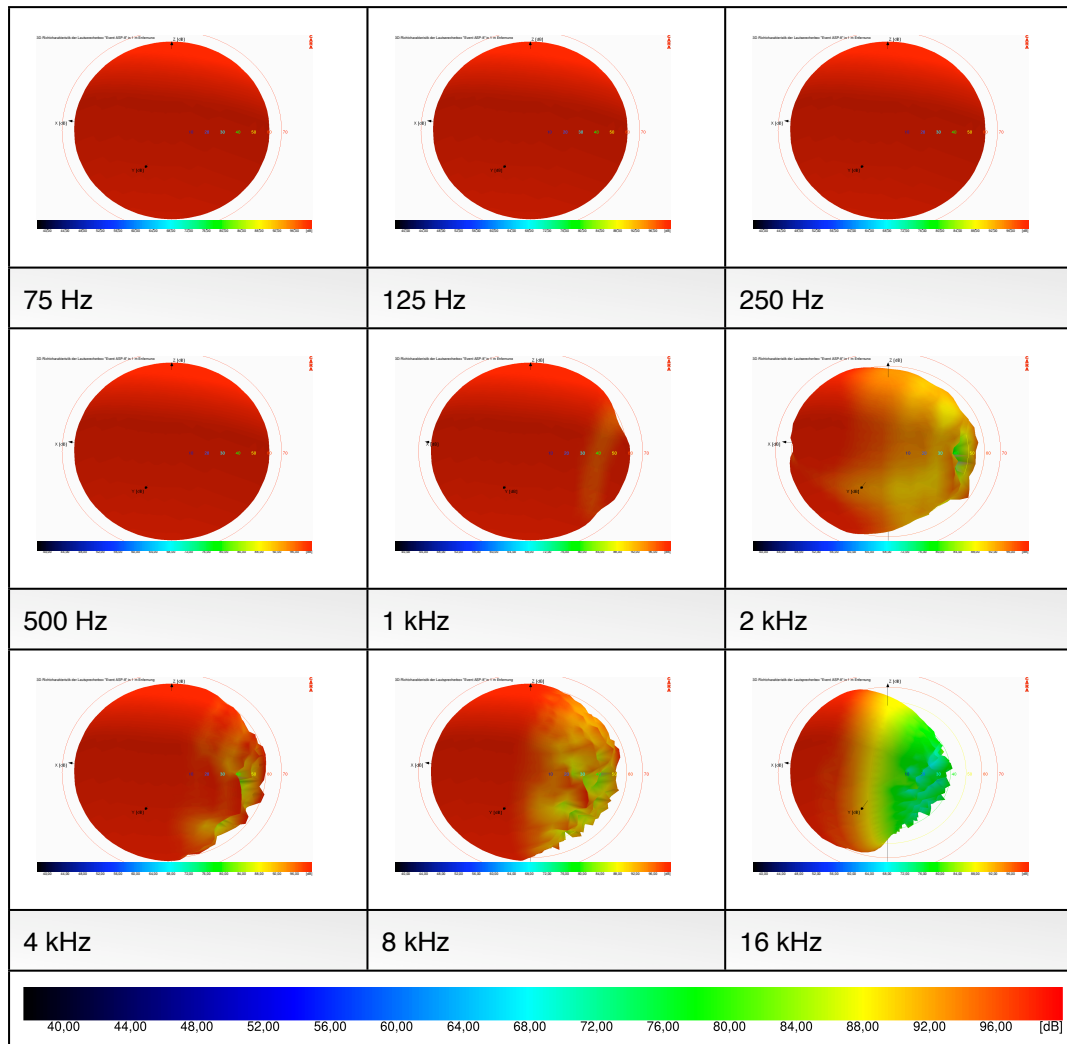


Abb 4.8 Ballondarstellung der Abstrahlcharakteristik der ASP8 in 1 m Entfernung

In Oktavabständen wird der simulierte Schalldruckpegel für einen Abstand von 1m bei Anregung mit 1 Watt dargestellt. Die Darstellung hat eine Auflösung von ca. 1000 Winkeln um die Box herum.¹⁶ Die Schalldruckpegel sind farblich gekennzeichnet. Die Farbabstufung wurde ausgehend von schwarz für niedrigen Pegel über blau, türkis, grün, gelb, orange zu rot für hohen Pegel gewählt (siehe Legende).

Da bei der Simulation verschiedene Parameter, wie z.B. das Schallführungselement, keine Beachtung finden, ist sie auch nur begrenzt aussagekräftig. Zeigen lässt sich jedoch das prinzipielle Abstrahlverhalten im Bezug auf die Gehäuseabmessungen des Lautsprechers.

¹⁶ Thomanek, Franz < info@CARA.de > : Funktionen von CARA 2.1/2.2 PLUS. URL: <http://www.CARA.de/GER/CARA/index.php?load=res2d1.html >, 20.08.2006

Zu sehen ist ein kugelförmiges Abstrahlverhalten des Schalls bis zu ca. 1 kHz. Das heißt, für den Abstand von 1 m, findet eine Abstrahlung in rückwärtiger Richtung auch im recht hohen Frequenzbereich, sogar noch bis 8 kHz statt.

Bei Betrachtung der einzelnen Ballons ist das Bündelungsverhalten des Tieftöners mit steigender Frequenz ab 1 kHz bis zum Übernahmepunkt des nächsten Chassis zwischen 2 kHz und 4 kHz zu beobachten. Dort bricht das Abstrahlverhalten wieder stärker auf, um dann mit steigender Frequenz wieder stärker zu bündeln.

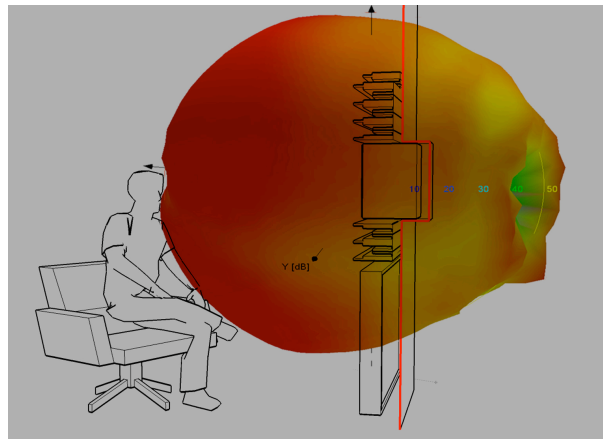


Abb 4.9 maßstäbliche Darstellung Abstrahlcharakteristik LS - ESS-Diffuser

Die obenstehende Grafik zeigt maßstäblich den Abstrahlungsballon und den geplanten Diffuseraufbau. Der Ballon stellt das Verhalten bei 2 kHz in 1 m Entfernung dar. Erkennbar ist ein hinreichend großer Energiepegel der seitlichen und rückwärtigen Abstrahlung. Diese seitlich und nach hinten abgestrahlten Schallanteile spielen für das ESS-Konzept eine tragende Rolle, denn diese werden an den Kanten der Schröder'schen Aufbauten, in die Struktur hinein gebeugt und besitzen beim Wiederaustritt unterschiedliche Phasengänge.

4.1.2 Aufstellung von Regielautsprechern

Grundlegend zur Beachtung

Die Lautsprecher werden so angebracht, dass sich die Mittel-Hochtonsysteme ungefähr in Kopfhöhe befinden. Sowohl in senkrechter als auch in waagerechter Ebene sollten die Achsen der Systeme auf den Kopf des Toningenieurs ausgerichtet sein. Der Frequenzgang des direkten Schalls ist so optimal.

Die Abstände beider Lautsprecher vom Hörer müssen gleich sein. Schon geringe Unterschiede verschieben die Hörereignisorte der Phantomschallquellen auf der Stereobasis. Ebenso ist eine raumsymmetrische Aufstellung erforderlich, da es sonst zur Asymmetrie der Ortungskurve kommt, was sich in einem Auswandern der Phantomschallquelle zu einer der Seiten bemerkbar macht.¹⁷

Hart reflektierende Flächen seitlich, über und hinter den Abhörplätzen sollten vermieden werden.

Direktfeldmonitoring vs. Fernfeldmonitoring

Das Abhören im Mittel- bzw. Fernfeld bezieht zwangsläufig den Raum mit ein, denn der Hörabstand liegt zwischen 2 bis 4 Metern. Daher sind akustische Einflüsse durch Reflexionen oder Abschattungen wie auch Absorptionen unvermeidlich. Dafür ist die Abhörposition nicht so eng begrenzt, sodass die Arbeit am Mischpult überhaupt erst möglich wird. Weiterhin hat diese Abhörsituation eher etwas mit der Konsumentensituation zu tun. Und letztlich ist hier eine Basswiedergabe möglich, die bei den kleinen Nahfeldmonitoren nicht möglich ist. Große Monitore sind in der Lage, große Schalldrücke verzerrungsfrei zu erzeugen. Damit sind sie ausgelegt für hohe Pegel, große Dynamik und einen großen Übertragungsbereich.

Um Tiefenanteile von Instrumenten Bass, Synthesizern etc. beurteilen zu können, sind große Lautsprecher mit 8“ Membranen durchaus nötig. Gerade bei der Produktion von beispielsweise Club-/Dance Musik oder Sounddesignprodukten ist ein lautes Abhören geradezu ein „Muss“.

Nahfeld- besser Direktfeldmonitore sind in der Regel wie Hifi-Lautsprecher, also als 2-Weg-System, aufgebaut. Sie werden als Kontrolllautsprecher in sehr geringem Abstand von typischerweise etwa einem Meter zum Hörplatz aufgestellt. Damit dominiert der Direktschall des Lautsprechers an der Abhörposition, das Diffusfeld spielt keine erhebliche Rolle für den Klang. Das Verhältnis zwischen direktem Lautsprechersignal und Raumreflexionen ist deutlich zu Gunsten des Direktsignals verschoben. Man hört mehr Lautsprecher und weniger Raum. Nachteilig ist, dass die Abhörposition sehr eng eingeschränkt ist. Damit ist die eigentliche Arbeit am Pult schwierig. Kopfdrehen oder sich seitlich bewegen ergibt veränderte Schallintensität.

¹⁷ Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudioteknik (Band 1). - 6. Aufl. - München: K.G.Saur Verlag KG, 1997, S.32; S.216

In der Regie werden als Hauptlautsprecher die ASP8 in Fernfeld-Konfiguration genutzt. Daneben existiert auch eine Nahfeld-, bzw. Direktfeld-Abhöre um die Vorteile der jeweiligen Lautsprecher-Konfiguration zu nutzen.

Nahfeldmonitore ähneln in ihren Fähigkeiten den Lautsprechern der Konsumenten mehr als die großen Monitore. Große Monitore verraten zu großzügige Bassanhebungen zu denen kleine Nahfeldmonitore verleiten. Lautstärkeverhältnisse zwischen den einzelnen zu mischenden Elementen lassen sich bei geringer Abhörlautstärke mit Nahfeldmonitoren am besten beurteilen. Nahfeldmonitore mit linearem Frequenzgang fordern bei Popmusik mehr Mühe bei der Abmischung heraus. Wenn die Mischung auch auf diesen Boxen kompakt und druckvoll klingt, ist sie gelungen. Große Monitore zeichnen die filigranen Feinheiten der Klänge besser.

Kammfilter-Effekte durch ungünstige Lautsprecheraufstellung

Die Lautsprecher sollten nicht nahe bei großen reflektierenden Flächen wie Seitenwänden oder auf der Meterbridge des Mischpultes aufgestellt sein, denn neben dem Direktschall gelangt durch den Umweg über diese Reflexionsflächen ein zeitlich versetzter Rückwurf zur Abhörposition. Die Folge einer falschen Aufstellung sind nachteilige Einflüsse auf den Frequenzgang wie Klangfärbung durch Kammfiltereffekte und verringerte Ortungsschärfe. Wird beispielsweise der reflektierte Schall einer Sinusfrequenz genau um die halbe Wellenlänge gegenüber dem direkten Signal verzögert, entsteht theoretisch die komplette Auslöschung dieser Frequenz. Aufgrund der typischen Umweglängen des über eine Mischpultoberfläche reflektierten Schalls, liegen diese Auslöschungen für diesen Fall gerade im relevanten Frequenzbereich von 1 kHz bis 2 kHz.

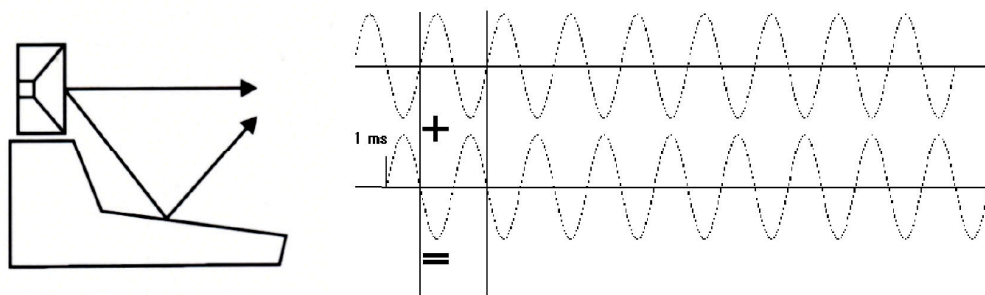


Abb 4.10 Kammfilter durch Reflexionen der Mischpultoberfläche

Je weiter (höher) sich der Lautsprecher von der Reflexionsfläche entfernt, desto weiter nach unten im Frequenzspektrum verschiebt sich der Kammfiltereffekt. Diese Verschiebung nach unten erfolgt aufgrund der größeren Laufzeitdifferenz zwischen direktem und reflektiertem Signal.

Durch die weit verbreitete Aufstellung der Lautsprecher auf der Meterbridge kommt noch ein weiterer negativer Effekt hinzu. Die Mischpultoberfläche in ihren Dimensionen und ihrer Beschaffenheit besitzt die Eigenschaften eines idealen Reflektors (siehe 4.2.2). Die Tatsache, dass sich die Abstrahlfläche der Lautsprecherfront um die angekoppelte Geometrie des Mischpultgehä-

ses vergrößert, führt dazu, dass der ansonsten nach unten abgestrahlte Schall am Mischpult reflektiert wird, und es zu einer Überbetonung der unteren Mitten und Tiefen kommt. Diese Überbetonung resultiert aus dem eintretenden Druckstau effekt durch die Reflexion auf der Pultoberfläche.

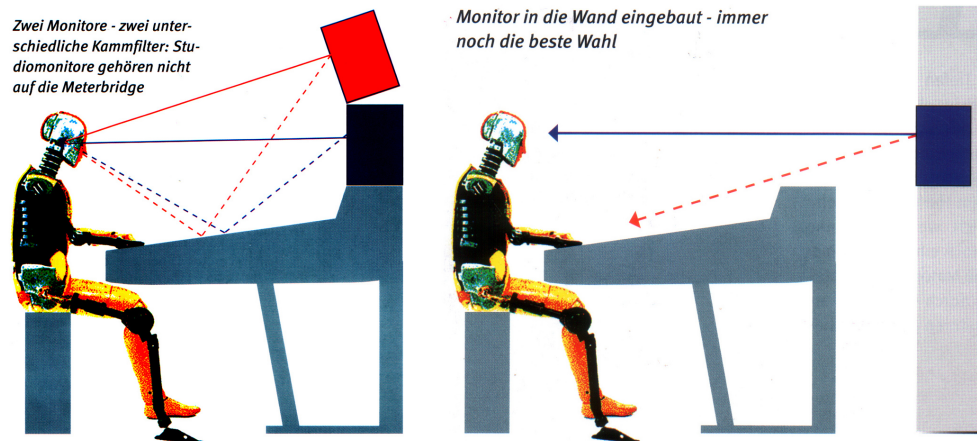


Abb 4.11 schematische Darstellung negativer Effekte durch Kammfiltereffekte

Die Lautsprecheraufstellung hinter dem Pult ergibt einen wesentlich günstigeren, flacheren Abstrahlwinkel wodurch Interferenzen in Ohrhöhe fast vollständig vermieden werden und speziell die Mischpultreflexionen tiefer beim Hörer eintreffen, womit sie irrelevant werden¹⁸.

¹⁸ Fey, Fritz: Böse Nachbarn - Lautsprecher in feindlichem Umfeld. In: Studio Special Studiomonitoring. - Oberhausen: Studio Presse Verlag GmbH. -2006, Studio Magazin Sonderausgabe. S.40-51

Problem bei Freifeldaufstellung von Regielautsprechern

Durch die kugelförmige Abstrahlung tiefer Frequenzen ergibt sich bei Aufstellung eines Lautsprechers vor einer oder in der Nähe einer Wand ein weiteres Problem, auf der selben Grundlage wie im vorhergehenden Abschnitt.

In Abhängigkeit von der Entfernung des Lautsprechers zur Wand entsteht bei der Frequenz, bei welcher der Abstand Lautsprecher-Wand gerade einem Viertel der Wellenlänge entspricht, ein Einbruch im Frequenzgang bzw. sogar eine Auslöschung. Der Weg zur Wand und zurück entspricht der halben Wellenlänge und damit einer um 180° gedrehten Phase. Beim Wandabstand von 85 cm liegt die betroffene Frequenz bei 100 Hz.¹⁹

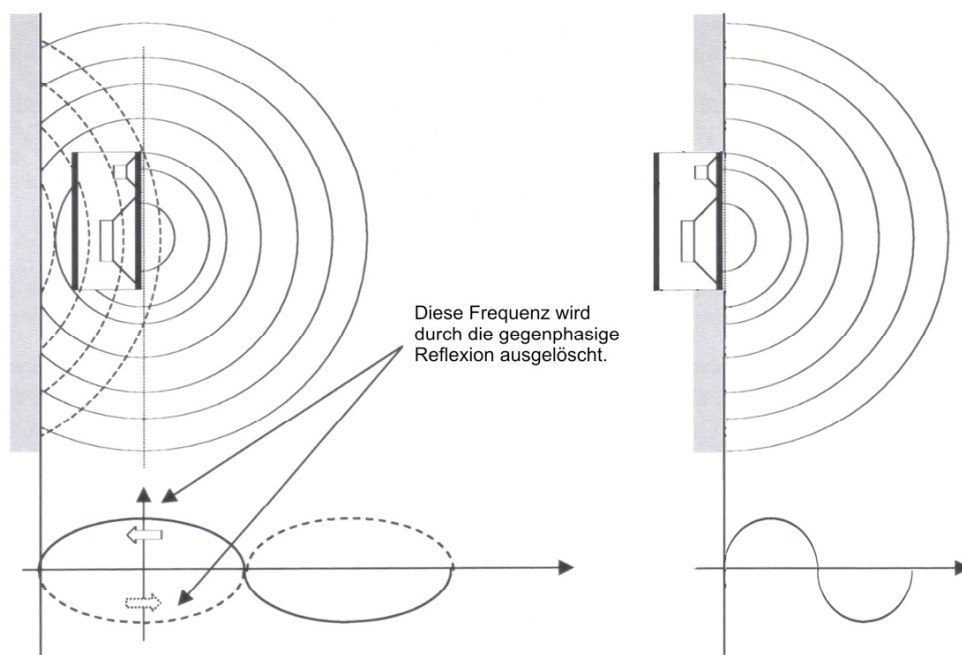


Abb 4.12 Auslöschungen durch gegenphasige Reflexionen

Somit existiert die Möglichkeit, den Lautsprecher entweder weiter entfernt von der Wand aufzustellen oder ihn näher in Richtung Wand zu verschieben.

Bei Entfernung von der Wand verschiebt sich, durch den erhöhten Laufweg der Welle, die Frequenz der Auslöschung nach unten im günstigsten Fall in den Bereich der Unhörbarkeit. Dafür sind jedoch relativ große Wandabstände erforderlich, außerdem nimmt der Einfluss der übrigen Wände zu. Im ungünstigsten Fall treten ähnliche Abstände zwischen Lautsprecher und den Raumbegrenzungsflächen auf, so dass sich der Effekt, verursacht durch mehrere Begrenzungsflächen, multipliziert. Die Verschiebung in Richtung Wand hat folgende Auswirkungen.

¹⁹ Anet, Christophe; Martikainen, Ilpo: Abhörpräzision - Akustische Grundlagen für die Entwicklung des AutoCal-Systems von Genelec. In: Studio Special Studiomonitring. - Oberhausen: Studio Presse Verlag GmbH. -2006 Studio Magazin Sonderausgabe. S.52-61

Vorteile des Wandeinbaus von Regielautsprechern

Ist ein Studiomonitor in eine Wand eingebaut, breiten sich die ansonsten seitlich und nach hinten abgestrahlten Schallanteile auf der über die Wand vergrößerten Lautsprecherfront aus und addieren sich zum Direktschall. Dies führt zu einer Überhöhung im Bereich tiefer Frequenzen, die elektronisch kompensiert werden kann. Auf diese Weise bleiben andere Einbrüche oder Überhöhungen erspart und eine Fehlerquelle ist komplett beseitigt.

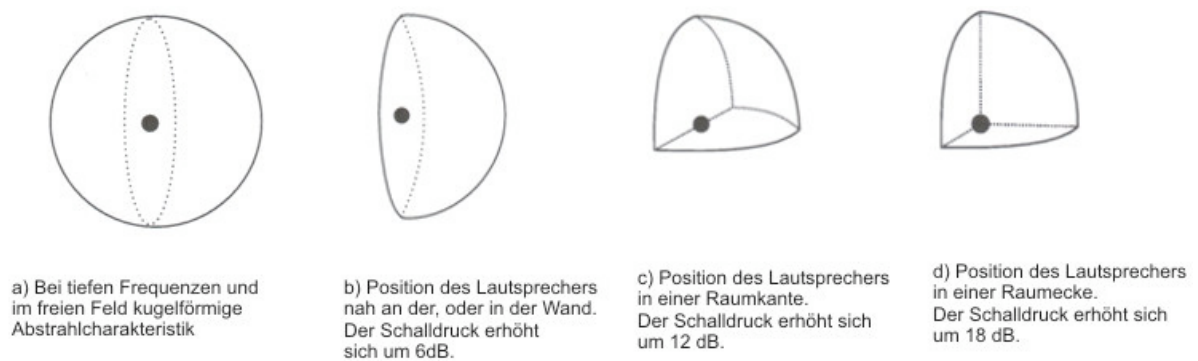


Abb 4.13 Schalldruck nach Lautsprecherposition

Da durch die Kompensation der Bassüberhöhung ein größerer Headroom entsteht, reduziert sich auch der Klirrfaktor der Boxen. Die Absenkung des Bassbereiches um 6 dB entspricht energiepegelmässig einer Reduktion der aufgewendeten Energie um etwa 50 %. Es wird also nur die Hälfte der Energie in den Raum gepumpt, folglich muss auch nur die Hälfte der Schallenergie abklingen. Der frontbündige Einbau der Lautsprecher bringt den Gewinn aller oben aufgeführten Vorteile.²⁰

Lautsprecheraufstellung Regie

Dem ESS - Konzept folgend werden die Lautsprecher in die Frontwand eingelassen. Die Lautsprecher haben ihren Platz in den angewinkelten Wandflächen. Der Lautsprecher wird mit Diffusoren umgeben, welche vor der Wand sitzend angebracht werden. Der Lautsprecher schließt also nicht frontbündig zur Wand, sondern zu den ihn umgebenden Diffusoren ab. Die größte vorgesehene Diffusor-Strukturtiefe beträgt 20 cm, die Tiefe der gewählten Monitorbox beträgt hingegen ca. 31 cm. Dieser Umstand macht es nötig ca. $\frac{1}{3}$ der Lautsprecherbox in der Wand zu platzieren. Dafür ist eine Vertiefung in der Wand vorzusehen, welche genug Platz bietet, um sowohl dem hinteren Teil der Lautsprecherbox selbst unterzubringen, als auch den Anschluss des Audio-Kabels sowie der Stromversorgung zu ermöglichen. Der nötige Kabelsatz wird rückwärtig durch die Wand an den Lautsprecher herangeführt und ist damit unsichtbar.

²⁰ Fey, Fritz: Böse Nachbarn - Lautsprecher in feindlichem Umfeld. In: Studio Special Studiomonitring. - Oberhausen: Studio Presse Verlag GmbH. - 2006, Studio Magazin Sonderausgabe. S.40-51

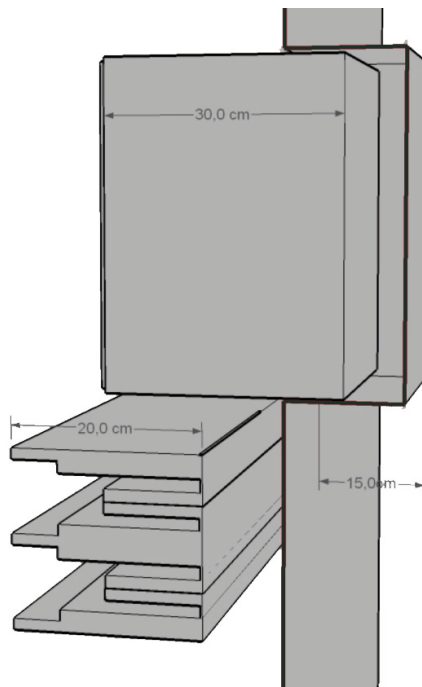


Abb 4.14 Schnittdarstellung Einbausituation der Lautsprecher

Die Bautiefe der Versenkung ergibt sich aus der Einstecktiefe des Lautsprechers mit 10 cm sowie der nötigen Tiefe des Kabelsatzes im gesteckten Zustand mit 7 cm also gesamt reichlich 20 cm. Die Lautsprecherbox steht nun zu $\frac{2}{3}$ auf der Oberfläche des Diffusers und zu $\frac{1}{3}$ in der Wandversenkung. Zur Montage der Struktur und der Lautsprecherbox werden diese von einer Stahlkonstruktion getragen. Diese steht auf dem Boden und ist mit der Wand verschraubt und damit gegen Umkippen gesichert. Die Stahlkonstruktion trägt nun die ganze Last, so dass die Wand gänzlich unbelastet bleibt. Die Konstruktion ist recht leicht auf- und abbaubar und besitzt damit modularen Charakter.



Abb 4.15 Platzierung der Lautsprecher

4.2 Schallführung

4.2.1 Wahrnehmung im Raum

Frühe Reflexionen und ihr Einfluss

Schallwellen, die sich innerhalb eines Raums rund um eine Schallquelle ausbreiten, erreichen nicht nur auf direktem Weg einen Empfänger, sondern werden von den verschiedenen Flächen im Raum reflektiert und treffen als verzögerte Reflexionen beim Empfänger ein. Dieser Schall beeinflusst in Addition mit dem Direktschall die Raumwahrnehmung des Hörers. Dabei folgen dem Direktschall nach kurzer Zeit einige besonders starke sogenannte frühe Reflexionen. Die frühen Reflexionen von Boden, Decke und Wänden haben einen großen Einfluss auf die akustische Wahrnehmung der Raumgröße und Raumgeometrie.²¹ Frühe Reflexionen mit einer Verzögerung von 0,8 ms bis 20 ms (0,3 m bis 7 m Umweg) verursachen eine unangenehme Klangfärbung, die durch Summierung und Auslöschung zwischen Direktschall und Reflexionen entsteht.²²

Die Wahrnehmung der Raumgröße wird besonders durch das Initial Time Delay Gap (ITDG) bestimmt (siehe 4.2.1_Anfangszeitlücke).

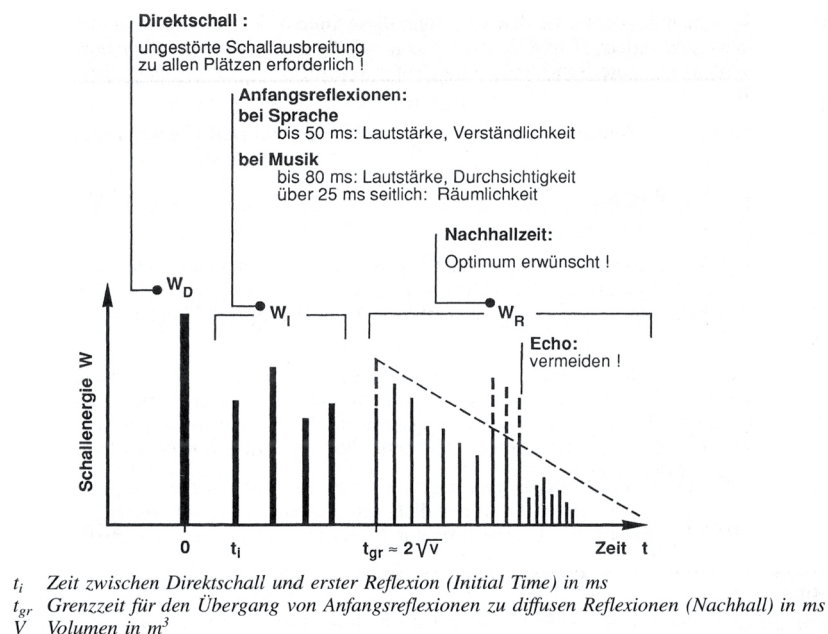


Abb 4.16 Schematisierte Raumimpulsantwort

21 Görne, Thomas: Tontechnik. - 1. Aufl. - München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006, S. 80

22 Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudiotechnik (Band 1). - 6. Aufl. - München: K.G.Saur Verlag KG, 1997, S. 28

Für die Wahrnehmung einer realen, natürlichen Schallquelle im Raum sind ausgeprägte frühe Reflexionen vorteilhaft, jedoch bei der elektroakustischen Wiedergabe in der Studiosituation sollten sie vermieden werden. Wenn die Reflexionen im Raum verglichen mit dem Direktschall zu laut sind, werden das Schallfeld und die dynamischen Panoramapositionen von Signalquellen verschmiert. Starke Reflexionen an Flächen und Kanten können zur Bildung einer wahrnehmbaren Phantomschallquelle am Reflexionspunkt führen, und so das Imaging des Frontlautsprechers beeinflussen. Störende Reflexionen werden als Verschiebung der Abbildung, Verschmieren des Signals und Verfärbung wahrgenommen (oder eben nicht bewusst wahrgenommen). Weiterhin entsteht durch Laufzeitunterschiede und damit einhergehender Phasenuntreue zwischen Direktsignal und reflektiertem Signal, das Verschleifen der Impulse.²³ Störende Reflexionen könnten im Extremfall sogar Kammfiltereffekte verursachen.

Überwiegt das Direktsignal gegenüber reflektiertem Schall, werden Lokalisationsschärfe und Gleichförmigkeit des Schallsignals verbessert. Wenn die reflektierende Fläche weit vom Lautsprecher entfernt oder diese bedämpft ist, reduziert sich die Amplitude der Reflexionen, mit einem positiven Effekt auf das Imaging.²⁴

Vereinfacht gesagt sind zu starke Reflexionen in der Hörpraxis unerwünscht, weil sie die räumliche Darstellung der Musikaufnahme bzw. die künstlich oder auch künstlerisch erstellte räumliche Darstellung überdecken. Diffuser Nachhall ohne charakteristische erste Reflexionen wird als neutral empfunden²⁵.

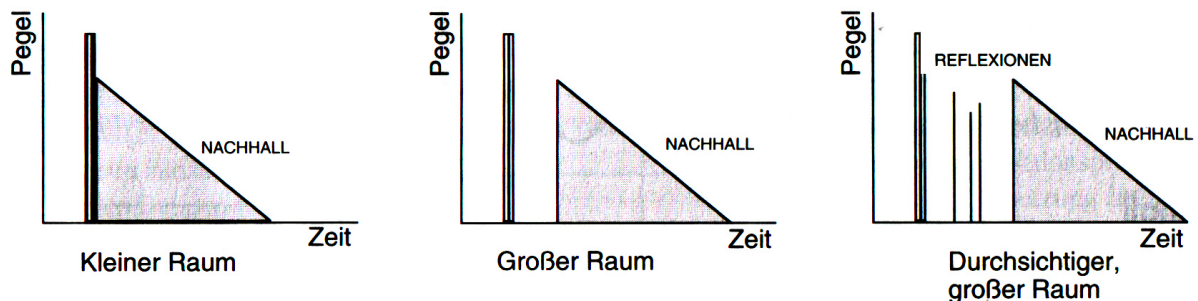


Abb 4.17 Darstellung des Einflusses der frühen Reflexionen auf Raumeindruck

Ziel ist es darum, die räumlichen Informationen und somit weitgehend die frühen Reflexionen auszuschalten. Im Studioraum lässt sich ein Diffusfeld ohne starke frühe Reflexionen durch Einsatz von Diffusoren, Absorbern oder durch Reflektoren erreichen.

23 Anet, Christophe; Martikainen, Ilpo: Abhörpräzision - Akustische Grundlagen für die Entwicklung des AutoCal-Systems von Genelec. In: Studio Special Studiomonitring. - Oberhausen: Studio Presse Verlag GmbH. -2006 Studio Magazin Sonderausgabe. S. 52-61

24 Anet, Christophe; Martikainen, Ilpo: Abhörpräzision - Akustische Grundlagen für die Entwicklung des AutoCal-Systems von Genelec. In: Studio Special Studiomonitring. - Oberhausen: Studio Presse Verlag GmbH. -2006 Studio Magazin Sonderausgabe. S. 52-61

25 Görne, Thomas: Tontechnik. -1. Aufl. - München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006, S. 80

Maskierung / Verdeckung in Zeit- und Frequenzbereich

Ist eine Reflexion wahrnehmbar, kann Sie eine Vielzahl von Wirkungen, wie die Veränderung der Klangfarbe, der Lautheit oder eine Veränderung räumlicher Aspekte im Hörereignis hervorrufen. Starke Reflexionen können sich bei entsprechendem zeitlichen Abstand zum Direktschall störend als Echo bemerkbar machen. Es ist jedoch auch bekannt, dass das Ohr nicht in der Lage ist, jede Einzelreflexion eines komplexen Schallfeldes aufzulösen.

Durch die Anwesenheit eines Klangs werden die Hörschwellen für andere Klänge verändert. Töne und Geräusche können sich gegenseitig verdecken, falls die Signale in Zeit- und Frequenzbereich nah beieinander liegen (Verdeckung, engl. masking). Bei der Verdeckung gleichzeitig dargebotener Signale (Simultanverdeckung) sind folgende Effekte zu beobachten:²⁶

- dicht benachbarte Töne verdecken einander stärker als Töne mit großem Frequenzunterschied;
- Die Verdeckung ist im Frequenzbereich unsymmetrisch, höhere Töne werden stärker als tiefere Töne verdeckt;
- Je größer der Pegel des verdeckenden Tons ist, desto breiter ist der verdeckte Frequenzbereich;
- Je größer die Bandbreite des verdeckenden Tons ist, desto breiter ist der verdeckte Frequenzbereich; Rauschen verdeckt alle Frequenzen gleichmäßig.

Verdeckung im Frequenzbereich wird als Simultanverdeckung bezeichnet. Durch Simultanverdeckung wird aus der Hörschwelle die Mithörschwelle. Die Mithörschwelle verläuft in der Regel zu hohen Frequenzen hin flacher als zu tiefen Frequenzen, d.h. tiefe Töne verdecken hohe besser als umgekehrt.

Im Bild ist die Wirkungsweise von Maskierungseffekten dargestellt. Ist zum Beispiel ein 1 kHz Ton mit einem Schallpegel von 80 dB anwesend, so kann ein 2 kHz-Ton von 40 dB nicht mehr wahrgenommen werden. Das heißt, der 2 kHz-Ton kann weggelassen werden, ohne dass ein Mensch diesen Unterschied hört.

Tritt zusammen mit einem 1 kHz Ton von 80 dB ein 2 kHz Ton von 60 dB auf, kann man beide Töne wahrnehmen. Aber man kann diesen 2 kHz Ton mit sehr schlechter Qualität übertragen: Selbst Störgeräusche von 40 dB können vom Menschen nicht mehr wahrgenommen werden.²⁷

26 Görne, Thomas: Tontechnik. -1.Aufl. - München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006, S. 116

27 Seite „Maskierungseffekt“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 26. Oktober 2008, 16:43 UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Maskierungseffekt&oldid=52273928> (Abgerufen: 13. Februar 2009, 17:03 UTC)

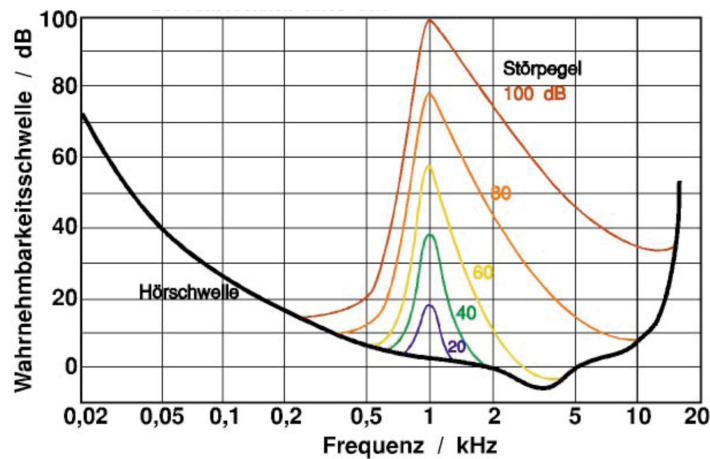


Abb 4.18 Anhebung der Wahrnehmbarkeitsschwelle bei Anwesenheit eines Störsignals

Verdeckung geschieht nicht nur auf der Frequenzachse sondern auch im Zeitbereich, d.h.

ein Störschall kann sowohl nachfolgende Schalle (Nachverdeckung) als auch, wenn auch in geringerem Maße, vorangehende Schalle (Vorverdeckung) maskieren.²⁸

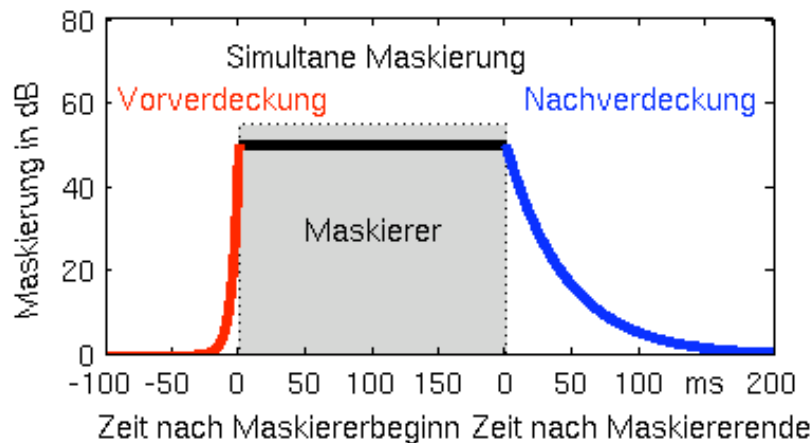


Abb 4.19 Schematische Darstellung der zeitlichen Maskierung

So wie ein Ton in seiner spektralen Umgebung Maskierung hervorruft, tut er dies auch in zeitlicher Hinsicht. Abb 4.19 stellt dies schematisch dar. Die Maskierungswirkung eines Schalls auf kurze Schalle vor dem Maskiererbeginn ist gering und auf wenige Millisekunden beschränkt.

Dagegen spielt die Nachverdeckung, die ein Schall noch bis 100 ms nach seinem Abschalten auf später einsetzende kurze Töne ausübt, eine deutlich größere Rolle. Folgen Schalle mit geringem Pegel einem Schall mit höherem Pegel können sie unhörbar sein.

Daraus schlussfolgernd wird angenommen, dass in Lautsprechernähe erzeugte Reflexionen jene im Raumkörper entstandenen Reflexionen verdecken.

²⁸ Seite „Maskierungseffekt“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 26. Oktober 2008, 16:43 UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Maskierungseffekt&oldid=52273928> (Abgerufen: 13. Februar 2009, 17:03 UTC)

Die Anfangszeitlücke / Initial Time Delay Gap (ITDG)

Die Anfangszeitlücke entsteht durch die Laufzeit zwischen dem zuerst eintreffenden Direktschall und den frühen Reflexionen beispielsweise über die Seitenwände. In kleinen Räumen treffen die ersten Reflexionen mit hohem Pegel nach einer kurzen Anfangszeitlücke von weniger als 15 ms ein. In sehr großen Räumen ist diese Anfangszeitlücke länger (20 ms bis 60 ms) und der Pegel der ersten Reflexionen geringer. Die Anfangszeitlücke ist somit keine Raumkonstante sondern hängt vom Abstand der Schallquelle zur Hörposition und den Reflexionsflächen ab. Dieser zeitliche Abstand zwischen Direktschall und den ersten am Hörplatz eintreffenden Reflexionen wird auch als Anfangszeit (Initial Time)²⁹ definiert. Sie bezeichnet das Maß der so genannten Intimität. Die ersten Reflexionen tragen den Hauptteil der Rauminformationen, welche vom Gehirn ausgewertet werden. Eine größere Anfangszeitlücke entspricht dem Eindruck von Nähe. Eine kleine Anfangszeitlücke erzeugt den Eindruck von Entfernung (Abb 4.20).³⁰

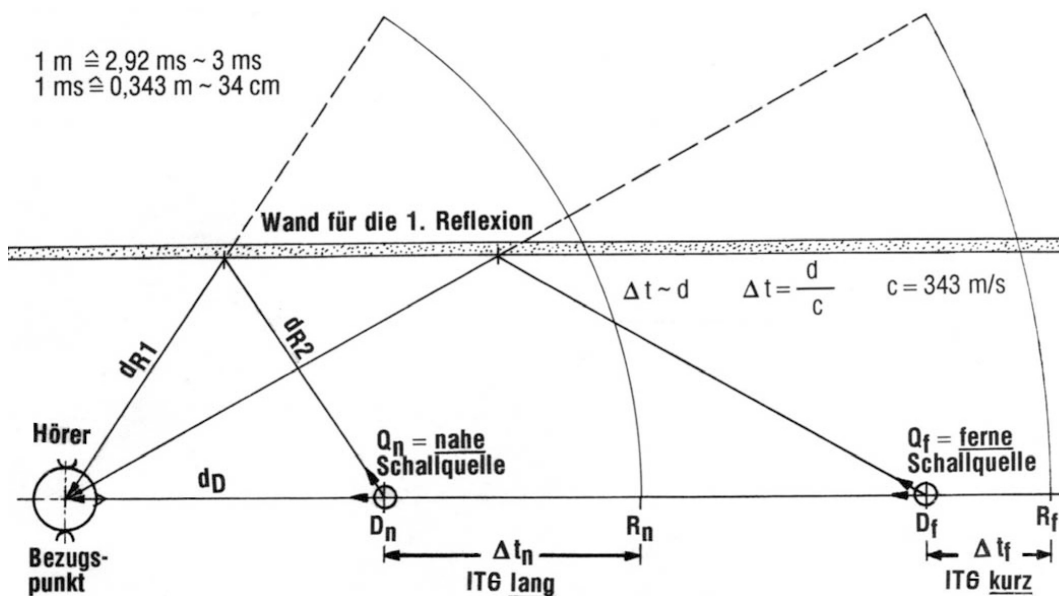


Abb 4.20 Prinzipdarstellung Anfangszeitlücke (ITDG)

29 Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1. Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S. 71

30 Sengpiel, Eberhard <eberhard@sengpielaudio.com> : DieAnfangszeitlücke und der Naeheeindruck. URL: < www.sengpielaudio.com/DieAnfangszeitlueckeNaeheeindruck.pdf >, 20.08.2006:

4.2.2 Vermeidung früher Reflexionen durch schallführende Elemente

Reflektoren

Um den Hörplatz frei von frühen Reflexionen zu halten, lassen sich mit Hilfe von Reflektoren die Wand- und Deckenreflexionen auf die Rückwand lenken, wo sie absorbiert werden können. Die Schallführungselemente sollten zu diesem Zweck an Decke und Wänden zwischen Lautsprecher und Hörplatz angebracht sein. Reflektoren sind große, schallharte Platten, aus festem, schwerem Material. Damit eine Fläche tatsächlich die gewünschte geometrische Reflexion erzeugt, muss sie groß gegenüber der Wellenlänge sein.

Grenzfrequenz für die Wirksamkeit einer Fläche als Reflektor

Die untere Grenzfrequenz für die Wirksamkeit als Reflektor wird durch die Abmessungen des Reflektors vorgegeben. Eine Reflexionswirkung ist nur gegeben wenn die Wellenlänge klein im Bezug zur Reflexionsfläche ist. Durch Vergrößerung der Reflexionsfläche kann die untere Grenzfrequenz gesenkt werden. Je größer Abstand und der Schalleinfallswinkel, desto höher steigt die untere Grenzfrequenz. Eine Größe von unter 1 m² ist kaum sinnvoll. Die untere Grenzfrequenz für die Reflexionswirkung lässt sich aus dem Durchmesser des Reflektors, dem Abstand Quelle - Reflektor und dem Ein- / Austrittswinkel bestimmen.³¹

$$f_u = 700 \cdot \frac{a_1 \cdot a_2}{(b \cdot \cos \alpha)^2 \cdot (a_1 + a_2)}$$

Abb 4.21 Formel zu Mindestgrösse von Reflektorflächen

31 Görne, Thomas: Tontechnik. -1. Aufl. - München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006, S. 89

Deckenreflektor

Das Ohr nimmt, wie bereits erklärt, sowohl die direkten als auch die reflektierten Schallfelder wahr. Deshalb ist es das Ziel eine reflexionsarme Zone um den Hörplatz zu schaffen.

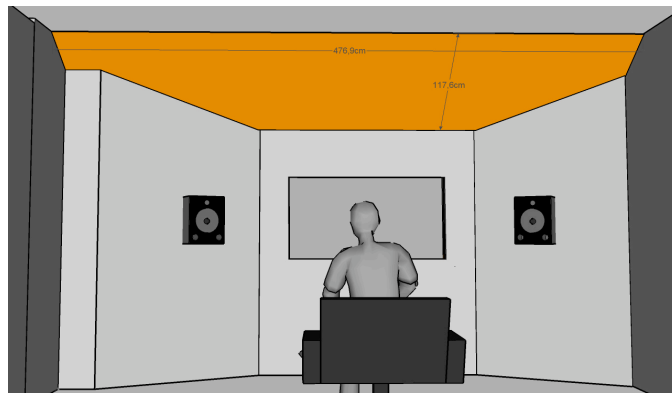


Abb 4.22 Darstellung Deckenreflektor

Der Reflektor über dem Regiefenster leitet das außerhalb der Hauptachse angeregte Reflexionsschallfeld um die Abhörposition herum auf die Rückwand ab.

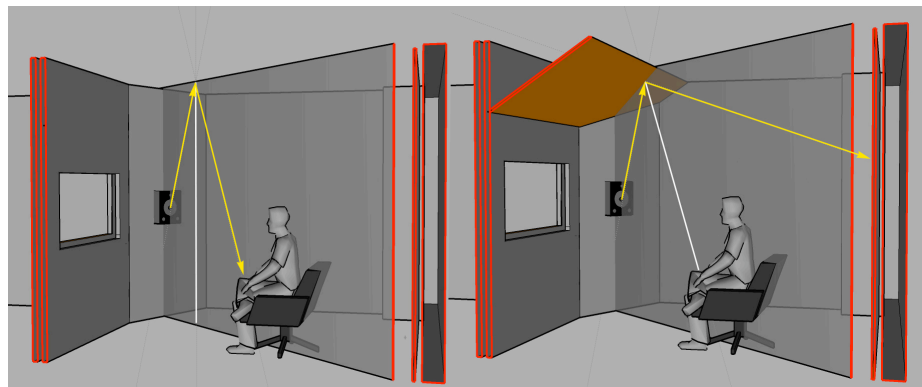


Abb 4.23 Darstellung der schallführenden Funktion des Deckenreflektors

Für die Entfernung von 1,6 m vom Lautsprecher zum Reflektor, und einem Abstand Reflektor - Hörplatz von 2,2 m sowie einem Schalleinfallswinkel von 40°(siehe Abb 4.23) ergibt sich gemäß der Formel die untere Grenzfrequenz von 1400 Hz.

$$f_u = 700 \cdot \frac{1,6 \text{ m} \cdot 2,2 \text{ m}}{(1,3 \text{ m} \cdot \cos 40^\circ)^2 \cdot (1,6 \text{ m} + 2,2 \text{ m})} = 1458 \text{ Hz}$$

Abb 4.24 Berechnung zu Mindestgröße der Reflexionsfläche für vollständige Reflexion

Der Hohlraum hinter dem Überhang ist mit TP1 Dämmwolle ausgelegt und soll die Option bieten als Helmholtz'scher Resonanzraum zu dienen (siehe 4.4.2).

Seitliche Abflectoren

An den recht kurzen Seitenwänden sind in erster Linie Maßnahmen zur Verhinderung störender Erstreflexionen vorgesehen. Diese sollen unerwünscht starke Rückwürfe der Seitenwände in Richtung Hörplatz vermeiden.

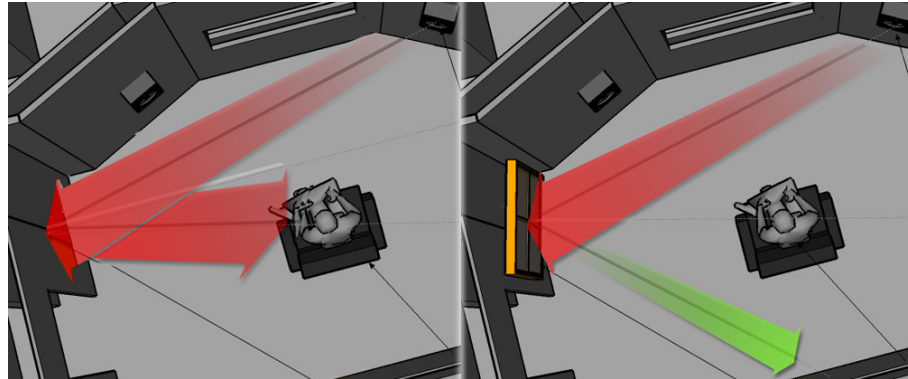


Abb 4.25 Vergleichende Darstellung für das Prinzip der Abflectoren

Dies soll mittels Abflectoren geschehen. Abflectoren besitzen sowohl eine absorbierende als auch reflektierende Funktion. Ihr Aufbau gestaltet sich aus schallführenden Flächen, welche den Schall der seitlichen Erstreflexionen um den Hörplatz herum auf die Rückwand leiten. Gleichzeitig besitzen diese Reflektoren eine 5 cm starke Mineralfaserschicht, welche absorbierend wirkt. Der nicht absorbierte Schallanteil soll so gezielt von der Abhörposition weg reflektiert werden. Auf diese Weise werden die gerichtet einstrahlenden Schallfeldanteile kontrolliert. Es besteht aber auch eine Wirkung für die allgemeine Diffusfeldabsorption durch die auch dem ungerichteten Schallfeld Energie entzogen wird.

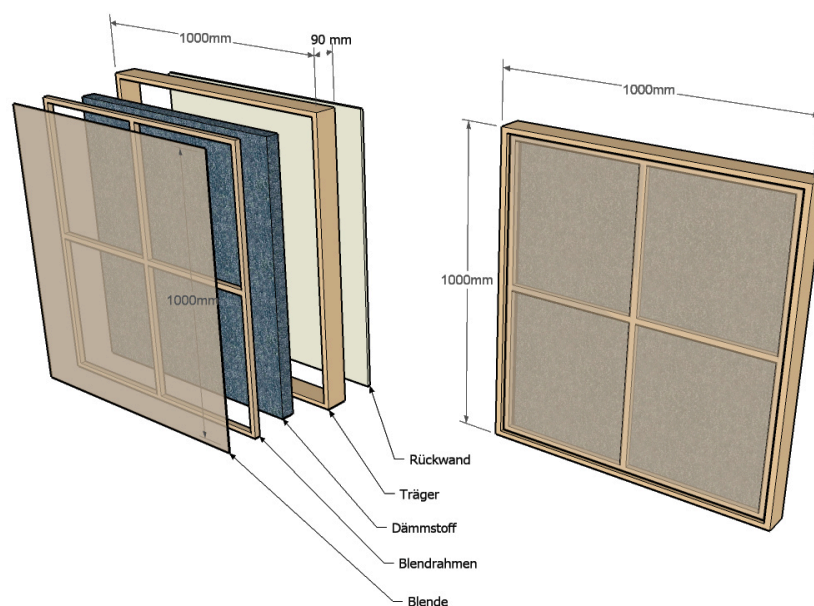


Abb 4.26 Aufbau Abflector

Beispielrechnung zur Reflexionswirkung der Seitenabflectoren

Die Größe der Reflektorfläche beträgt 1 m². Die Entfernung der rechten Box zum linken Reflektor beträgt 3,8 m (siehe Abb 4.2.5). Von diesem Punkt beträgt die Entfernung zum Hörplatz 2 m. Gemäß obiger Formel:

$$f_u = 700 \cdot \frac{3,8 \text{ m} \cdot 2 \text{ m}}{(1 \text{ m} \cdot \cos 23) ^2 \cdot (3,82 \text{ m} + 2 \text{ m})} = 3230,7 \text{ Hz}$$

Abb 4.27 Berechnung zu Grenzfrequenz für Reflexion bei Reflektorengröße von 1 m²

Die untere Grenzfrequenz des linken Reflektors für Absorption des Schalleinfalls der linken Box berechnet sich wie folgt. Die Entfernung der linken Box zum linken Reflektor beträgt 1,35 m. Von diesem Punkt beträgt die Entfernung zum Hörplatz 2 m.

$$f_u = 700 \cdot \frac{1,35 \text{ m} \cdot 2 \text{ m}}{(1 \text{ m} \cdot \cos 60) ^2 \cdot (1,35 \text{ m} + 2 \text{ m})} = 2256,7 \text{ Hz}$$

Abb 4.28 Berechnung zu Grenzfrequenz für Reflexion bei Reflektorengröße von 1 m²

Analog gelten die Rechnungen auch für den Reflektor auf der rechten Seite. In Addition mit der absorbierenden Wirkung, welche ab 500 Hz ansteigend wirkt (siehe Abb 4.4.7), sollten die Abflectoren die gewünschte Wirkung besitzen.

4.3 Diffusität

4.3.1 Beeinflussung des Schallfeldes durch diffuse Reflexionen

Nach den Reflexionsgesetzen wird je nach Form der Reflexionsfläche der Schall zurückgeworfen, gebündelt oder gestreut. Eine gestreute Reflexion verteilt den reflektierten Schall auf einen größeren Bereich, und reduziert damit seine Energie in eine bestimmte Richtung. Der Schall kann also gezielt durch Reflexion über Diffusoren gestreut werden. Diffusoren dienen der Beseitigung störender harter Reflexionen, bewirken eine verbesserte Durchmischung des Diffusschalls, und stellen deshalb eine feste Größe bei der Planung schallverteilender Oberflächen von Abhörräumen dar. Durch gezielte Erzeugung von Diffusschall entsteht ein homogeneres Schallfeld, der Nachhall wird diffuser ist über die Frequenz kontinuierlich (homogenes Nachhallspektrum). Der Raum wirkt nicht so trocken bis stumpf, er wirkt lebendig. Damit tragen Diffusoren erheblich zur Verbesserung der Akustik eines Raumes bei. Natürliche Diffusoren sind alle Strukturen, die in der Größe der Wellenlänge liegen. Bücherregale wirken beispielsweise als Diffusoren im Mittenbereich ($\lambda = 24 \text{ cm}$ bei 1 kHz)³².

Diffusität lässt sich gezielt erzeugen durch:

- Diffusität durch $\lambda/2$ - bzw. Schröder-Diffusoren
- Diffusität durch Phasengitter
- Diffusität durch geometrische Strukturen

Diffusität in ESS-Regie

Beim ESS-Konzept soll genügend Schalldiffusität in der direkten Nähe zur Schallquelle erzeugt werden, welche keine Merkmale des Raumes trägt. Dieses aus der Front kommende, homogene Diffusschallfeld trägt keine raumspezifische Information und überlagert sich dem normalen Diffusschallfeld des Raumes und dessen Raumantwortsinformationen. Das nahe der Quelle erzeugte, diffuse Schallfeld maskiert bzw. verdeckt dabei andere problematische Reflexionen, wie beispielsweise Pult- und Nahfeldreflexionen an Bildschirmen. Dadurch kann der Direktschall der Lautsprecher besser beurteilt werden. Die Ausbreitung des Nachhalls im Raum wird homogener. Dabei werden die physikalischen Eigenschaften bezüglich der Abstrahlcharakteristik von Lautsprechern ausgenutzt.

32 Frieseke, Andreas: Studio Akustik. - 1. Aufl. - Bergkirchen: PPV MEDIEN, 2006, S. 170

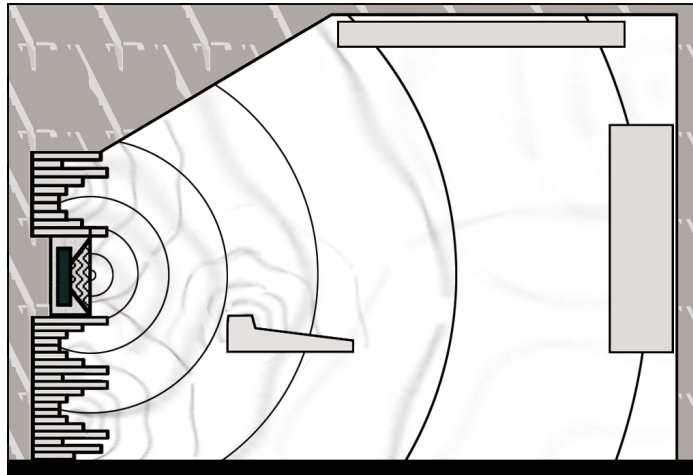


Abb 4.29 schematische Darstellung ESS-Prinzip

Durch die Beugung des Schalls um den Lautsprecher herum, gelangt ein Teil des abgestrahlten Schalls nach kurzem Umweg stark gestreut in den Raum. Die Diffusität im Front End wird durch den Einsatz von $\lambda/2$ - bzw. Schröder-Diffusoren erreicht.

Schröder-Diffusoren

Schröder-Diffusoren arbeiten nach dem Prinzip der $\lambda/2$ -Transformation, also der Reflexion mit Phasenverschiebungen. Wenn eine Welle in eine Vertiefung tritt, deren Tiefe gerade ein Viertel der Wellenlänge beträgt, dann wird die aus der Vertiefung reflektierte Welle gegenüber der von der benachbarten Oberfläche reflektierten Welle um $\lambda/2$ phasenverschoben.³³ Durch Interferenz kommt es abwechselnd zu Auslöschung und Verstärkung. Dabei werden viele einzelne Kammfiltereffekte erzeugt. Diese über die Frequenz gleichverteilten Kammfilter werden vom Ohr viel angenehmer wahrgenommen als die durch einzelne schallharte Reflexionen hervorgerufenen Kammfiltereffekte.³⁴

Es existieren offene und geschlossene Ausführungen, wobei sich die geschlossene Variante durch eine Trennung der einzelnen Felder ausweist. Die offene Variante ist im Grunde das Gegenstück, d.h. sie ist invers aufgebaut. Die Struktur der geschlossenen Variante besteht aus einer Aneinanderreihung verschieden tiefer, kastenförmiger Hohlräume, die offene Variante bildet sich aus einer Schichtung unterschiedlich starker Streifen in einer definierten Abfolge. Das Material aus dem die Struktur aufgebaut wird, ist schallhart und kann aus Holz, Metall, Stein oder auch Pappe bestehen.

³³ Görne, Thomas: Tontechnik. - 1. Aufl. - München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006, S. 87

³⁴ Jochen, Veit: Eiertanz. Akustische Lösungswege für die Surroundwiedergabe in Tonstudios. In: Studio Magazin. - Oberhausen: Studio Presse Verlag GmbH. - 1999 Heft-Nr.03, S. 38-61

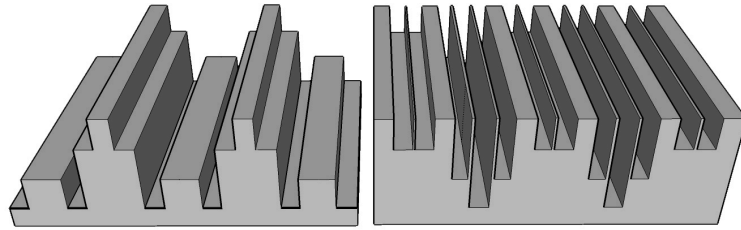


Abb 4.30 QRD - Diffusoren offen und geschlossen

Die wirksamen Grenzfrequenzen für die diffusen Reflexionen bestimmen sich durch Strukturtiefe- und -breite. Allgemein gilt, je tiefer die Streifen sind, desto tiefer ist die untere Grenzfrequenz. Die Schachtbreite bestimmt die höchste erfasste Frequenz. Näherungsweise muss dabei die größte Strukturtiefe etwa einer halben Wellenlänge entsprechen, d.h. für eine untere Grenzfrequenz von 500 Hz gilt eine Einbautiefe von etwa 0,35 m.

Die Festlegung der einzelnen Strukturturen erfolgt nach den Verteilungsgesetzen der Zahlentheorie und ermöglicht gute Diffusität in einem Frequenzbereich über 4 Oktaven.³⁵ Bei der Planung der Diffusoren ist zu beachten, dass die Streuwirkung senkrecht zur Strukturrichtung besteht. Deshalb ist die entsprechende Kombination der Strukturausrichtung notwendig.³⁶

Diffusität durch Phasengitter

Eine weitere Möglichkeit für den Aufbau diffuser Reflektoren besteht in der wechselseitigen Anordnung von Flächen stark unterschiedlicher Absorptiongrade. Dies nennt man Phasengitter. Immer dort, wo zwei akustisch unterschiedlich wirksame Materialien nebeneinander liegen, wird ein Teil der einfallenden Welle diffus gestreut. Die schachtbrettartige Anbringung von reflektierenden und absorbierenden Flächen lässt sich sehr einfach, aber auch nur in beschränkter Wirkung nutzen. Mit dem in der Abbildung dargestellten Phasengitter aus verschiedenen abgestimmten Lochplattenabsorbern ist es möglich in einem Frequenzbereich von etwa 3 bis 4 Oktaven diffuse Reflexionen zu erzielen.³⁷



Abb 4.31 Phasengitter aus verschieden abgestimmten Lochplattenabsorbern

³⁵ Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1. Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S. 113

³⁶ Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1. Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S. 115

³⁷ Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1. Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S. 113

4.3.2 Geplante Diffusoren in Tonregie

Schröder-Diffuserelementen in Tonregie

Bei den geplanten Diffuserelementen im Front End handelt es sich um QRD-Diffusoren basierend auf der Folge der Primzahl 7, demnach besteht eine Periode aus 7 Streifen. Vorgesehen ist die Kombination von zwei Strukturgrößen, horizontal und vertikal um den Lautsprecher herum ausgerichtet.

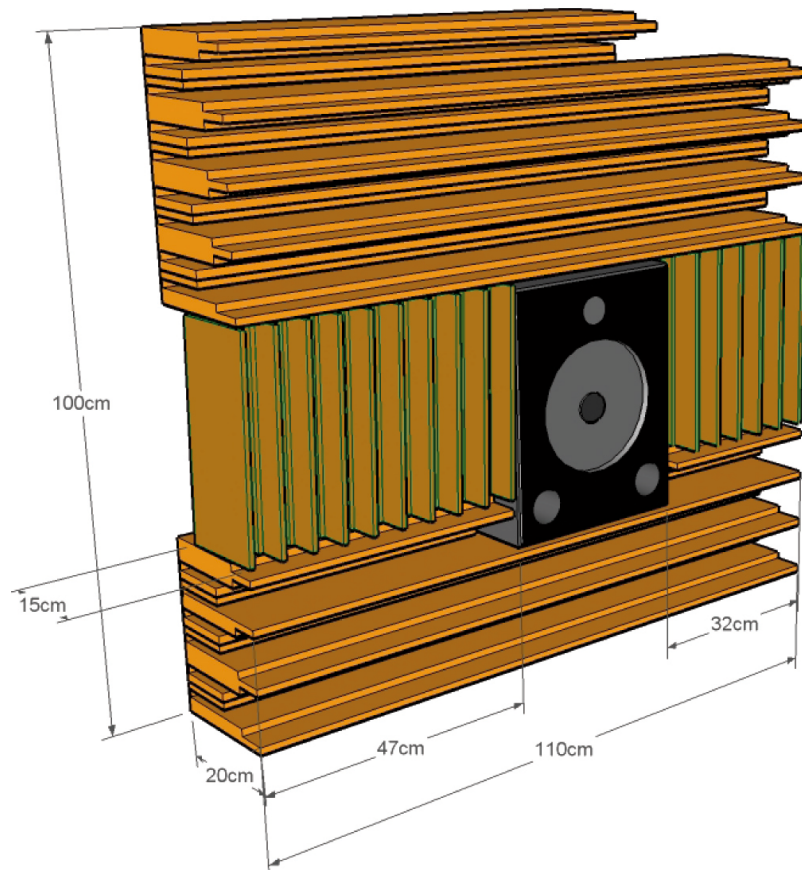


Abb 4.32 Platzierung der QRD um Lautsprecher

Oberhalb und unterhalb des Lautsprechers sind die größer dimensionierten Strukturelemente in waagerechter Ausrichtung vorgesehen. Ihre Wirksamkeit erstreckt sich bei direkter Einstrahlung auf Achse über den Bereich von 492 Hz - 14426 Hz. Seitlich neben dem Lautsprecher, in senkrechter Ausrichtung, kommt die zweite Strukturgröße zum Einsatz, welche durch ihre kleineren Dimensionen auf einen höheren Frequenzbereich abgestimmt ist.

Der Wirksamkeitsbereich bei direkter Einstrahlung erstreckt sich theoretisch von 730 Hz bis 24214 Hz. Insgesamt überstreichen die Diffusoren inklusive der Lautsprecher eine Fläche von reichlich 1 m² (siehe Abb 4.3.1).



Abb 4.33 Anordnung der Diffusoren im Front End

Diffusor gross -- Approximate frequency range: 492 Hz - 14426 Hz				
Ergebnis für 12 mm Grabenbreite bei 20 cm maximaler Grabentiefe und 7 Gräben pro Periode				
Results for 0.47 inch well width, 7.87 inch max well depth, 7 wells per period				
Well Number	Residue	Well Depth (Inches)	Grabentiefe (cm)	Bretttiefe (cm)
1	0	0	0	20
2	1	1,97	5	15
3	4	7,87	20	0
4	2	3,94	10,00	10
5	2	3,94	10,00	10
6	4	7,87	20	0
7	1	1,97	5	15

Diffusor klein -- Approximate frequency range: 730 Hz - 24214 Hz				
Ergebnis für 7 mm Grabenbreite bei 13,5 cm maximaler Grabentiefe und 7 Gräben pro Periode				
Results for 0.28 inch well width, 5.31 inch max well depth, 7 wells per period				
Well Number	Residue	Well Depth (Inches)	Grabentiefe (cm)	Bretttiefe (cm)
1	0	0	0	13,5
2	1	1,33	3,38	10,12
3	4	5,31	13,5	0
4	2	2,65	6,73	6,77
5	2	2,65	6,73	6,77
6	4	5,31	13,5	0
7	1	1,33	3,38	10,12

Abb 4.34 Maße für die Dimensionierung der Diffusoren³⁸

³⁸ Dexter, Tom <tdexter@digitalaudiorock.com> : QRD Diffuser Well Depth Calculator. URL:<<http://www.digitalaudiorock.com/cgi-bin/qrd.cgi>>, 02.02.2009:

Phasengitter-Diffuserelemente in Tonregie

Der Effekt des Phasengitters wird sich, wenn auch in geringem Umfang, durch die Art und Weise der Platzierung der absorptiven Flächen auswirken. Der Raumkorpus wird an den Wänden sowie der Decke mit rechteckigen absorbierenden Flächen ausgelegt. Die Kantenlänge der absorbierenden Flächen beträgt mehrere Meter. Eine zusätzliche diffuse Durchmischung des Schallfelds durch eine streuende Wirkung der abwechselnd stark und wenig bzw. nicht absorbierende Teilstücke der Raumbegrenzungsflächen ist anzunehmen. In Abhängigkeit der Abstände und der Bautiefe der Absorberelemente wird der Frequenzbereich der oberen Mitten und Höhen den Beugungseffekten unterliegen (siehe Abb 4.35).

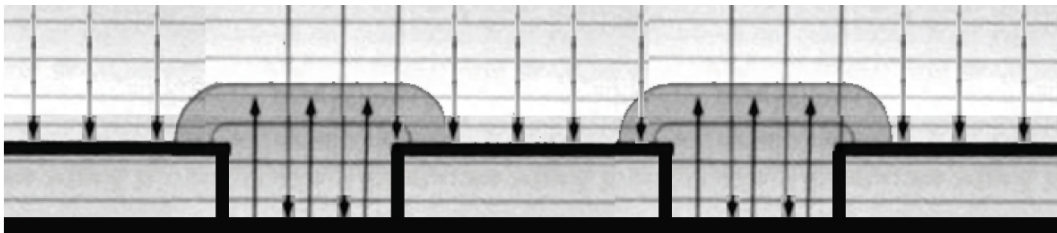


Abb 4.35 Wirkung des Phasengitter

4.4 Schallabsorption

4.4.1 Beeinflussung des Schallfeldes durch frequenzselektive Absorption

Bereits bei der Schallausbreitung in der Luft wird dem Schall Energie entzogen. Aber auch bei jeder Reflexion an einem Hindernis sowie bei der Brechung in ein anderes Trägerelement wird dem Schall Energie entzogen.

Die wichtigsten Funktionsprinzipien sind:

- Energieentzug durch Reibung bei Luftbewegung in Poren
- Energieentzug durch Anregung zur mechanischen Schwingung von Platten
- Energieentzug durch Reibung bei verstärkter Luftbewegung in Helmholtzresonatoren

Aufgrund dieser Effekte ist es möglich, für jeden Stoff einen spezifischen Absorptionsgrad zu bestimmen, welcher frequenzbezogen, d.h. als frequenzabhängiger Graph angegeben wird. 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.³⁹

Vor allem die Eigenschaften der Reflexionsflächen haben Auswirkungen auf die Ausbreitung des Schalls im Raum. Durch den Einsatz technischer Absorber kann die Nachhallzeit frequenzbezogen linearisiert werden, dabei werden bestimmte Frequenzen unterschiedlich stark bedämpft.

Um die akustischen Parameter von Räumen, durch Erhöhung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche zu beeinflussen, werden so genannte technische Absorber genutzt, welche meist an Decken- und Wandflächen zum Einsatz kommen.

Während es relativ leicht ist, hohe Frequenzen zu bedämpfen, stellen die tiefen Frequenzen ein großes Problem dar. Gerade kleine Räume, deren Abmessung den Wellenlängen der tieffrequenten Wellen entsprechen können durch Interferenzen zu Aufschwingungen bestimmter Frequenzbereiche neigen. Zweckmäßig ist es deshalb, diese Absorber so zu positionieren dass diese Raummoden unterdrückt werden. Weiterhin sollte man das Phänomen des Druckstaus an Raumkanten und Ecken ausnutzen.

33 Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1. Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.66

4.4.2 Technische Schallabsorber

Technische Schallabsorber lassen sich zwei Gruppen zuordnen. Die porösen Schallabsorber bestehen meist aus mineralischen oder organischen Faserstoffen, Schaumkunststoffen, textilen Vorhängen usw. Die zweite Art der Absorber bilden Resonatoren in Form von Plattenschwingern, Lochplattenschwingern und Helmholtzresonatoren. Die Frequenzverläufe beider Arten unterscheiden sich grundsätzlich. Poröse Schallabsorber besitzen eine mit der Frequenz zunehmende breitbandige Absorptionswirkung, womit sich leicht mittlere und hochfrequente Signalanteile des Raumschalls bei der Reflexion bedämpfen lassen. Tieffrequente Anteile lassen sich in den meisten Fällen nur durch Resonatoren bedämpfen, da sonst enorme Dicken des absorbierenden Stoffes erforderlich wären. Resonatoren absorbieren vorzugsweise in einem schmalen Frequenzbereich, dem Eigenresonanzgebiet, das bei mittleren oder tiefen Frequenzen liegt. Durch Kombination beider Arten lässt sich der gesamte Hörbereich erfassen.⁴⁰

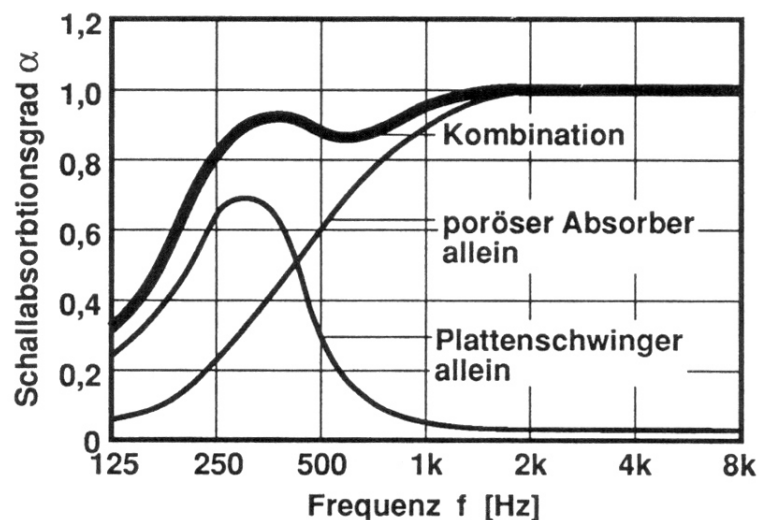


Abb 4.36 Wirkung Kombination

Poröse Absorber

Poröse Absorber sind leichte Materialien mit offenporiger Oberfläche, sie wandeln Schallenergie durch Reibung in Wärme um und wirken vor allem im Bereich von mittleren bis hohen Frequenzen. Die Wirksamkeit besteht bei höheren Frequenzen in relativ großer Breitbandigkeit. Die Schallabsorptionsfähigkeit des Stoffes an sich wird bestimmt durch seine Porösität, den Strukturfaktor, und vor allem durch den längenspezifischen Strömungswiderstand.⁴¹

Jedoch nicht nur die Stoffeigenschaften haben Einfluss auf die Schallabsorption. Die Dicke des Dämmstoffes muss im Bereich der zu absorbierenden Wellenlänge liegen, da die schallabsor-

⁴⁰ Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1. Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.69

⁴¹ Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1. Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.71

bierende Wirkung poröser Stoffe dadurch zustande kommt, dass Reibungsverluste der Luftteilchen bei ihrer Bewegung im Inneren des Materials auftreten.

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Schallabsorption des porösen Absorbers mit geringer Materialstärke bei tiefen Frequenzen besteht darin, ihn nicht direkt vor einer schallharten Wand, sondern in einem bestimmten Abstand im Gebiet maximaler Schallschnelle anzuordnen. Dort ist die Teilchenbewegung besonders groß.⁴²

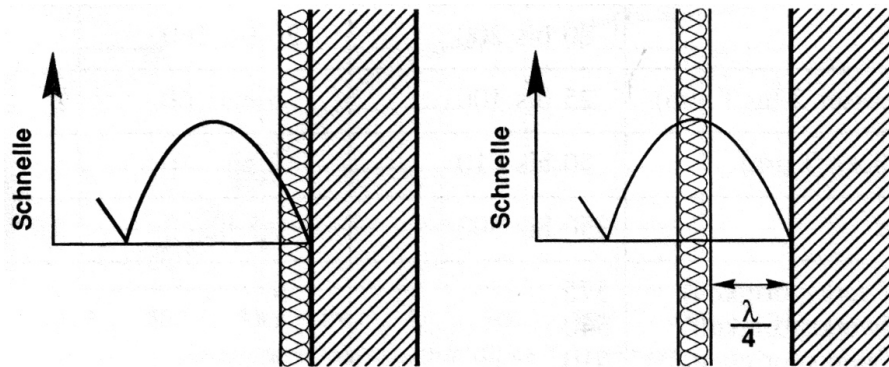
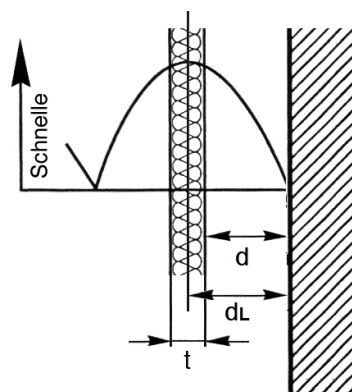


Abb 4.37 Verbesserung Wirkung poröser Absorber

Für jede spezifische Frequenz findet sich ein solches Gebiet maximaler Schallschnelle im Abstand der viertel Wellenlänge ($\frac{1}{4} \lambda$) und deren ganzzahligen Vielfachen vor einer Wand. Man kann also die schallabsorbierende Wirkung eines porösen Absorbers in einem bestimmten, allerdings relativ schmalem Frequenzgebiet dadurch verbessern, dass man ihn für die interessierende mittlere Zielfrequenz des zu beeinflussenden Gebietes im Wandabstand von einer Viertelwellenlänge anordnet.



$$d_L = \frac{\lambda}{4} = \frac{8500}{f} \text{ (cm)}$$

$$f = \frac{8500}{d_L} \text{ (Hz)}$$

Abb 4.38 Verbesserung Wirkung poröser Absorber

42 Fasold, Wolfgang; Winkler, Helgo: Bauphysikalische Entwurfslehre. -1. Aufl. - Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1976, S. 89

Die erzielbare Wirkung, ist in etwa so groß, als sei die geringe Schichtdicke d um den Abstand d_L vergrößert worden. Diese Betrachtung gilt natürlich nur für das dem Viertelwellenabstand entsprechende Frequenzgebiet, etwa in der Breite einer Oktave.⁴³

Neben dem Wandabstand beeinflusst auch die Aufteilung der Absorberoberfläche in mehrere Teilflächen den Schallabsorptionsgrad. Ursache hierfür ist der so genannte Kantenbeugungseffekt. Unter Kantenbeugung versteht man das Zustandekommen einer zusätzlichen Absorption durch Hineinbeugen von Schall in den Absorber an seinen Kanten (siehe 4.4.3)

Tiefe Frequenzbereiche haben enorme Wellenlängen, es wären damit enorme Bautiefen poröser Absorber für die tiefen Frequenzen nötig. Für die Bedämpfung tiefer Frequenzen werden deshalb Plattenschwinger oder / und Helmholtzresonatoren eingesetzt.

Plattenresonatoren

Plattenresonatoren basieren auf einem Masse-Feder Schwingungssystem. Eine Platte (Holz, Metall, Gipskarton oder Kunststoff) schwingt angeregt durch den Schall vor einem geschlossenen Luftvolumen (Abb 3.31). Die Resonanzfrequenz ist abhängig von der Materialmasse bezogen auf die Fläche sowie dem Luftspalt der eingeschlossenen Luft hinter der schwingenden Fläche, welche als Rückstellkraft dient. Ihren höchsten Wirkungsgrad besitzen sie bei ihrer Eigenfrequenz. Dem Schall wird durch das Umwandeln der Schallenergie in die Bewegungsenergie der Platte Energie entzogen.

Plattenresonatoren wirken je nach Auslegung bei tiefen und mittleren Frequenzen, jedoch nur in einem engen Frequenzbereich. Durch Befüllung des Hohlraumes 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.

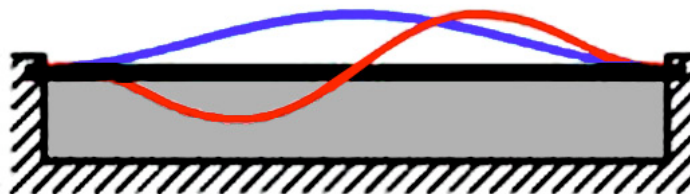


Abb 4.39 Prinzip Plattenabsorber

Je weicher die Federwirkung aus Luft und Schaumstoff und je größer die Masse der Platte ist, desto tiefer liegt Resonanzfrequenz. Im Allgemeinen lassen sich bei Plattenresonatoren Resonanzfrequenzen von 30-300 Hz erreichen. In akustisch sehr trockenen Räumen können schwach bedämpfte Resonatoren den Nachhall scheinbar verlängern, weil sie die Schallenergie

⁴³ Fasold, Wolfgang; Winkler, Helgo: Bauphysikalische Entwurfslehre. -1. Aufl. - Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1976, S. 89

speichern und einen Teil verzögert wieder als Luftschall abgeben. Normalerweise kann man aber mit allen Arten von Resonatoren den Nachhall wirkungsvoll verkürzen. Alle schwingungsfähigen Konstruktionen z.B. Dielenboden, Fenster, Schränke, abgehangene Deckenkonstruktion oder nicht massive Wandkonstruktionen wie etwa Gipskarton-Wände, Leichtbauwände oder Vertäfelungen wirken als Plattenschwinger. Die Probe auf Eignung als Plattenschwinger macht man durch anklopfen. Schwingende Platten geben dabei einen dumpfen Ton von sich, seine Frequenz ist die Resonanzfrequenz der Platte.

Helmholtzresonatoren

Helmholtzresonatoren werden genutzt, um eine Absorption tiefer bis mittlerer Frequenzen zu erreichen. Durch sein Prinzip kann tieffrequenten Raummoden, die einen großen Frequenzabstand zu anderen Moden haben, gezielt Energie entzogen werden. 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. 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 entgegen wirkt. Dadurch entstehen Phasenauslöschungen bei der Resonanzfrequenz des Resonators, welche frequenzbezogen zusätzliche Energie entziehen.⁴⁴

Der vom Helmholtzresonator reflektierte Schall wird an den Kanten der Öffnung gebeugt und diffusiert, was zum Effekt eines homogenen Schallfelds führt. Die Resonanzfrequenz des Helmholtzresonators berechnet sich über das federnde Luftvolumen und die Luftmasse im Rohr.

Die Bandbreite der Resonanzfrequenz ist relativ schmalbandig und lässt sich durch den Einsatz von porösen Materialien innerhalb des Hohlraumes vergrößern. Dadurch wird die Luftmasse im Hohlraum träger und die Federwirkung größer, allerdings nimmt mit der Vergrößerung der Bandbreite der Wirkungsgrad ab. Helmholtzresonatoren mit einer sehr tief liegenden Resonanzfrequenz werden als Bassfalle bezeichnet. Sie werden meist in Röhrenform realisiert.⁴⁵

44 F. Alten, Everest: Master Handbook of Acoustics, Fourth Edition, o. O.: McGraw Hill, 2001, S.226

45 Görne, Thomas: Tontechnik. - 1. Aufl. - München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006, S. 85

4.4.3 Geplante Absorption in Tonregie

Absorption im Raumkörper

Das ESS-Konzept verlangt einen absorbierend ausgeführten Raumkörper. Für wirklich effektive Absorptionsmaßnahmen stehen primär die Fläche der Rückwand, sowie die Deckenfläche zur Verfügung, sie lassen sich in großem Umfang zur Absorption im Höhen- und Mittenbereich nutzen. Dabei wird ein relativ großer Bereich der Rückwand abgedeckt. Unter der Decke entsteht ein Deckensegel. Die zur Absorption genutzten Flächen werden jeweils in drei Teile aufgeteilt. Optisch zieht sich diese Dreiteilung von der Rückwand über die Decke und setzt sich im Frontend mit einer optischen Dreiteilung fort, welche aus der Symetrie der beiden schrägen Wände sowie der Fensterfront resultiert. Diese Dreiteilung wird durch den Aufbau der Diffuser und die Anbringung der Bassabsorber unterstützt.



Abb 4.40 Anordnung der porösen Absorber im Raum

Absorber an Decke und Rückwand

Die Absorber an Decke und Rückwand sind breitbandig ausgelegt. Das verwendete poröse Material SSP-2 der Firma ISOVER® besitzt einen sehr guten Absorptionsgrad (siehe 4.5) welcher mit entsprechendem Abstand zur Wand in Richtung der tiefen Frequenzen verschoben wird.

Um dem Ziel der Modularität und Flexibilität gerecht zu werden, setzt sich die Gesamtabsorptionsfläche aus relativ kleinen und damit handlichen Flächen zusammen. An der Rückwand werden die Elemente in der Haupteinstrahlrichtung, also mittig auf der Wand, angebracht.

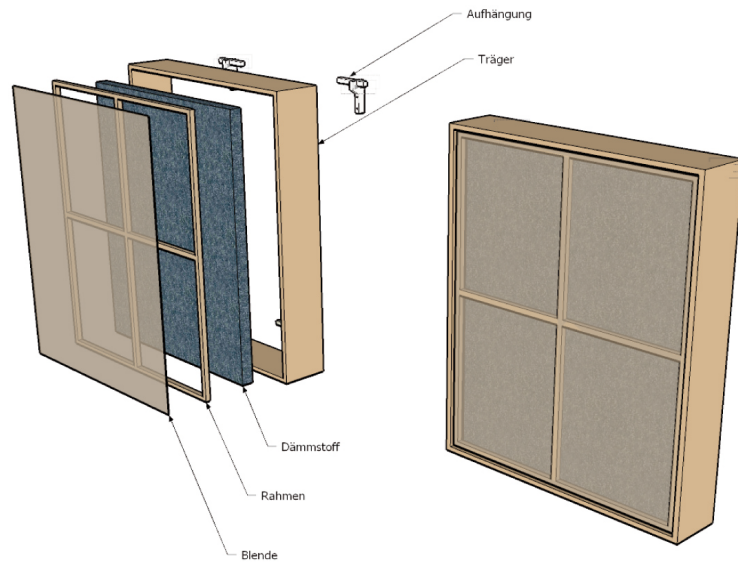


Abb 4.41 Aufbau Absorber Rückwand

Die Deckenelemente werden mit dem selben Wandabstand unter der Decke angebracht. Abhängig vom Einstrahlwinkel ergeben sich Laufstrecken unterschiedlicher Länge durch das Absorberelement und damit virtuell unterschiedliche Schichtdicken des Dämmmaterials. Die Wegstrecke für einen Einfall im rechten Winkel stellt die Variante für den kürzesten aller möglichen Wege durch den Absorber dar. So findet eine gleitende Verschiebung des Gebiets maximaler Schallschnelle durch verschiedene Frequenzbereiche, wodurch zusätzlich die Grenzfrequenz nach unten verschoben wird.

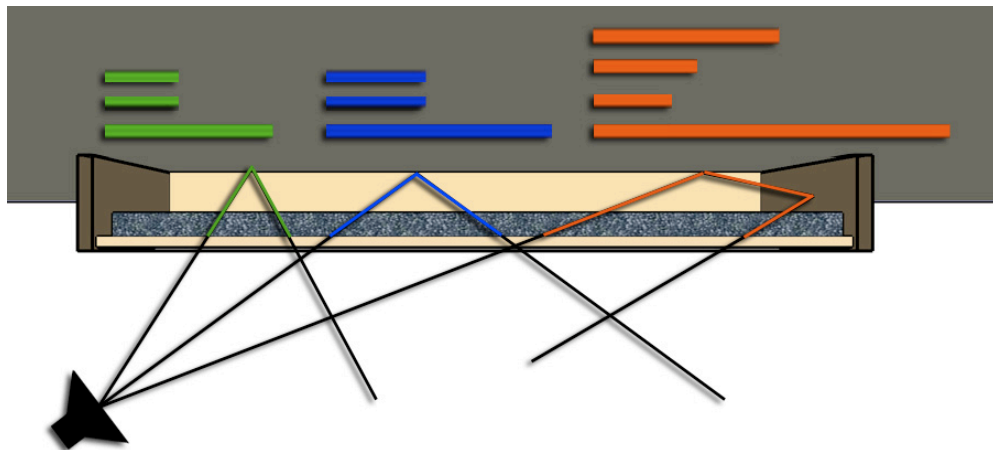


Abb 4.42 durch unterschiedliche Wegstrecken effektiv unterschiedliche Wandabstände

Kantenbeugungseffekt

Unter Kantenbeugung versteht man das Zustandekommen einer zusätzlichen Absorption durch Hineinbeugen von Schall in den Absorber an seinen Kanten. Die Größe dieser zusätzlichen Schallabsorption ist der freien Kantenlänge des Absorbers proportional. Das bedeutet, dass der Schallabsorptionsgrad eines Absorbers bei gleicher Gesamtfläche dann größer sein wird, wenn man ihn in viele Teilflächen zerlegt, da sich dabei die freie Kantenlänge vergrößert.

Durch die Aufteilung der Gesamtfläche in mehrere Teilflächen entstehen um die absorbierenden Flächen Kanten von mehreren Metern Länge, an denen durch die so genannte Kantenbeugung Schallenergie aus dem diffusen Schallfeld zum Absorber hin gebeugt wird. Damit kommt es zur Vergrößerung der wirksamen Absorptionsfläche. Die Wirkung des Kantenbeugungseffektes ist aber nicht nur abhängig von der Kantenlänge, sondern auch vom Abstand zwischen den absorbierenden Flächen zueinander. Eine Absorberkante zählt nur dann als frei, wenn ihr Abstand zur benachbarten Teilfläche oder zu einer Raumkante mindestens $0,75 \lambda$ beträgt.⁴⁶

Um den Effekt der Kantenbeugung zur Erhöhung der Schallabsorption bei tiefen Frequenzen zu nutzen, sind demnach erhebliche Abstände zwischen den Teilflächen einzuhalten. Bei 250 Hz beispielsweise beträgt der erforderliche Abstand bereits 1 m.⁴⁷

$$d_a \geq 0,75 \lambda \geq \frac{25500}{f} \quad \left[\begin{array}{l} d_a ; cm \\ f ; Hz \end{array} \right]$$

Abb 4.43 Verbesserung Wirkung poröser Absorber

Beispielhaft für die Rückseite der Regie ergibt sich durch den Absorberabstand von 18 cm eine Grenzfrequenz von $f = 1416$ Hz. Der Kantenbeugungseffekt stellt hier also einen Nebeneffekt dar, welcher für die Gestaltung der Studioakustik keine nennenswerten Vorteile bringt. Er wirkt sich nur auf hohe Frequenzen aus und besitzt unter Umständen sogar eine gegenteilige Wirkung, da zu der ohnehin schon sehr starken Absorption der Module im hohen Frequenzbereich eine noch größere Absorption im Bereich über 1400 Hz hinzukommt.

Andererseits stellt eine nicht volle Belegung einer Fläche, ein Mittel dar, um diffuse Reflexionen zu erzielen (siehe 4.3.1).

⁴⁶Fasold, Wolfgang; Winkler, Helgo: Bauphysikalische Entwurfslehre. -1. Aufl. - Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1976, S. 89

⁴⁷ Fasold, Wolfgang; Winkler, Helgo: Bauphysikalische Entwurfslehre. -1. Aufl. - Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1976, S. 89

Holzfußboden

Da das Absorptionsverhalten im kurzwelligen Bereich durch die porösen Materialien ohnehin sehr stark dominiert wird, ist die Verwendung von Teppichboden unangebracht. Die Wirkung von Teppichboden ist auf die sehr kurzwelligen Frequenzbereiche mit einem Absorptionsgrad von bis zu 0,5 von 1 kHz aufwärts beschränkt. Dies würde die wertvollen Höhenanteile nur zusätzlich schlucken. Ein Steinboden würde, durch starke hochfrequente Anteile im reflektierten Schall den Klang zu hart machen. Im Sinne der Linearität des Absorptionsverhaltens ist deshalb die Verwendung eines offenporigen, also unversiegelten Holzbodens die beste Wahl. Holz weist einen sehr viel geringeren Absorptionsgrad von lediglich $A = 0,1 - 0,2$ auf und wird allgemein mit einem warmen Klang assoziiert.⁴⁸



Abb 4.44 Vergleich CARA-Absorptionsgraphen Teppich und Parkett

Absorption im unteren Frequenzbereich

Plattenabsorber bedämpfen den tieffrequenten Bereich. Sie werden in Gebieten hohen Schalldrucks platziert. Abb 4.45 zeigt das in CARA simulierte ortsabhängige Schallfeld der Regie, in einer Höhe von 160 cm über dem Boden bei 100 Hz, 148 Hz, 117 Hz und 50 Hz. Deutlich zu sehen sind die Moden und deren ortsabhängigen Pegelschwankungen von bis zu 40 dB. Anhand der Schallfelddarstellung kann man sehen, dass im Bereich des Front Ends über alle tiefen Frequenzbereiche ein hoher Schalldruckpegel vorherrscht.

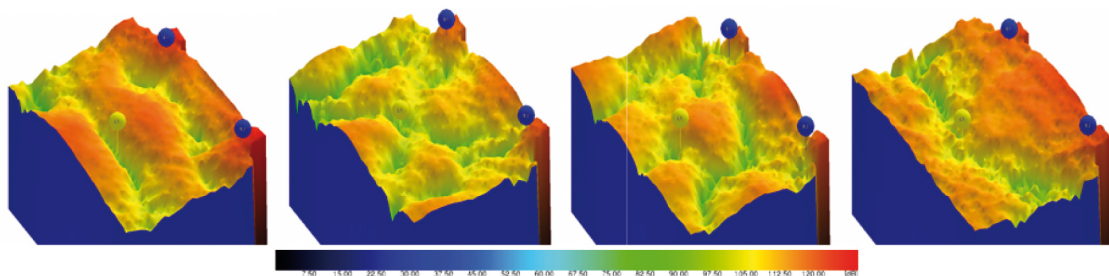


Abb 4.45 Raummodenlandschaft bei diversen Bassfrequenzen

48 Görne, Thomas: Tontechnik. - 1. Aufl. - München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006, S. 81

Deshalb erfolgt dort die Platzierung von Plattenschwingern unterhalb des Diffuserareals und unter dem Fenster.

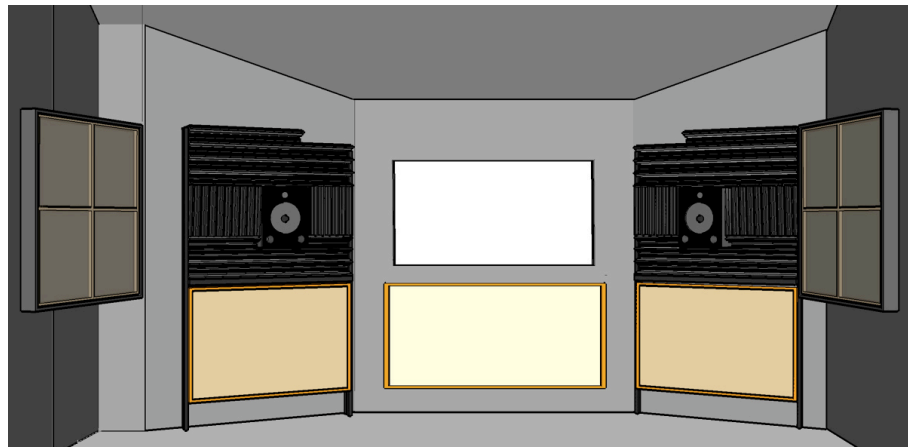


Abb 4.46 Anordnung der Plattenabsorber in der Regie

Die Regie bekommt eine Grundausstattung an Bassabsorbern mit der Option anhand der späteren Messungen Korrekturen vornehmen zu können. Gezielte Absorptionsmaßnahmen sollen über Bassfallen bzw. Helmholtzresonatoren realisiert werden. Hierfür könnten die Hohlräume hinter den schräg gestellten Wänden genutzt werden oder gezielt Bassabsorbermodule gebaut werden, was dem Anspruch des modularen flexiblen Aufbaus besser entspräche.

Zusammenspiel von Diffusion und Absorption in Tonregie

Um eine ausgeglichene akustische Hörraum- oder Aufnahmeraum-Nachbehandlung sicherzustellen, sollte die Diffusität immer mit Mitteln der Reflexion und gleichzeitig mit Absorption erreicht werden.

Bei der Schalllenkung und Diffusion geht es darum, die ersten Reflexionen zeitlich nach hinten zu verzögern und eine Anfangszeitlücke (Initial Time Delay Gap-ITDG) zu schaffen. Außerdem soll durch die künstlich erzeugte Diffusität das Diffusschallfeld überlagert werden. Die Absorber „saugen“ den Schall ab. Um ein ausgeglichenes Absorptionsverhalten zu erreichen erfolgt eine Dimensionierung der Absorptionsflächen durch rechentechnische Hilfsmittel. In diesem Fall mit der Raumakustikplanungssoftware CARA der Firma „ELAC Technische Software GmbH“.

4.5 Dimensionierung der Absorptionsflächen

4.5.1 geplante Raumakustik-Simulation mittels CARA

Erläuterung des Spiegelschallquellenverfahrens

Eine Spiegelschallquelle ist eine virtuelle Schallquelle, die den gleichen Schall abstrahlt wie die reale Schallquelle. Sie steht für die einzelne Reflexion eines Schallstrahls an einer Wand. Konstruiert wird eine Spiegelschallquelle durch eine lotrechte Spiegelung der realen Schallquelle an der Wand. Beide Schallquellen strahlen zum Zeitpunkt $t=0$ das gleiche Schallsignal ab.

Mehrfachspiegelungen lassen sich als Reflexionen höherer Ordnung abbilden. Zur Konstruktion der Spiegelschallquelle 2. Ordnung erfolgt eine Spiegelung Spiegelschallquelle 1. Ordnung, was der realen Spiegelung an einer weiteren Wand entspricht.⁴⁹

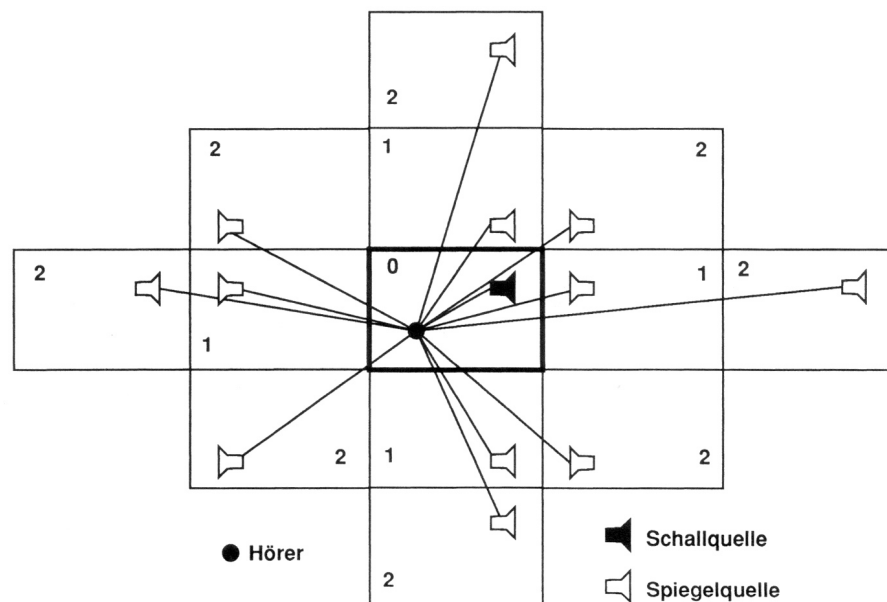


Abb 4.47 Spiegelschallquellen für Rechteckraum

Dieses Prinzip bildet die Grundlage für das Spiegelschallquellenverfahren als Grundlage für rechnergestützte Simulationen zur Schallausbreitung.

Durch eine Bewertung der Reflexionen hinsichtlich Intensität, Zeit und Einfallsrichtung und die Berücksichtigung der Schallabsorptionsgrade virtueller Raumboberflächen wird mit steigender Spiegelungsordnung eine immer genauere Darstellung der Raumimpulsantwort möglich. Die Zahl der Spiegelschallquellen steigt mit zunehmender Ordnung sehr stark an. Daher erfordern genaue Raumimpulsantworten einen erheblichen Rechenaufwand.

⁴⁹ Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1. Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S. 106

Einschränkungen des Spiegelschallquellenverfahrens:

Vernachlässigung der Wellennatur des Schalls: Das Spiegelschallquellenverfahren basiert auf einer geometrischen Betrachtung der Akustik und vernachlässigt die Wellennatur des Schalls. Damit werden sämtliche Beugungserscheinungen nicht erfasst und somit hat das Spiegelschallquellenverfahren auch keine allgemeine Gültigkeit in kleinen Räumen. In großen Räumen können Auralisationsverfahren fast über den gesamten Frequenzbereich akzeptable Ergebnisse liefern. Im Gegensatz dazu darf in kleinen Räumen der tief frequente Bereich des Spektrums nicht miteinbezogen werden. „Groß“ bzw. „klein“ bezieht sich hier jeweils auf die Wellenlänge λ .

Hoher Rechenaufwand: Eine hohe Spiegelungsordnung hat einen hohen Rechenaufwand zur Folge. Dieser kann im Bereich von mehreren Stunden bis zu vielen Tagen liegen.

Vereinfachung der Modelle: Bedingt durch den hohen Zeitaufwand bei Berechnung werden die Raummodelle oft vereinfacht, um die Anzahl der Raumpolygone zu verringern. Dieses führt zu Verfälschungen des Ergebnisses.

In der Summe der oben genannten Einschränkungen liegt der Grund warum mit CARA das diffuse „FrontEnd“ nicht simuliert werden kann. Durch die feingliedrige Struktur würden eine Unzahl von neuen, kleinsten Reflexionsflächen entstehen. Weiterhin sollte in der Auswertung der CARA-Ergebnisse der Bassbereich ausgespart bleiben.

CARA soll vor allem dazu dienen, das Absorptionverhalten des Raumes und damit die frequenzabhängige Nachhallzeit bei der Planung kontrollieren zu können. So wird das Verhalten auf einen fehlerfreien Zustand gebracht, welcher mit den Diffusionsmaßnahmen noch eine Verbesserung erfahren soll.

Anwendung des Spiegelschallquellenverfahrens durch CARA

CARA ermöglicht die Konstruktion eines nahezu beliebigen Raums und die Simulation dessen akustischen Absorptionsverhaltens. Die Realistische Modellierung gelingt durch Definition der Materialien der Oberflächen und deren Teilflächen.

CARA bietet eine Vielzahl raumakustischer Berechnungen, wie die Frequenzabhängigkeit des Schalldrucks an den verschiedenen Hörplätzen, erzeugt von einer oder mehreren Lautsprechern, wobei je nach Einstellung der Rechenparameter mehrere tausend an den Raumwänden gespiegelte Schallwellen berücksichtigt werden.

Aus dem Raumvolumen und dem Absorptionsverhalten der Oberflächen lässt sich mit Hilfe 'klassischer' Berechnungsmethoden die Nachhallzeit des Raumes bestimmen. Weitere Berechnungen ermitteln mit Hilfe des Echogramms die zeitliche Struktur des Schallfeldes am Hörplatz oder die Richtung der Schallausbreitung, um die Lokalisation einer Schallquelle zu beurteilen. Außerdem lässt sich das Schallfeld im gesamten Raum in seiner Frequenz- und Zeitabhängigkeit berechnen.

Die Darstellung des Schalldruck-Amplitudenfrequenzganges, des Ortungsdiagrammes, der Nachhallzeiten sowie des Echogrammes erfolgt in xy-Diagrammen. Für die Frequenz- und Zeitabhängigkeit des Schallfelds im Raum erfolgt die Darstellung in dreidimensionalen Diagrammen. Die bei den Berechnungen ermittelten raumakustischen Kennzahlen wie Nachhallzeit, Ortung und Sprachverständlichkeit werden auch tabellarisch aufgelistet.

Damit ist CARA ein wertvolles Werkzeug zur Akustiksimulation wobei die angewandte Methode des Spiegelschallquellenverfahrens die oben genannten Einschränkungen mit sich bringt.

4.5.2 Materialrecherche

Nach der Recherche zu frei verfügbaren und vor allem budgetfreundlichen Materialien fällt die Wahl zunächst auf die Akustik-Produkt-Linie von RIGIPS®. Diese Firma führt ein Sortiment von Akustikplatten aus Gipskarton für den Wand- und Deckenbereich und stellt in ihrem Katalog detaillierte Datensätze zu den frequenzabhängigen Schallabsorptionsgraden zur Verfügung. Diese Akustikplatten arbeiten als Loch- bzw. Schlitzplattenabsorber und bieten verschiedenste Lochdichteverteilungen.

Im Datenblatt liegen zu jeder Lochplattenausführung verschiedene Datensätze vor. Diese beziehen sich auf verschiedene Wandabstände und der Nutzung zusätzlicher Mineralfaser-Auflagen. Die Datensätze für Aufbauten mit Wandabstand von 20 cm und zusätzlicher Mineralwolleauflage besitzen den günstigsten Absorptionsgrad zu den tiefen Frequenzen hin.

Nach der Übertragung der Absorptionskurven in die CARA-Datenbank lässt sich leicht eine gute akustische Situation in der Simulation des Regieraumes erstellen.

Die Verwendung von festen Gipskartonaufbauten lässt sich nicht mit der Forderung nach einem offenem, modularen Aufbau des Akustik-Setups vereinbaren. Deshalb die Entscheidung für den Aufbau eigener Absorber-Elemente. Der Aufbau dieser Elemente gestaltet sich nach folgenden Fakten und Überlegungen.

Übernahme der ISOVER®-Absorptionskurven in den Materialeditor

Die Mineralfaserplatte SSP-2 (SSP = Schall-Schluck-Platte) von ISOVER® ist ein speziell auf den Einsatz zur Schalldämpfung ausgelegter Dämmstoff. In dieser Ausführung wird er bereits mit einem Faservlies zur Verhinderung des Austritts von Mineralfasern ausgeliefert. ISOVER® stellt in den Datenblättern zu seinen Schallschluckplatten Datensätze für den frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrad zur Verfügung. Leider bezieht sich das vorhandene Datenmaterial jedoch nur auf die direkte Verlegung auf der schallharten Wand. Trotzdem zeigt dieser Datensatz einen, über die gesamten Höhen- und Mittenbereiche sehr guten und hinab zu den unteren Mitten guten Schallabsorptionsgrad von 1 bzw. 100 %.

Bei 250 Hz besitzt das Material immerhin noch einen Absorptionsgrad von 60 % und im Bassbereich bei 125 Hz noch 26 %, bei direkter Verlegung auf der Wand.

Strömungswiderstand, AF	$\geq 11 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2$						
Schallschutz	Schallabsorptionsgrad α , SSP 2 direkt verlegt ¹⁾						
	Frequenz (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
	20 mm	0,10	0,26	0,53	0,71	0,84	0,96
	30 mm	0,12	0,29	0,61	0,87	0,97	1,03
	40 mm	0,22	0,47	0,83	1,02	1,00	1,00
	50 mm	0,26	0,60	0,95	1,07	1,01	1,04

Abb 4.48 ISOVER SSP2 Schallabsorptionsgrad frequenzspezifisch

Leider waren, auch nach direkter Anfrage beim Hersteller, keine Daten für andere Anwendungsmöglichkeiten, z.B. Verwendung mit 20 cm Wandabstand in Erfahrung zu bringen.

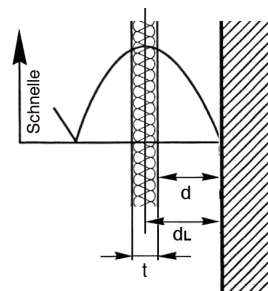
Aus der Literatur ist bekannt, dass sich der Schallabsorptionsgrad für poröse Dämmstoffe nach tiefen Frequenzen verbessern lässt, wenn er in gewissem Abstand zur schallharten Wand angebracht wird (siehe 4.4.2). Da für die Variante des etwas von der Wand abgesetzten Dämmmaterials keinen Eintrag im Datenblatt existiert, diese aber die Wirksamkeit des Materials beeinflusst, erfolgt der Eintrag hierfür über eine geschätzte Kennlinie. Dazu werden in der Literatur ähnliche Stoffe ausfindig gemacht (siehe Abb 4.48) und deren Absorptionverhalten analysiert. In der Tabelle kann abgelesen werden, wie sich ähnliche Stoffe verhalten. Der Stoff der ersten Spalte, „Mineralfaserplatte mit transparentem Faservlies“ entspricht vom Aufbau sowie vom Strömungswiderstand dem genutzten ISOVER® Material. Die Werte für die genutzte Schichtdicke vom 5 cm (blauer Marker) bei direkter Anwendung auf der Wandoberfläche stimmen mit den Angaben des ISOVER® Datenblattes überein. Leider ist für diesen Stoff kein Datensatz mit erhöhtem Wandabstand aufgeführt. Bei drei weiteren Datensätzen lässt sich jedoch sehr gut der zu erzielende Effekt ablesen. Gegenüber der direkten Verlegung mit 0 cm Wandabstand (gelber Marker) ergeben sich Verbesserungen bei den Varianten mit 5 cm bzw. 30 cm (orange Marker) Wandabstand.

Schallabsorber	Dicke t [mm]	Wand- abstand d_L [cm]	Oktavband-Mittenfrequenz f_m [Hz]					
			125	250	500	1 k	2 k	4 k
			Schallabsorptionsgrad α					
Mineralfaserplatte; Abdeckung: trans- parentes Faservlies $\rho \approx 30$ bis 50 kg/m^3 $r \approx 10 \text{ kPas/m}^2$	20	0	0,10	0,25	0,55	0,80	0,95	1,00
	30	0	0,15	0,30	0,60	0,90	1,00	1,00
	5	0	0,20	0,75	0,80	0,90	1,00	1,00
	40	0	0,25	0,45	0,80	0,95	1,00	1,00
	50	0	0,25	0,65	0,85	1,00	1,00	1,00
Mineralfaserplatte; ohne Abdeckung $\rho \approx 100$ bis 150 kg/m^3 $r \approx 40 \text{ kPas/m}^2$	15	0	0,05	0,10	0,35	0,65	0,90	1,00
	5	0	0,20	0,35	0,60	0,70	0,90	1,00
	30	0	0,40	0,65	0,70	0,75	0,90	1,00
	40	0	0,15	0,30	0,65	0,85	1,00	1,00
	5	0	0,25	0,65	0,80	0,85	1,00	1,00
	30	0	0,45	0,70	0,80	0,85	1,00	1,00
Glasfasermatte; ohne Abdeckung $\rho \approx 70 \text{ kg/m}^3$ $r \approx 10 \text{ kPas/m}^2$	40	0	0,30	0,50	0,70	0,90	0,95	1,00
	5	0	0,40	0,65	0,90	0,90	0,95	1,00
	30	0	0,70	0,85	0,90	0,90	0,95	1,00

Abb 4.49 Absorptionsgrade poröser Materialien - Ausschnitt

Anhand dieser Absorptionsgradkurven erfolgt die Schätzung einer Kurve, welche für die CARA-Simulation zugrunde gelegt wird.

Um die Frequenz für das Schnellmaximum bei dem gewünschten Wandabstand zu ermitteln erfolgt deren Berechnung gemäß:



$$d_L = \frac{\lambda}{4} = \frac{8500}{f} \text{ (cm)}$$

$$f = \frac{8500}{d_L} \text{ (Hz)}$$

Abb 4.50 Formel zur Verbesserung der Wirkung poröser Absorber bei Wandabstand

Dabei gilt für den Wandabstand „ d_L “, der Abstand zwischen Oberfläche und Mitte der Dämstoffdicke. Für den Wandabstand „ $d_L = 17,5 \text{ cm}$ “ (wie bei den Beispielen in der Tabelle) liegt das Schnellmaximum bei $f = 486 \text{ Hz}$, also knapp unter 500 Hz .

d (cm)	t (cm)	d_L (cm)	f (Hz)
0	4	2	4250
30	4	32	266
15	5	17,5	486

Abb 4.51 Berechnete Werte der Frequenzen im Schnellmaximum bei versch. Wandabständen

Der sehr hohe Absorptionsgrad der Glasfasermatte von 85 % bei 250 Hz und einem Wandabstand von 30 cm lässt sich damit erklären, dass sich in diesem Abstand das Schnelleximum für diesen Frequenzbereich befindet (siehe Abb 3.41). Im Rückschluss auf diesen Fakt lässt sich ein ein ähnlich starkes Absorptionsvermögen für SSP bei 500Hz annehmen.

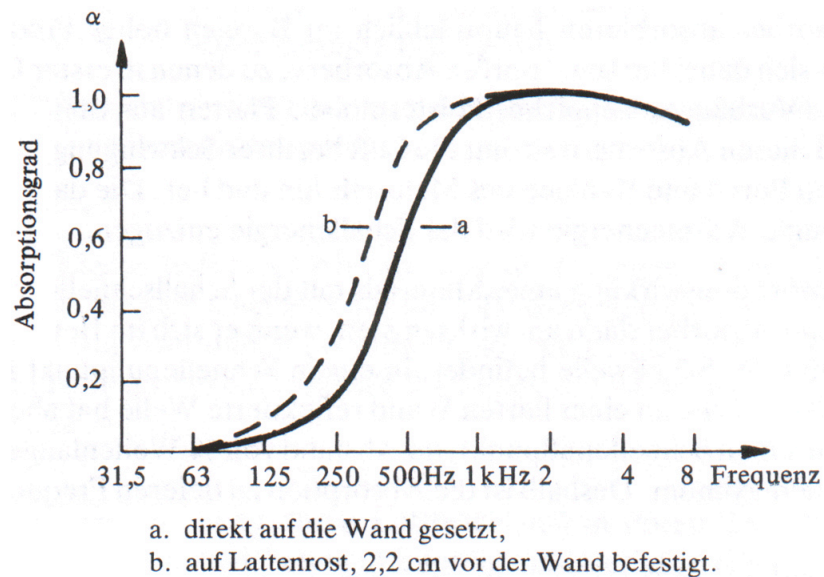


Abb 4.52 Verlauf des Absorptionsgrades von Akustikplatten

Verschiebt man aufgrund dieser Annahmen die ganze Kurve gemäß Abb 4.50 frequenzmässig nach unten, so dass der Abfall der Kurve ab der Grenzfrequenz 500 Hz einsetzt, ergibt sich diese Kurve (siehe Abb 4.51 - rote Kurve)

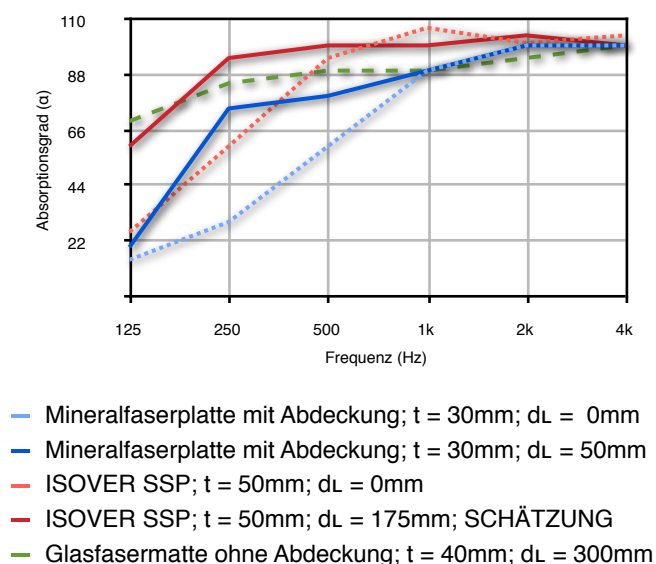


Abb 4.53 Übersicht über diverse Absorptionsgradkurven aus der Literatur & Schätzkurve

Daten-Editor für Diagramme							
	125	250	500	1k	2k	4k	
Mineralfaserplatte mit Abdeckung; t = 30mm; dL = 0mm	15	30	60	90	100	100	
Mineralfaserplatte mit Abdeckung; t = 30mm; dL = 50mm	20	75	80	90	100	100	
ISOVER SSP; t = 50mm; dL = 0mm	26	60	95	107	101	104	
ISOVER SSP; t = 50mm; dL = 175mm; SCHÄTZUNG	60	95	100	100	104	100	
Glasfasermatte ohne Abdeckung; t = 40mm; dL = 300mm	70	85	90	90	95	100	

Abb 4.54 Editor Daten diverser Absorptionsgradkurven aus der Literatur & Schätzkurve

Nach Übernahme der Absorptionsgradkurven der beiden ISOVER®-Kurven (Datenblatt - Kurve sowie Schätzkurve) in den CARA-Materialeeditor sind sie für die Simulation voll anwendbar.

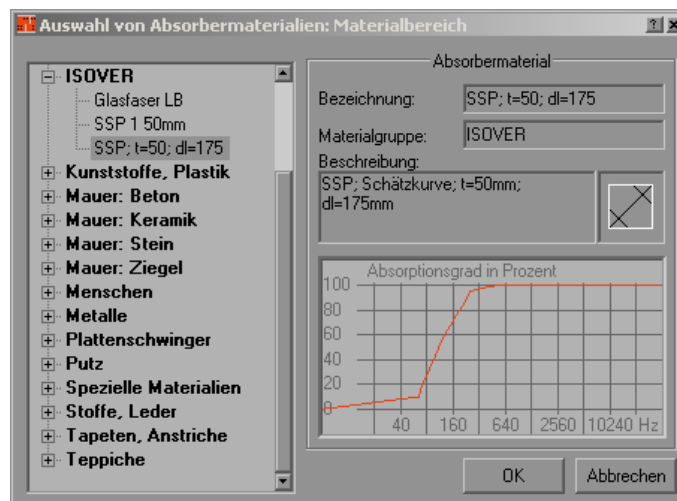


Abb 4.55 CARA Bildschirmfoto Materialeeditor_SSP2

Die Plattenschwinger zur Bassabsorption werden nach dem CARA-Vorschlag gebaut, deshalb wird auch die entsprechende Absorptionskurve herangezogen. Weiterhin haben auch die Materialbereiche der Trockenbauwände eine absorbierende Wirkung im Bassbereich.

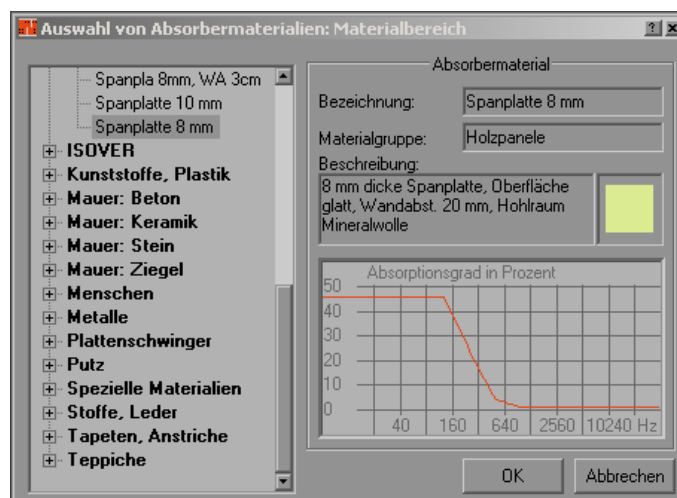


Abb 4.56 CARA Bildschirmfoto Materialeeditor_Plattenabsorber_Spanplatte 8 mm

Anordnung der Absorber in der Simulation

Die Anordnung der absorptiven Flächen in CARA erfolgt entsprechend der geplanten Strategie, d.h. ein stark absorbierender Raumkörper durch die Abdeckung der Rückwand, sowie der Decke. Die nötige Fläche des absorptiven Materials SSP2 ergibt sich durch die Dimensionierung mittels CARA. Weiterhin jeweils 1 m² große Abflektoflächen links und rechts auf Höhe der ersten Reflexionen zwischen Lautsprecher und Hörplatz. Bei den Abflectoren erfolgt die Verlegung des Dämmmaterials direkt auf der Oberfläche, somit ist die Kurve aus dem Datenblatt anwendbar (siehe Abb 3.38).

Zur Absorption im tiefen Bereich werden einfache Plattenresonatoren in Gebieten hohen Schalldrucks platziert.

Anhand der Schallfelddarstellung (siehe Abb 3.36) lässt sich erkennen, dass im Bereich des Front Ends über alle tiefen Frequenzbereiche ein hoher Schalldruckpegel vorherrscht. Deshalb erfolgt dort die Platzierung von Plattenschwingern unterhalb des Diffuserareals und unter dem Fenster. Die Plattenschwinger zur Bassabsorption werden nach dem CARA-Vorschlag gebaut, deshalb wird auch die entsprechende Absorptionskurve herangezogen (Abb 3.45).

Die absorptiv wirksamen Flächen (Materialbereiche) werden so lange dimensioniert bis die Nachhallzeit-Kurven ein bestmögliches Ergebnis zeigen.

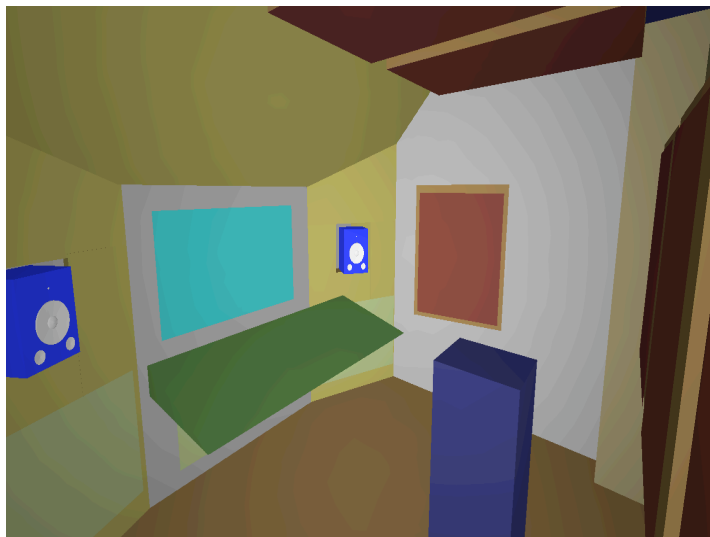


Abb 4.57 CARA Bildschirmfoto; 3D Darstellung des Raumes

4.5.3 Ergebnisse der CARA-Simulation

Die Ergebnisse der CARA Berechnungen lassen sich in drei Ergebniskomplexe einteilen.

- die Berechnung der Nachhallzeiten aus dem Raumvolumen und den Materialoberflächen der Raumwände mit ihren jeweiligen Schallabsorptionsgraden
- die CARA Standardberechnungen
- die Berechnungen zur Auralisation

Kurzerläuterung Nachhallzeit (klassisch)

CARA berechnet die Nachhallzeiten über klassische Rechenformeln. Diese Berechnungen stehen im Raumkonstruktionsmodul zur Verfügung und sind ohne große Rechenzeiten abrufbar. Die Frequenzabhängigkeit der berechneten Nachhallzeiten wird in Abb 3.47 dargestellt.

Ergebnis der Nachhallzeit (klassisch)

Auf den ersten Blick ist ablesbar, dass die simulierte Nachhallzeit über den gesamten Frequenzbereich im CARA-Idealbereich liegt. Über die Frequenz aufsteigend liegt die frequenzabhängige Nachhallzeit zwischen 20 Hz und 80 Hz bei 0,5 s - 0,6 s. Im Bereich zwischen 100 Hz und 2000 Hz beträgt die Nachhallzeit 0,3 s - 0,4 s. Über 2000 Hz existiert eine geringfügige Verkürzung der Nachhallzeit auf im Mittel 0,25 s.

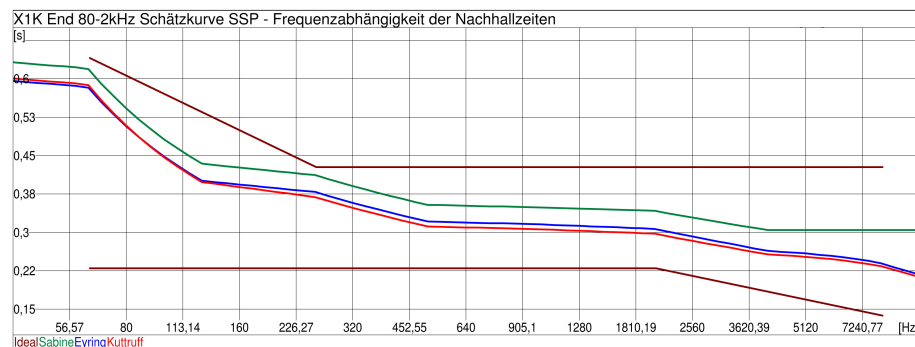


Abb 4.58 Nachhallzeiten über die Frequenz der Regie von 80 Hz - 2 kHz nach Klassischer Berechnung

Kurzerläuterung Frühe Nachhallzeit (aus Echogramm)

Die frühe Nachhallzeit (Early Decay Time) ergibt kürzere Nachhallzeiten, als die Auswertung nach Norm, bei der im Bereich zwischen -5 und -35 dB ausgewertet wird. Der Effekt tritt vor allem bei tiefen Frequenzen auf.⁵⁰

Während die klassisch berechneten Nachhallzeiten vor allem für Rechteckräume recht gut stimmen, ist die Bestimmung der frühen Nachhallzeit (CARA-T10) aus dem Echogramm unabhängig von der Raumform. Die Genauigkeit dieser Berechnungsmethode hängt stark von der Anzahl der berücksichtigten Schallreflexionen ab, welche durch den Rechenparameter „Maximale Spiegelungsordnung“ bestimmt wird. Besonders bei tieferen Frequenzen, wäre eine sehr hohe max. Spiegelungsordnung erforderlich, was in der Regel zu unrealistischen Rechenzeiten führt.

Jedoch:

Die simulierte frühe Nachhallzeit CARA T-10 stellt die speziell am Abhörpunkt herrschende Nachhallzeit dar, denn sie ist direkt aus dem am Hörplatz simulierten ermitteltem Echogramm abgeleitet. Das macht diesen Wert interessant, denn der ganze Raum ist auf diesen Hörplatz ausgerichtet. Speziell zur Bestimmung der Frequenzabhängigkeit der aus dem Echogramm bestimmten frühen Nachhallzeit T10 werden Programmintern über das gesamte Frequenzspektrum ca. 40 Echogramme berechnet, wobei jedes nur einen bestimmten Frequenzbereich berücksichtigt. Die Frequenzabhängigkeit der auf diese Weise bestimmten Nachhallzeiten T10 ist in Abb 4.57 abzulesen (CARA-T10 - pink).

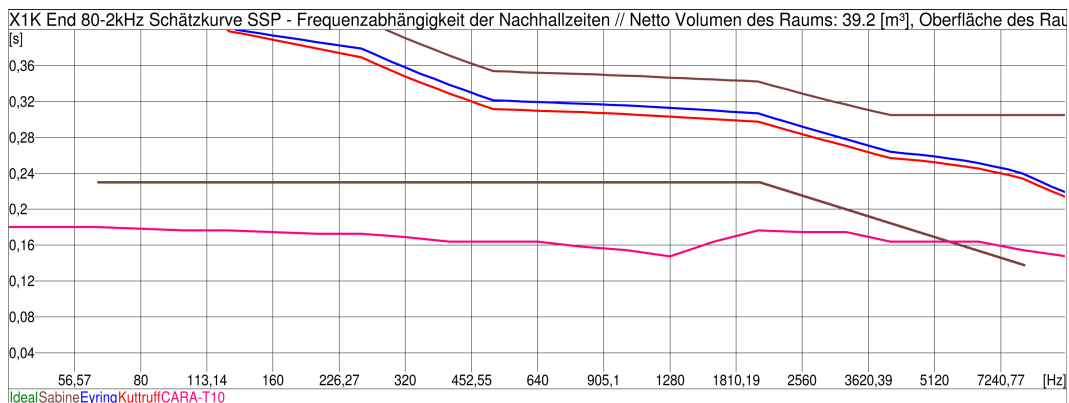


Abb 4.59 CARA T-10 der Regie von 80 Hz - 2 kHz

Ergebnis der frühen Nachhallzeit aus Echogramm

CARA T-10 zeigt nach Berechnung mit einer Maximalen Spiegelungsordnung 6, drastische Abweichungen zu den Werten der klassischen Berechnungen.

Die Nachhallzeit liegt über den gesamten Frequenzbereich, nahezu linear, im Bereich von 0,15 s - 0,18 s.

Raumimpulsantwort, Echogramm und Integral Echogramm

Zur Untersuchung des zeitlichen Verhaltens des Schallfeldes im Raum wird das am Hörplatz zeitlich aufeinander folgende Eintreffen eines vom Lautsprecher ausgesandten Dirac-Impulses und seiner an den Raumwänden auftretenden Reflexionen betrachtet. Durch das Auftragen aller eintreffenden Schalldruckimpulse in einem Zeitdiagramm erhält man die Raumimpulsantwort und mit ihr die Grundlage für weitere Berechnungen.

Da man in der Impulsantwort die Schalldrücke über die Zeit, jedoch nicht die Pegel der Reflexionen ablesen kann, wird die Impulsantwort quadriert und logarithmiert. Durch Quadrieren der Raumimpulsantwort erhält man ein Maß für die Schallenergiedichte als Funktion der Zeit, das hierdurch erhaltene Zeitdiagramm wird Echogramm genannt. Es ist die Darstellung der quadrierten und logarithmierten Impulsantwort (Log Squared Impulse Response). Die hier „Echogramm“ genannte Darstellung wird in der genutzten Messsoftware „Fuzzmeasure Pro“ als „Log Squared Impulse Response“ anderweitig auch als (Energy-Time-Curve - ETC) bezeichnet. In dieser Darstellung lassen sich Reflexionsmuster wie frühe Reflexionen (EDT), Flatterechos und Nachhall sehr gut analysieren.⁵¹

Die Darstellung „Integral Echogramm“ ist prinzipiell eine durch die Integration geglättete Kurve des Echogramms und wird in der Messsoftware „Fuzzmeasure Pro“ als „Energy Decay Curve“ sowie anderweitig auch als Schroederplot bezeichnet.

- Energy Time Curve (ETC) -- Log Squared Impulse Response -- Echogramm
- Energy Decay Curve (EDC) -- SchroederPlot -- Integral Echogramm

⁵¹ Frieseke, Andreas: Studio Akustik. - 1. Aufl. - Bergkirchen: PPVMEIDIEN, 2006, S.134

Echogrammvarianten in CARA

In CARA werden zwei Varianten des Echogramms berechnet. Der Unterschied liegt in den Berechnungsparametern. Das Echogramm des Auralisationsmodus⁵² wird im Vergleich zum Echogramm der Spezialberechnungen mit einer wesentlich höheren Frequenz- und Zeitauflösung durchgeführt. Während üblicherweise die Frequenzauflösung bei $\frac{1}{3}$ Terz liegt, wird für eine Auralisation mit einer konstanten Frequenzauflösung von 0,1 ... 2,5 Hz gerechnet. Hieraus ergeben sich bis zu 500.000 Frequenzpunkte, während sonst mit 118 Frequenzen gerechnet wird. Außerdem werden bei den Berechnungen des Echogramms zur Auralisation die Schallfelddaten des simulierten Hörplatzes genutzt.

Bei den Spezialberechnungen werden für die Bestimmung des Echogramms die am Hörplatz eintreffenden Diracimpulse als „ideal“, also mit unendlich steiler Flanke angenommen. Real wird ein solcher Nadelimpuls schon bei der Übertragung durch einen Lautsprecher verformt, was durch die Masseträgheit des Systems „Lautsprecher“ sowie den begrenzten Übertragungsbereich bedingt ist. Die verformten Nadelimpulse zeigen ein deutliches Ausschwingen mit positiven und negativen Amplituden über einen Zeitraum von einigen Millisekunden. Diese „Systemfehler“ fließen im Auralisationsmodus in den Berechnungen mit ein.⁵²

Das unten stehende Diagramm zeigt beide Echogrammvarianten. Die Kurven entstammen der Simulation des Regie-Raumes. Man erkennt beim oberen Echogramm die sehr hohe Zeitauflösung des Auralisationsmodus⁵², insbesondere aus dem Vergleich mit dem Echogramm, das mit einer der CARA-Standardberechnungen bestimmt wurde. Die wesentlichen Merkmale der Kurven stimmen jedoch sehr gut überein.

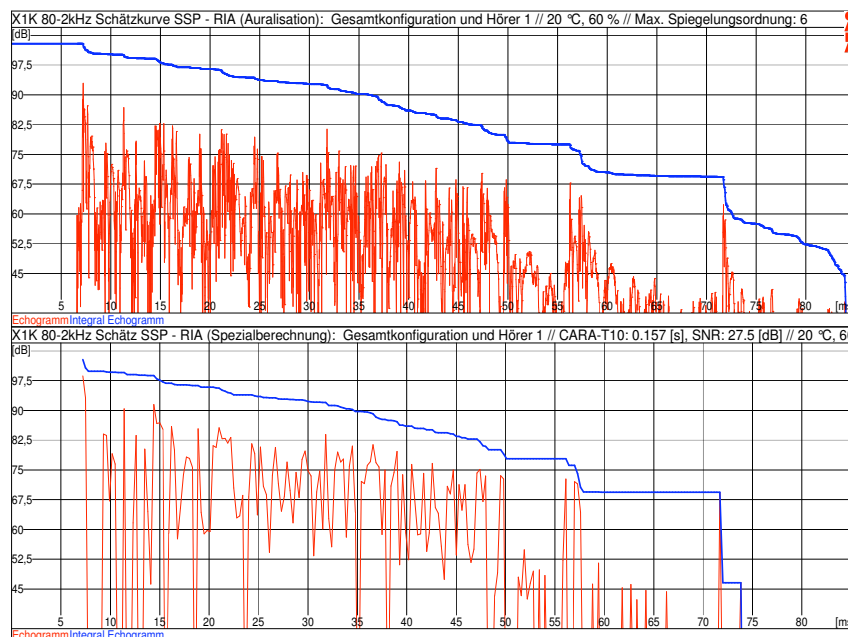


Abb 4.60 Grafischer Vergleich der RIA aus Auralisation und Spezialberechnung in CARA

⁵² CARA Manual (integrierte Hilfedatei der Software)

Ergebnis Raumimpulsantwort / Echogramm

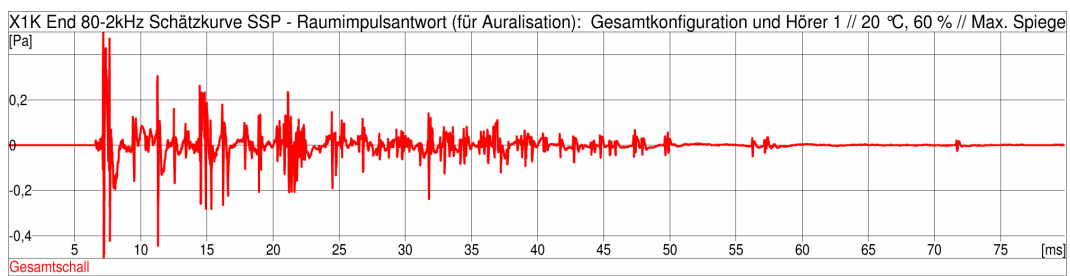


Abb 4.61 Raumimpulsantwort aus der Auralisationsberechnung Regie 80 Hz - 2 kHz

Bei Betrachtung der Raumimpulsantwort fällt nach dem ersten Schalldruckimpuls bei 7,5 ms ein weiterer starker Impuls bei 11 ms auf. Ein solch starker Druckimpuls sollte den Überlegungen nach nicht auftreten, da zum Zweck der Vergrößerung des ITDG alle Flächen, welche frühe Reflexionen bezüglich des Hörplatzes verursachen könnten, mit absorptivem Material abgedeckt oder schallleitend ausgelegt sind. Anhand einer Schallfeldberechnung lässt sich der zeitliche Ablauf der Schallausbreitung nachvollziehen.

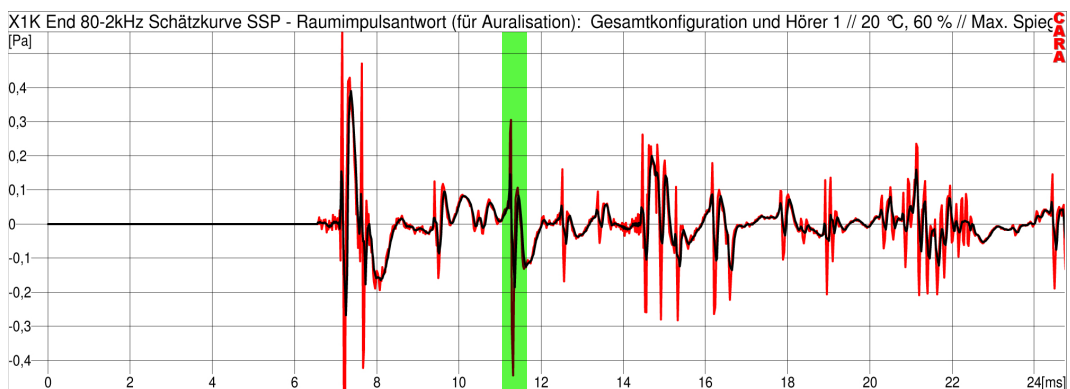


Abb 4.62 Raumimpulsantwort aus der Auralisationsberechnung Regie 80 Hz - 2 kHz_Ausschnitt 0-24 ms

Beim Vergleich der Raumimpulsantwort mit der Schallfelddarstellung lässt sich die erste Wellenfront erkennen (Ausschnitt 1 rot markiert), welche nach $T=7,5$ ms am Hörplatz (gelbe Stecknadel) eintrifft. Diese Wellenfront ist es auch, die bei $T=8,4$ ms am jeweils gegenüberliegenden Lautsprecher eine kuriose Reflexion erzeugt (Ausschnitt 2), welche bei $T=11,1$ ms den besagten Schalldruckpeak erzeugt (Ausschnitt 3). Diese starke Reflexion an einem Lautsprecher, der zur Hälfte in der Wand eingelassen ist und so eine effektive reflektierende Oberfläche von gerade einmal 20 cm x 35 cm (die Lautsprecheroberfläche) bietet, erscheint doch etwas unrealistisch. Deshalb liegt der Schluss nah, dass es sich hierbei um einen zu vernachlässigenden Simulationsfehler (Programmierfehler) handelt.

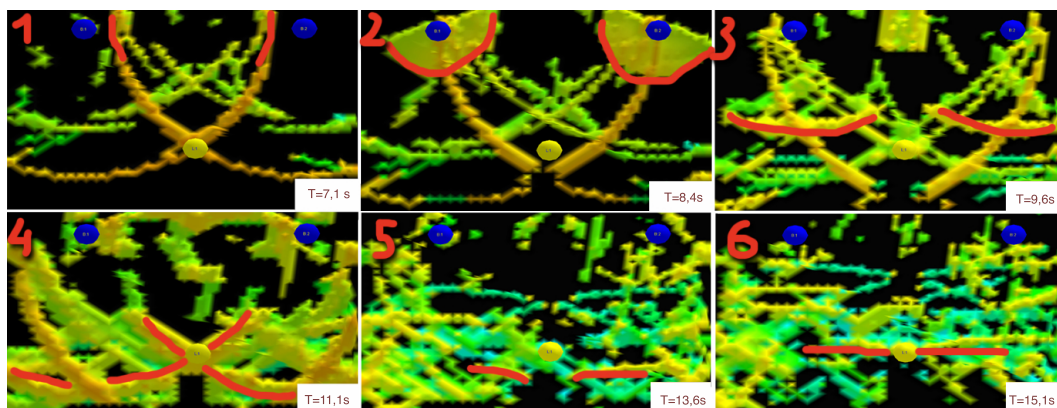


Abb 4.63 Schallfelddarstellung Zeitverlauf Regie 80 Hz - 2 kHz

Auch der Ausschlag bei 15 ms ist eine Folge der Reflexion an den Lautsprecher-Chassis. Zu diesem Zeitpunkt handelt es sich allerdings um den Rückwurf der Rückwand (Ausschnitt 5+6). Die Ausschläge bei 9 ms sind den Reflexionen der Seitenwände zuzuordnen (Ausschnitt 3).

Zur weiteren Betrachtung wird das Echogramm herangezogen. Dabei ist eine Vergrößerung des Echogramms angebracht, welche einen von 100 dB ausgehenden Pegelabfall von 60 dB überstreicht. Weiterhin wurde eine geringe Glättung der Kurve vorgenommen um eine reellere Sicht auf den Graph zu bekommen (schwarzer Graph).

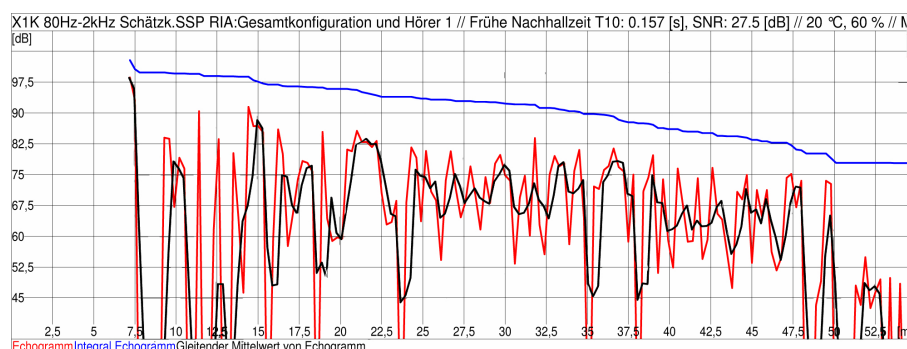


Abb 4.64 Echogramm aus der Auralisationsberechnung Regie 80 Hz - 2 kHz

Bei Berücksichtigung der Peaks bei 11 ms und 15 ms lässt sich über diese Drücke sagen, dass sie trotz allem mit ca. 83 dB bzw. 90 dB zwischen 10 dB und 17 dB unter dem Pegel des Direktsignals liegen, in der geglätteten Kurve liegen die Werte etwas darunter.

Ignoriert man die Peaks bei 11 ms sowie 15 ms liegen die ersten Reflexionen zwischen 9 ms bis 10 ms und haben einen Pegel, welcher bei etwa 80 dB und damit 20 dB unter dem Direktsignal liegt, wird die geglättete Kurve ausgewertet, liegen diese Reflexionen bei ca. 50 dB unter dem Pegel des Direktsignals. Bei Nichtbeachtung der Werte bei 11 ms und 15 ms besitzt der Zeitverlauf ein mustergültiges ITDG.

5 Fotodokumentation und Designstudien

Zur akustischen also technischen, kommt die ästhetische und in diesem Sinne gestalterische Ebene. Im Gestaltungskonzept fließen Ansprüche, Notwendigkeiten und Wünsche zu einer Designidee zusammen, welche mehrmalige Verfeinerungen erfahren hat.

An erster Stelle stehen Funktionalität und Modularität, was in einer Kleinteiligkeit der Komponenten mündet, gefolgt vom Wunsch die einzelnen Elemente optisch zusammenzufassen.

Der Raum selbst hat eine optisch auf das Frontend, speziell auf die Fensterfläche fokussierte Gestaltung. Die Fensterfläche und die auf sie zulaufenden schrägen Wand- und Deckenflächen erzeugen einen Kanzeleffekt. Durch die schallführenden, schräg gestellten Seitenflächen ergibt sich in der vertikalen Ebene eine optische Dreiteilung, welche konsequent über die Deckenfläche und die Rückwandfläche fortgeführt wird. Die Gesamtabsorptionsfläche wird in jeweils drei handliche Flächenelemente aufgeteilt, welche sich wie drei Streifen über Decke und Rückwand ziehen.

In der horizontalen Ebene wird der Kanzeleffekt durch die Anordnung der Elemente unterstützt. Von der Fensteroberkante ausgehend, wird durch die Gestaltung der Diffuser-Blöcke eine aufsteigende Verbindung zu den Seitenelementen geschaffen, welche sich zu den Elementen der Rückwand fortsetzt. Auf diese Weise ergibt sich eine, von der Front- zur Rückwand hin ansteigende, umlaufende Linie. Die Fensterunterkante definiert die untere Begrenzung sämtlicher Elemente (mit Ausnahme der Bassabsorber), und damit eine weitere umlaufende optische Achse. Unter dieser Achse befinden sich nur die Bassabsorber im Frontend. Diese sind ebenfalls in der oben genannten Dreiteilung angeordnet. Die seitlichen Bassabsorberelemente sind direkt in die Diffuserträger aus Stahl integriert, der Dritte sitzt direkt unter dem Fenster.

Durch die sichtbare Nutzung der MDF-eigenen Farbe und Oberflächenbeschaffenheit entsteht ein Eindruck von Wärme und Weichheit. Dieser Eindruck wird durch die Absorber-Sichtblenden unterstützt, welche sich farblich an den Birkensperrholzplatten der Bassabsorber orientieren. Der Raum selbst besitzt eine unaufdringliche, auf die Materialeigenschaften der Einbauten abgestimmte Farbe.

Dieser Weichheit entgegen wirken die harten Ecken und Kanten der Elemente, welche im Zusammenspiel mit der Diffuser-Struktur eine sehr technische Wirkung erzeugen. Dieser technische Eindruck wird noch verstärkt durch den Einsatz von Schattenkanten und Schattenfugen von 2 cm Stärke, welche der optischen Verschleierung von Toleranzen bei der Maßhaltigkeit dienen, und an sämtlichen Bauteilen auftauchen.

Das Akustik-Kit ergibt im Zusammenspiel mit den Studiomöbeln, dem Boden, der Farbgebung der Wände und die Lichtsituation ein optisch ansprechendes Gesamtbild.



Abb 5.1 Regie _ erste Stellproben



Abb 5.2 Regie _ Bestückung



Abb 5.3 Regie Endzustand

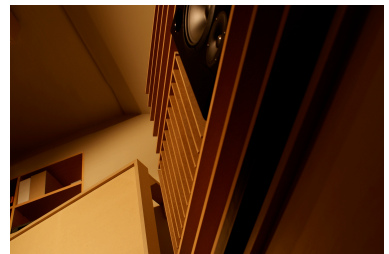
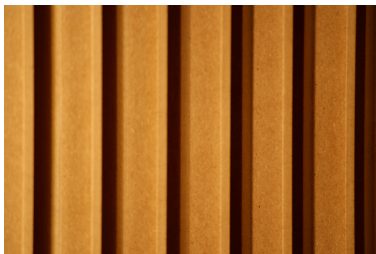
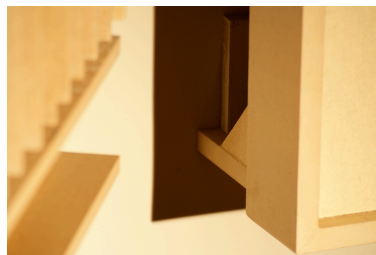
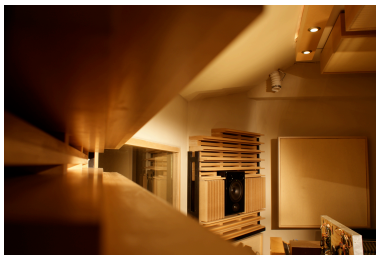
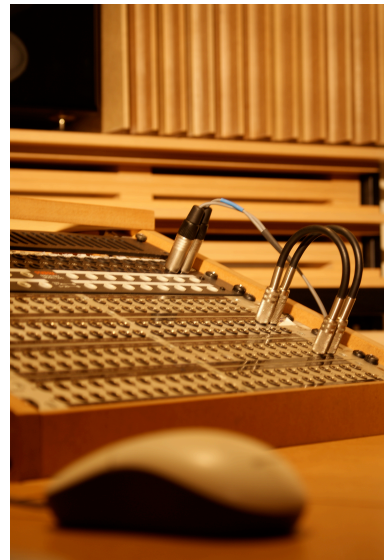


Abb 5.4 Design Studien 01

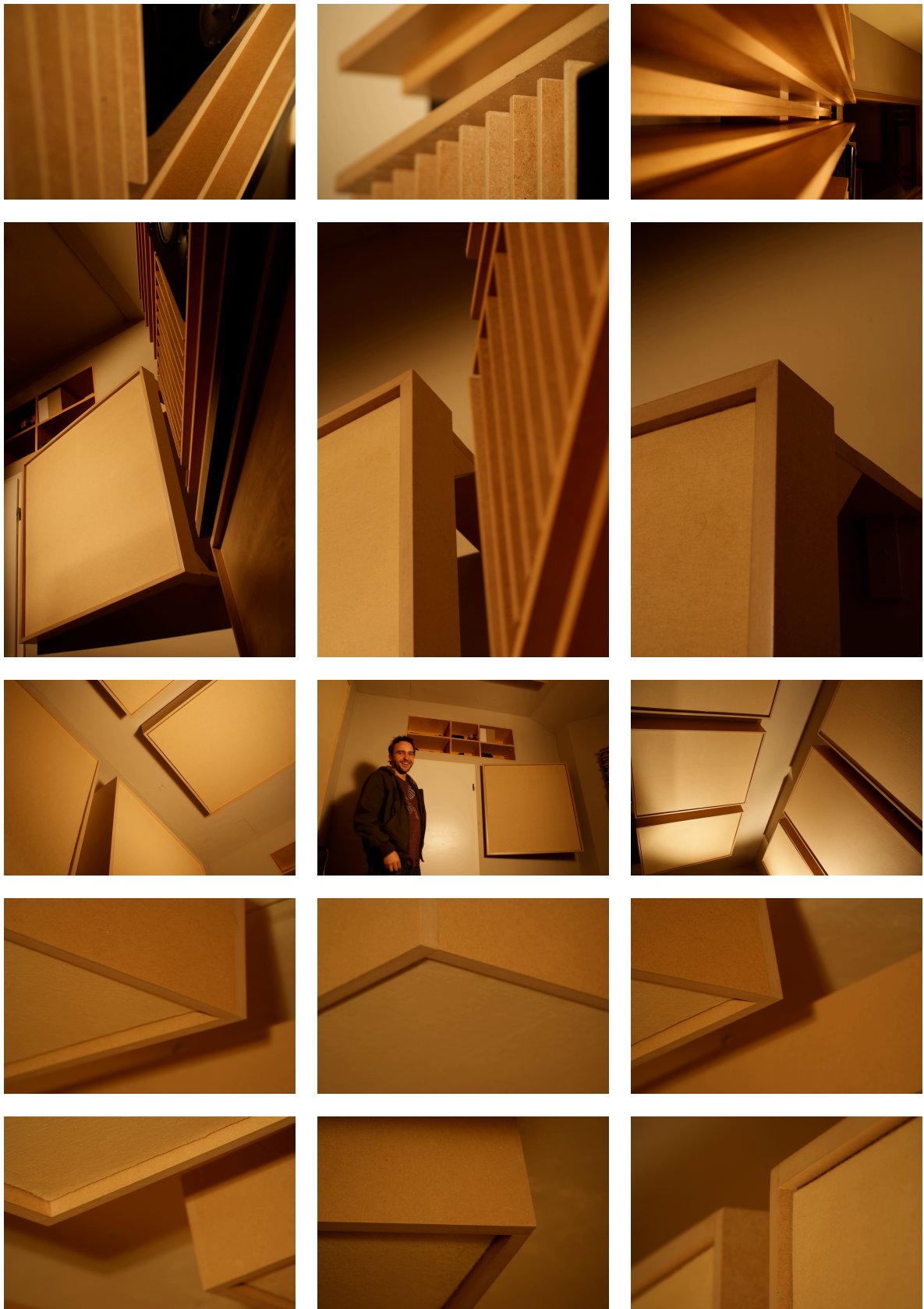


Abb 5.5 Design Studien 02

6 Messung der raumakustischen Kriterien

6.1 Messtechnik zur Raumakustik

In diesem Abschnitt geht es neben der technischen Ausführung der raumakustischen Messungen auch um die Bedeutung der einzelnen Messungen und was sich an deren Kurven ablesen lässt. Neben der Messung der Nachhallzeit besteht die Möglichkeit, Reflexionsmuster darstellen zu lassen. So lässt sich beurteilen, ob eine reflexionsfreie Zone mit ausreichend großem ITDG geschaffen wurde. Neben ihrer eigentlichen Funktion sind alle Raumakustikmesssysteme auch in der Lage, die Frequenzgänge der Monitor-Lautsprecher zu messen.

Was wird gemessen?

Normgemäß (DIN 52 216) werden Nachhallzeiten in dem Frequenzbereich von 125 Hz bis 4 kHz in Terzabständen, d.h. $\frac{1}{3}$ Oktavabständen bestimmt. Bei Rundfunkanstalten wird die Kontrolle der Nachhallzeiten in Studios und den für die Tonproduktion wichtigen Räumen auf den Bereich von 50 Hz bis 10 kHz ausgedehnt.⁵³ Neben der Nachhallzeit sind die weiteren Kriterien solche Energiemaße, die durch Integration der Raumimpulsantwort in bestimmten Zeitgrenzen gewonnen werden.⁵⁴

Womit wird gemessen?

- Messmikrofon „Behringer ECM-8000“

Das „BEHRINGER ECM8000“ ist ein ultra-lineares, omnidirektionales Meß-Mikrofon, welches die Möglichkeit gibt, selbst schwierigste Einmessungen vorzunehmen. Durch den ultra-linearen Frequenzgang des Mikrofons ist keine Vorkalibrierung am Messwerkzeug nötig.

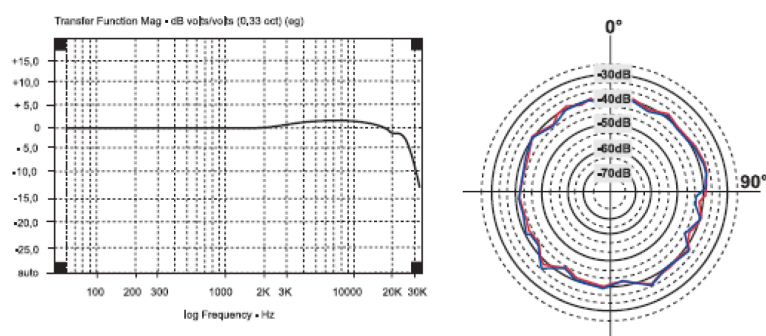


Abb 6.1 Frequenzgang und Polardiagramm der Richtcharakteristik des ECM-8000

⁵³ Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudientechnik (Band 1). - 6. Aufl. - München: K.G.Saur Verlag KG, 1997, S. 32

⁵⁴ Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1. Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.154

- Audiomessprogramm „FuzzMeasure Pro 3.0“

Die Software „FuzzMeasure Pro 3“ der Firma „Supermegaultragroovy“ ist ein umfangreiches Analysetool für den Mac sowohl für den Hausgebrauch im Recordingbereich, als auch für das Ausmessen und tontechnische Analysieren von Studios, Bühnen und Boxensetups. FuzzMeasure Pro 3 baut dabei dezidiert auf die Grafikfähigkeiten von Apples OSX Leopard auf.

Fuzzmeasure Pro arbeitet mit der TLS-Methode / Sinus-Sweep-Methode (siehe 6.2.1).

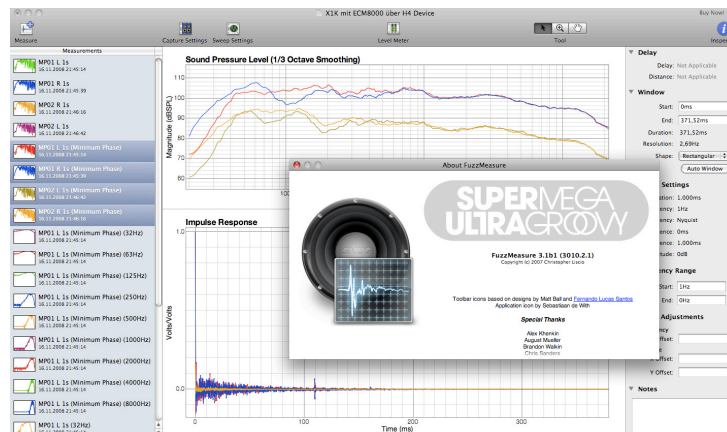


Abb 6.2 Bildschirmfoto FuzzmeasurePro 3

Wo wird gemessen?

Da es gilt die Situation am Abhörplatz zu vermessen, werden alle Arten der Messung natürlich dort vorgenommen. Das zur Messung verwendete Mikrofon mit kugelförmiger Charakteristik (hier Behringer ECM-8000), ist für die Messungen nacheinander an verschiedenen relevanten Positionen in Ohrhöhe aufzustellen, da sich an unterschiedliche Raumpositionen, je nach Eigenmodenverteilung des Raumes, verschiedene Nachhallzeiten ergeben. Man kann sich bei der Auswahl der Messpositionen auch auf die Abhörposition in der Regie konzentrieren und in deren Umfeld messen, dabei ist die direkte Nähe von reflektierenden Flächen zu meiden. In kleinen Räumen, wie der Regie, sind mindestens vier Mikrofonstellungen um den idealen Abhörpunkt bei zwei verschiedenen Schallquellen üblich.⁵⁵ Die Messpunkte werden am Boden markiert und bezeichnet.

Die vorliegenden Messkurven werden gemittelt. Aufgrund der großen Dynamik von 60 dB wird in der Praxis der RT30 oder RT20 Wert von Räumen gemessen und verdoppelt bzw. verdreifacht um RT60 zu erhalten. Dies ist problemlos möglich. Denn die Nachhallzeit verhält sich linear, da der Absorptionsgrad eines Raumes konstant ist.

⁵⁵ Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1. Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.154

6.2 Raumakustische Messungen mit Fuzzmeasure Pro 3

6.2.1 Nachhallzeitmessung über Sweeps

Eine Möglichkeit für ein Anregungssignal ist der Sinussweep, ein sinusförmiger Gleitton mit Rosa verteiltem Spektrum, dessen Frequenz sich exponentiell über die Zeit steigert.

Der Nachhall für jede spezifische Frequenz beginnt nach der Anregung durch den Sweep. Das System zeichnet das durch das System Lautsprecher-Raum mehr oder weniger verzerrte Messsignal wieder auf und errechnet die Entfernung zur Schallquelle über Subtraktion der Laufzeit des Impulses vom Lautsprecher bis zum Messmikrofon unter Einbeziehung der Delayzeit der Soundkarte (Loopback).⁵⁶ Die resultierende Antwort des Systems wird einer FFT unterworfen.

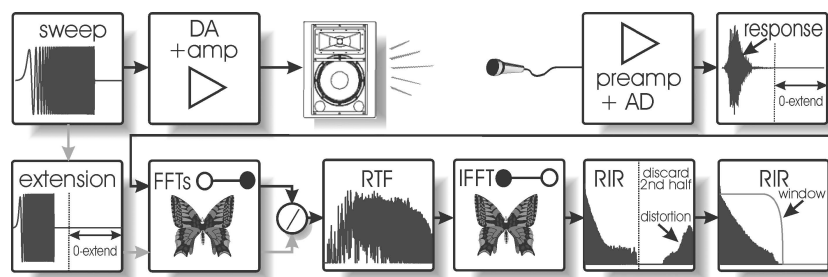


Abb 6.3 Schematische Darstellung der Swept-Sine-Methode

Die über das „System Raum“ aufgenommene Antwort wird mit der, per Loopback gewonnenen „System-Soundkarte-Verstärker“, Aufnahme verglichen. Diese so kompensierten Daten werden mit einer inversen FFT wieder in den Zeitbereich rücktransformiert und stellen die Impulsantwort des „Systems Raum“ dar.



Abb 6.4 Loopback Verkabelung

Durch die Nutzung des Loopback-Systems lassen sich absolute Laufzeitmessungen erstellen⁵⁷.

⁵⁶ Frieseke, Andreas: Studio Akustik. -1. Aufl. - Bergkirchen: PPVMEDIEN , 2006, S.131

⁵⁷ Müller, Swen; Masserani, Paulo: Transfer-Function Measurement with Sweeps . URL: < http://www.anselmgoertz.de/Page10383/Monkey_Forest_dt/Manual_dt/aes-swp-english.PDF >, 15.11.2008:

6.2.2 Kurzerläuterung messtechnische Kenngrößen

Die Halligkeit des Raumes ist die primäre akustische Eigenschaft, welche sich durch die Dauer des Nachhalls, also das Abklingen eines Schallereignisses nach Beenden der Schallabstrahlung, ausdrückt. Das darauf basierende Kriterium Nachhallzeit stellt das älteste und wichtigste Güte Merkmal eines Raumes dar.

Das dieses Kriterium nicht das einzige sein kann, wird deutlich wenn man sich klarmacht, dass die Nachhallzeit eines Raumes an jedem Punkt gleich ist, der Raum an verschiedenen Punkten jedoch verschieden klingt.

Um einen Raum zu analysieren, lassen sich noch andere akustische Kenngrößen berechnen. Die Energiekriterien lassen sich als Verhältnisse zeitlicher und bei Musik auch räumlicher Verteilungen der am Hörort eintreffender Schallenergien darstellen. Besonders große Bedeutung kommt dabei dem Energieanteil der Anfangsreflexionen (early Reflections) zu, welche dem Direktschall in kurzem Abstand folgen. (siehe Energy-Time-Curve / Energy-Decay_Curve).

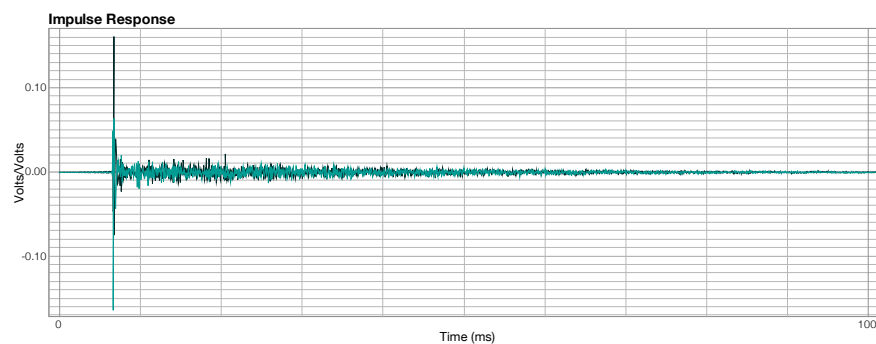


Abb 6.5 Impulsantwort MP01_L/R_LG (Compare Modus)

Da die Raumimpulsantwort alle akustischen Eigenarten des Raumes vollständig beschreibt, bildet sie die Grundlage für die weiteren Berechnungen und Darstellungsoptionen. So lassen sich mit „FuzzMeasurePro“ beispielsweise die Nachhallzeit T , die Anfangsnachhallzeit EDT, T_{20} , T_{30} , Wasserfalldiagramme über den gesamten Frequenzbereich aber auch in Oktav- und Terzabständen, Energy-Zeit-Diagramme und Energy-Abfall-Diagramme berechnen.

Nachhallzeit als EDT und RT20

Die Differenz der Zeit vom Eintreffen des Direktschalls vom Sinussweeps, bei einer bestimmten Frequenz, bis zum Eintreffen der ersten Raumreflexion in diesem Frequenzbereich ist die Early Decay Time (EDT). Ist der Pegel einer speziellen Frequenz nach der EDT um 20 dB gesunken, bestimmt die Differenz von der EDT bis zu dieser Zeit die Nachhallzeit (RT20) für diese Frequenz. In einem homogen klingenden Raum liegen diese beiden Kurven eng zusammen.

Zur Ermittlung der Nachhallzeit T wird der Abklingvorgang des Schallfelds zwischen -5 und -35 dB unter dem Schalldruckpegel des kontinuierlichen Geräuschs ausgewertet. Es wird auf -60 dB extrapoliert. Zur Messung der Anfangsnachhallzeit EDT ist der Abklingvorgang definitionsgemäß zwischen 0 dB und -10 dB zu registrieren und gleichfalls auf -60 dB zu extrapolieren.⁵⁸

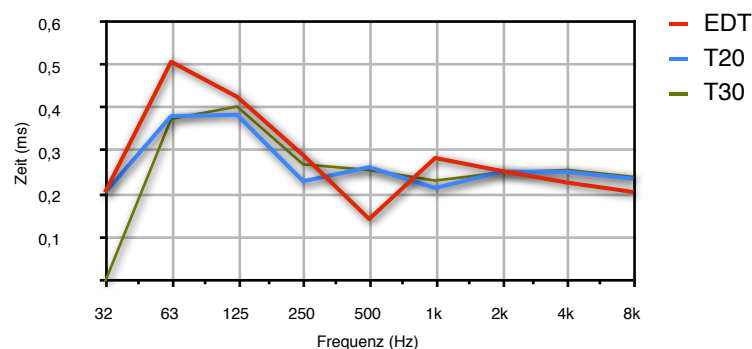


Abb 6.6 EDT, RT20 und RT30 über die Frequenz (Grafik aus exportierter Nachhall-Daten-Tabelle)

Energie-Zeit-Verlauf - Energy-Time-Curve - ETC

Eine Darstellung der Schallenergie über die Zeit ist die Energy-Time-Curve (ETC), welche sich zur Analyse des Reflektionsverhaltens von Räumen eignet. Für die ETC (hier bei Fuzzmeasure Pro als Log Squared Impulse Response bezeichnet) wird die Impulsantwort vom Messsystem quadriert und logarithmiert (Log Squared Impulse Response).⁵⁹ In dieser Darstellung lassen sich Reflexionsmuster wie frühe Reflexionen, Flatterechos und Nachhall sehr gut analysieren.

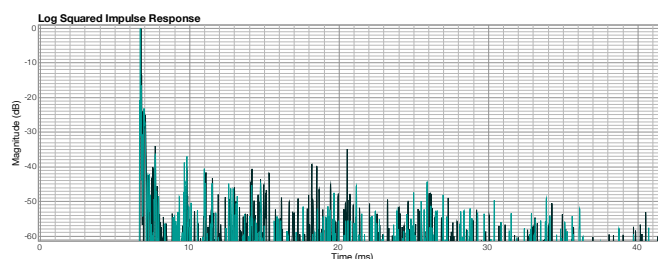


Abb 6.7 Energy Time Curve_MP01_L/R_LG (Compare Modus) Zoom -60 dB

⁵⁸ Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudiotechnik (Band 1). - 6. Aufl. - München: K.G.Saur Verlag KG, 1997

⁵⁹ Frieseke, Andreas: Studio Akustik. - 1. Aufl. - Bergkirchen: PPVMEIDIEN, 2006, S.134

Energieabfall-Diagramm - Energy-Decay-Curve - EDC

Die „Energy-Decay-Curve“ (Schroederplot) ist die gemittelte Darstellung der Schallenergie in einer Betrachtung über die Zeit. Die Darstellung in Abb 6.9 zeigt eine gleichzeitige Darstellung eines in seine Frequenzbänder zerlegten Signals, welche zur Identifikation farblich kodiert sind. Die Linien zeigen den Energieabfall in den einzelnen Frequenzbändern und sollten im optimalen Fall nah beieinander liegen und zusammen abfallen. Dies lässt auf eine über den Frequenzgang gleichmäßige Nachhallzeit schließen.

Die „Energy-Decay-Curve“ (Schroederplot)⁶⁰ ist prinzipiell eine durch die Integration geglättete Kurve der ETC, auf Wunsch für das gesamte Signal, für Terz- oder auch Oktavbreite.

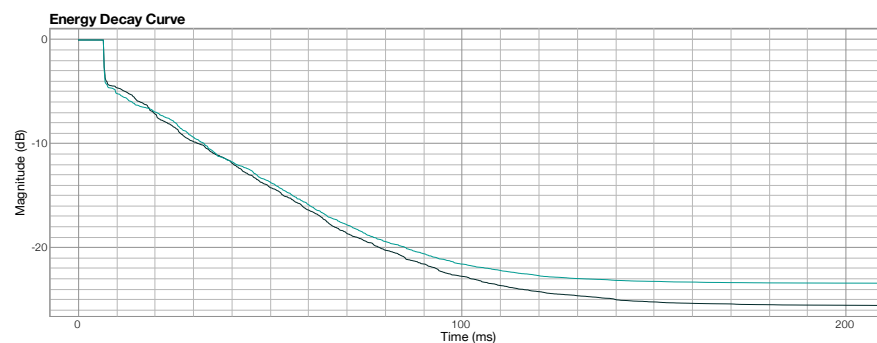


Abb 6.8 Energy Decay Curve / Schroederplot MP01 L+R

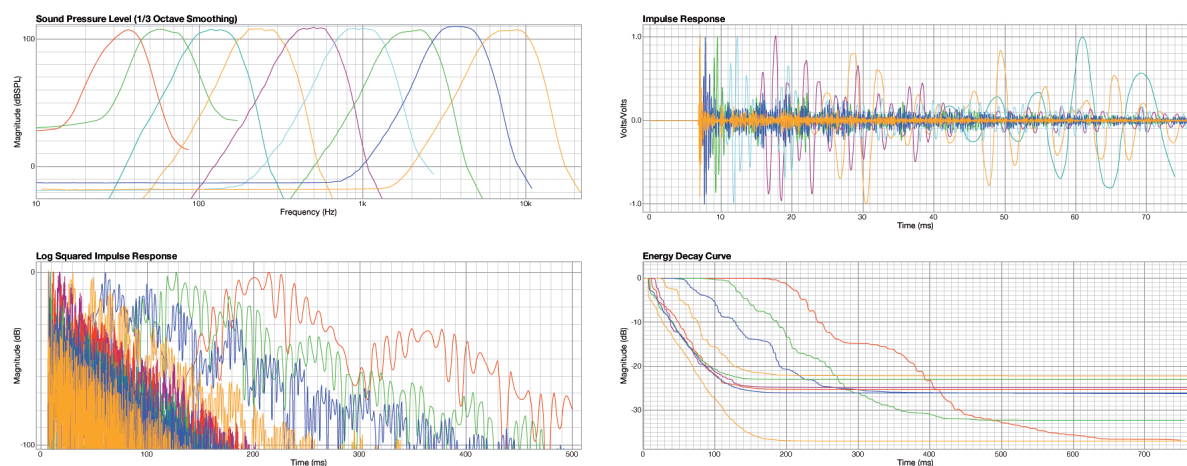


Abb 6.9 Fuzzmeasure-Diagramme_Frequenzbereich aufgesplittet in Oktavbänder

60 <mail@ascendo.de> :Room-Tools_Vers.2.4.URL:<www.ascendo.de/pdf/Room-Tools_2.4_Manual.pdf>, 20.08.2008, S.22

Energie-Zeit-Frequenz Diagramme - Energy-Time-Frequency-Curve - ETF/

auch: Zerfallsspektren; Spectral-Cumulative-Decay (CSD); Wasserfalldiagramm

Im Wasserfalldiagramm kann das spektrale Ausklingverhalten des Raumes in einer dreidimensionalen Darstellung untersucht werden. Es lässt sich leicht eine ungleichmäßige Nachhallzeit im Frequenzspektrum erkennen und ablesen. Vor allem tieffrequente Effekte (Raummoden etc.) in kleineren und mittleren Räumen lassen sich mit dieser Darstellung sehr gut analysieren.

Rechnerisch wird das Wasserfalldiagramm über die schnelle Fouriertransformation (FFT) gewonnen. Jede Zeitlinie entspricht einer FFT.⁶¹

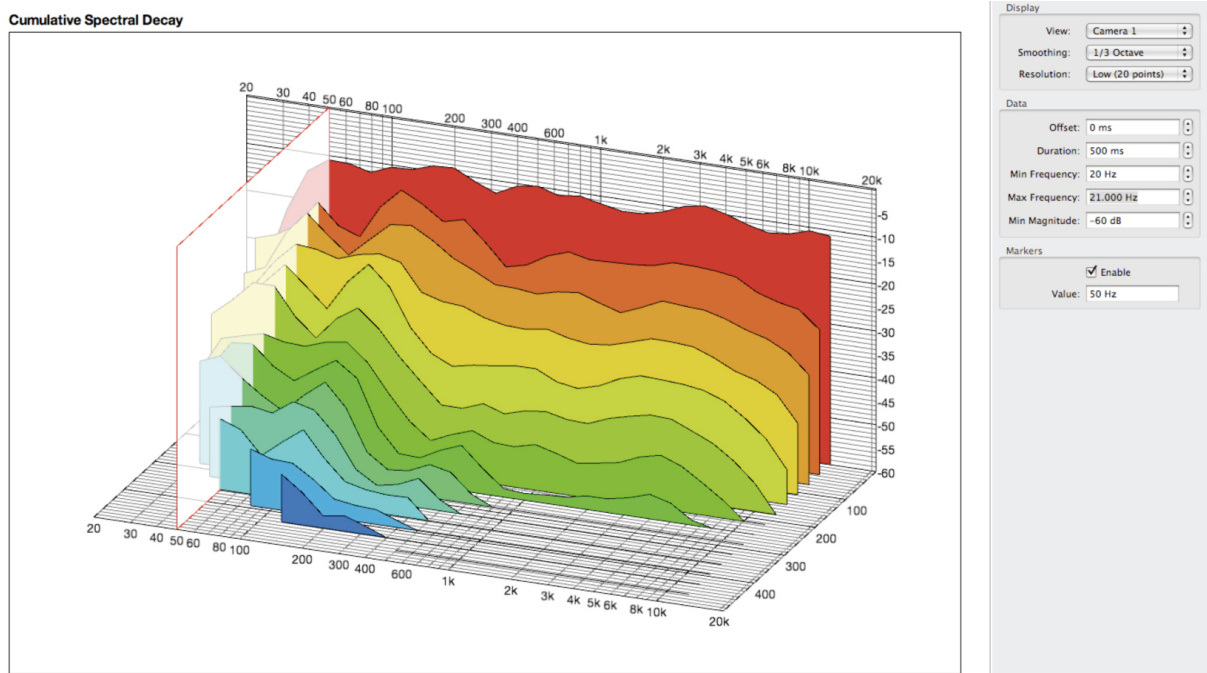


Abb 6.10 Energie-Zeit-Frequenz Diagramm_MP01_L/R_LG

61 <mail@ascendo.de> :Room-Tools_Vers.2.4.URL:<www.ascendo.de/pdf/Room-Tools_2.4_Manual.pdf>, 20.08.2008, S.22

6.3 Auswertung der Messungen

6.3.1 Akustik-Messbericht Tonregie

Am 25.11.2008 wurden die Messungen im Tonregieraum durchgeführt. Der Regieraum war zum Zeitpunkt der Messungen mit dem oben erläuterten Akustikausbau ausgerüstet. Die Abhörlautsprecher sind vom Typ „Event ASP8“, aktive 8“ Monitorlautsprecher. Der Regieraum war zum Zeitpunkt der Messungen vollständig eingerichtet, d.h. inkl. Mischpult, Siderack und Möbel. Um die, durch den Wandeinbau der Speaker zu erwartende Anhebung im Bassbereich auszugleichen, wurde der Bassbereich mit dem entsprechenden Filter an der Box um 6 dB abgesenkt.

Messpunkte Tonregie

Zur Messung wurden 5 Messpunkte festgelegt, welche den Bereich der Abhörposition abdecken. Diese haben die Bezeichnungen MP01 aufsteigend bis MP05. Die Messung erfolgt mittels eines Sinus-Sweeps von 10000 ms jeweils mit nur einer Box. Zur Kennzeichnung tragen die Messkurven eindeutige Bezeichnungen nach dem Muster z.B. MP01_L_LG (Messpunkt 01 / linke Seite / langer Sweep).

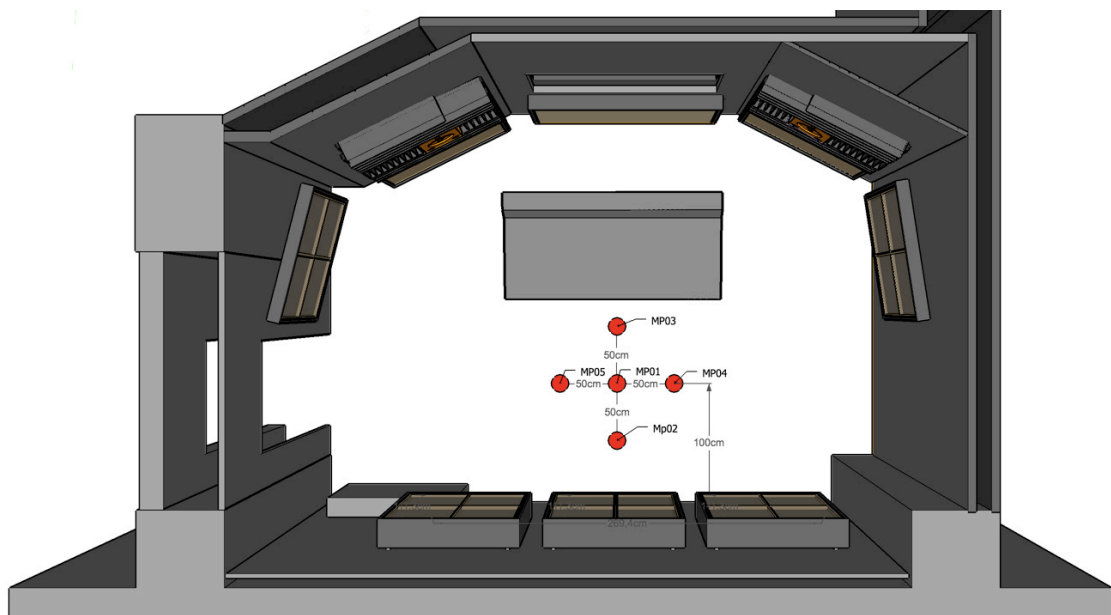


Abb 6.11 Anordnung Messpunkte

Messaufbau Tonregie



Abb 6.12 Messaufbau in der Regie

Zur Messung kommt das Messmikrofon ECM8000, ein kompaktes 12-Kanal Mischpult von Mackie als Mikrofonvorverstärker und Schaltzentrale, sowie ein MacBookPro mit Fuzzmeasure Pro 3 als Messinstrument zum Einsatz.

Das Messmikro befindet sich zur Messung auf Ohrhöhe und ist an MicIn 1 des MackieMischers angeschlossen. Das Responsesignal wird am Mischpult abgegriffen und an den Eingang des Computers geleitet. Dabei besteht eine Signalunterbrechung zum Masterkanal des Mischpults. Die Linekanäle 1 und 2 des Computers dienen als Messsignal und als Referenzsignal. Sie führen das gleiche Signal bis zum Mischpult. Der Unterschied besteht im Abgriff am Pult. Während das Messsignal zum Master und damit zum Lautsprecher weitergeleitet wird, erfolgt für das Referenzsignal ein Abgriff mit einer Unterbrechung des Signalweges zum Masterkanal. Auf diese Art durchläuft das Referenzsignal den selben Weg mit denselben Laufzeiten durch die Soundkarte wie das Messsignal. Das Messsignal wird nach der Passage des Masterkanals über den Lautsprecher in Schall gewandelt, durchläuft das System „Raum“ und wird über das Messmikrofon rückgewandelt. Per Panning-Regler des Kanalzuges lässt sich unkompliziert zwischen den Lautsprechern zur Messung wählen.

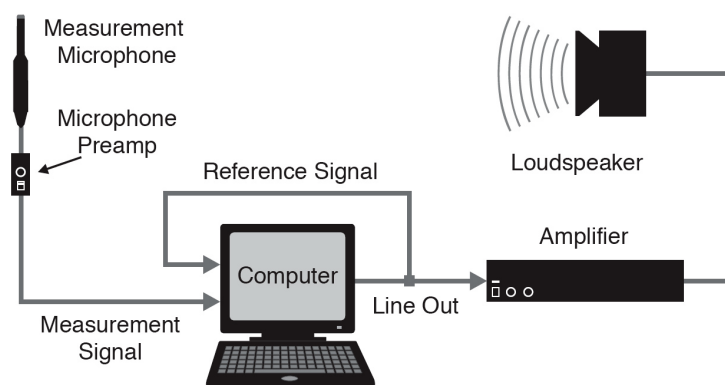


Abb 6.13 Prinzipdarstellung Messaufbau zur Messung mit Sweeps in der Regie

6.3.2 Messresultate Tonregie

Übertragungsfunktionen an der Abhörposition - Diagramme

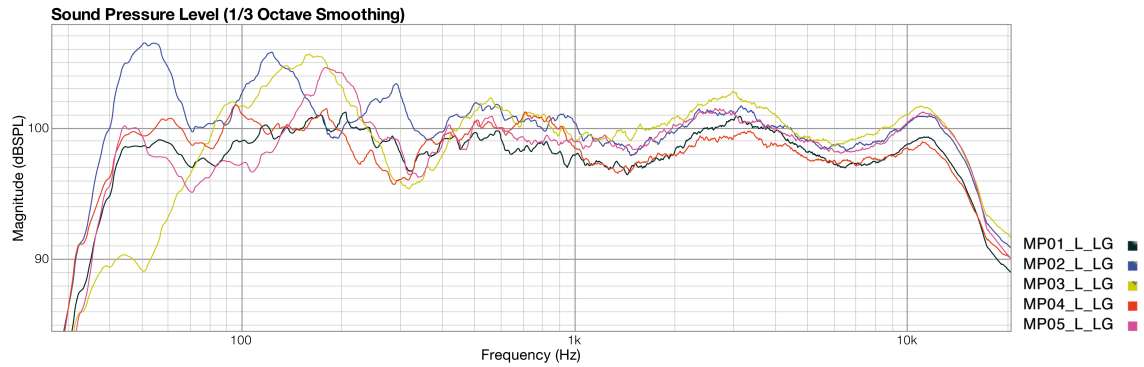


Abb 6.14 Event ASP8; Übertragungsfunktion an der Abhörposition; linker Kanal

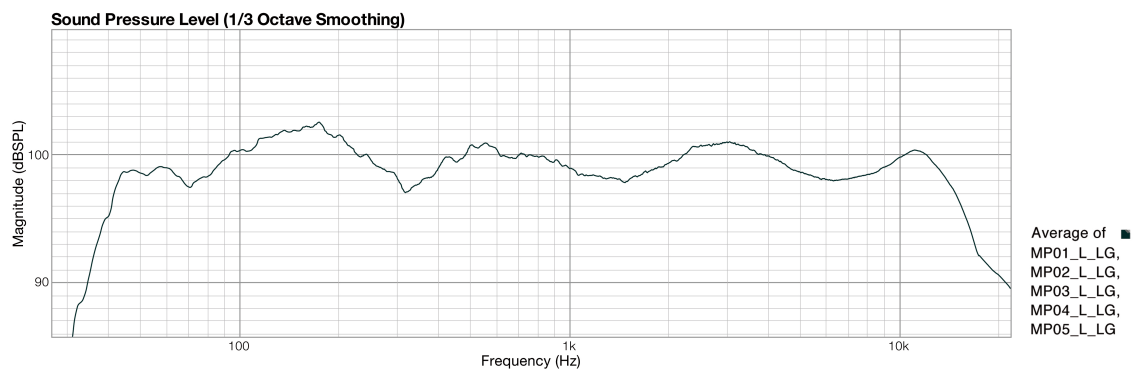


Abb 6.15 Event ASP8; Mittelung Übertragungsfunktion an der Abhörposition; linker Kanal

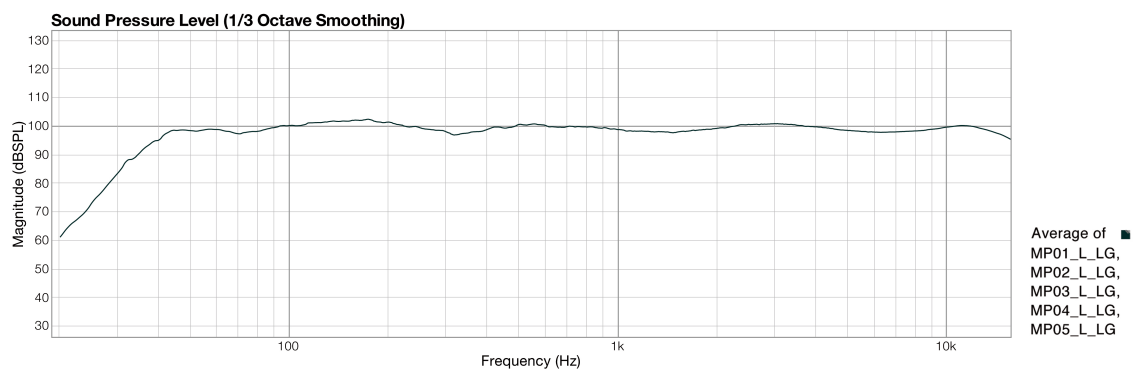


Abb 6.16 Event ASP8; Mittelung Übertragungsfunktion an der Abhörposition; linker Kanal; Zoom Out

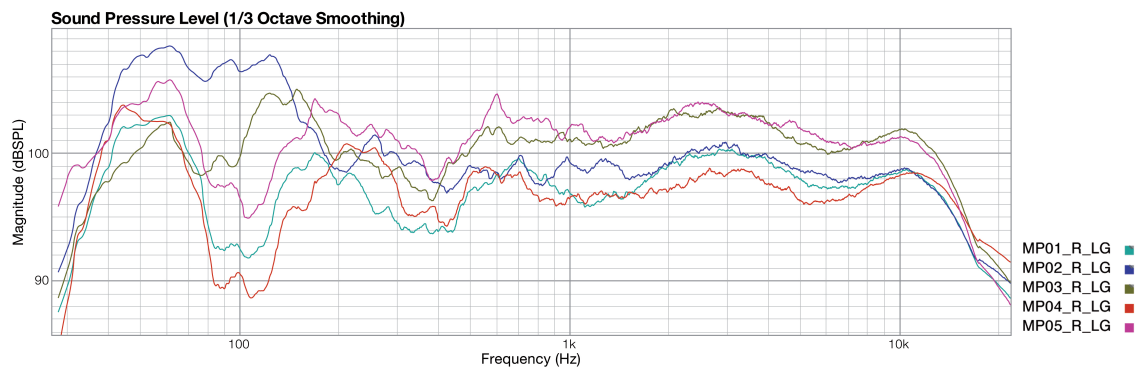


Abb 6.17 Event ASP8; Übertragungsfunktion an der Abhörposition; rechter Kanal

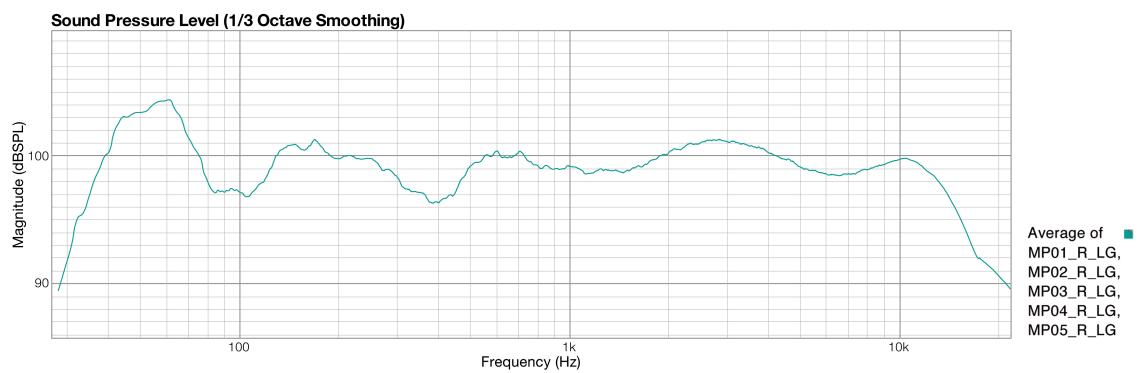


Abb 6.18 Event ASP8; Mittelung Übertragungsfunktion an der Abhörposition; rechter Kanal

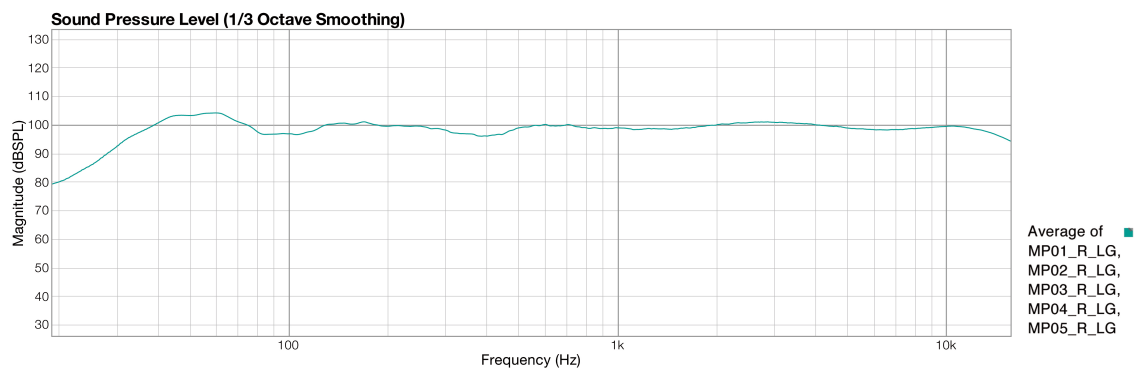


Abb 6.19 Event ASP8; Mittelung Übertragungsfunktion an der Abhörposition; rechter Kanal; Zoom Out

Kommentar zur Übertragungsfunktionen an der Abhörposition

Bei Betrachtung der vergleichenden Darstellung (Abb 6.17) für den linken Kanal fällt der zwischen Messpunkt MP02 und MP03 am besten zu erkennende Unterschied im Bassbereich um die Frequenz von 50 Hz auf. Dies lässt sich auf die Modenlandschaft sowie den Druckstau vor der Rückwand zurückführen. In der Raummitte (MP03) existiert eine Auslöschung um die 50 Hz durch eine stehende Welle. Am Messpunkt MP02, also in Rückwandnähe, befindet sich dementsprechend das Druckmaximum der stehenden Welle. Das Phänomen ist bekannt und muss aufgrund dieser Messungen bekämpft werden. Am Messpunkt MP01 und damit am eigentlichen Hörplatz, ist die Übertragungsfunktion mit einer Abweichung von 4 dB als gut zu bezeichnen. In der Mittelung (Abb 6.18) zeigt der Graph für den linken Kanal Schwankungen von ± 3 dB über die Frequenz, ebenfalls ein guter Wert (sieht wunderbar glatt aus).

Die vergleichende Darstellung der Messpunkte für den rechten Kanal zeigt eine Kerbe bei ca. 100 Hz bei jedem Messpunkt. Die Ursache dafür ist z.Z. unklar. In der Mittelung existiert eine Abweichung von ± 4 dB für den rechten Kanal.

Nachhallzeiten in der Tonregie anhand der ETC-Diagramme

Die Diagramme zeigen für den jeweiligen Kanal zuerst die ETC für alle Messpunkte, die ETC im Zoom sowie die Nachhallzeit in Terzabständen.

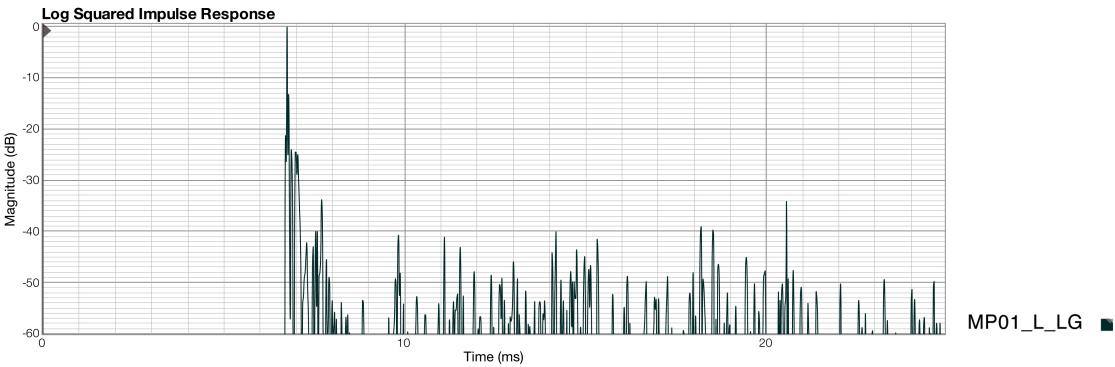


Abb 6.20 Energie-Zeit-Verlauf (ETC) an MP01; linker Kanal

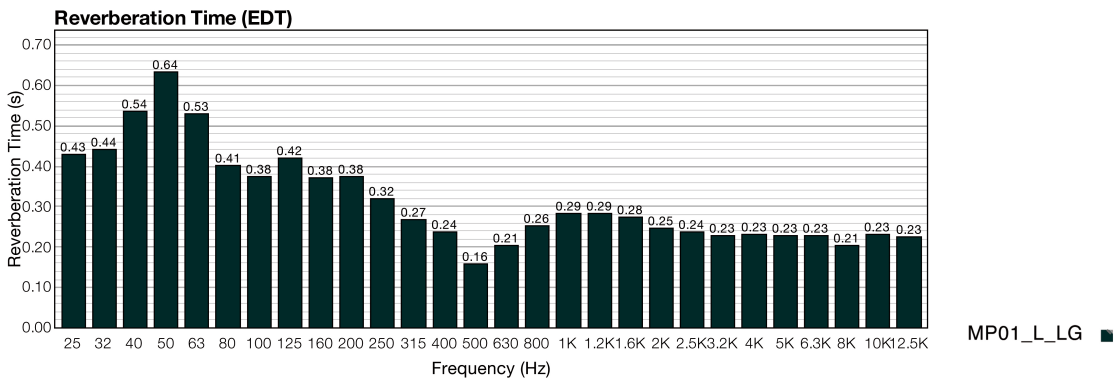


Abb 2.21 Frühe Nachhallzeit (EDT); linker Kanal

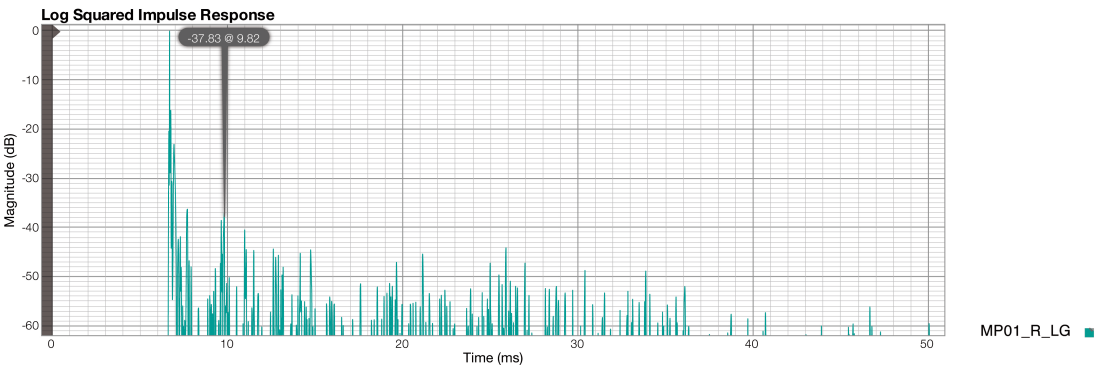


Abb 6.22 Energie-Zeit-Verlauf (ETC) an MP01; rechter Kanal

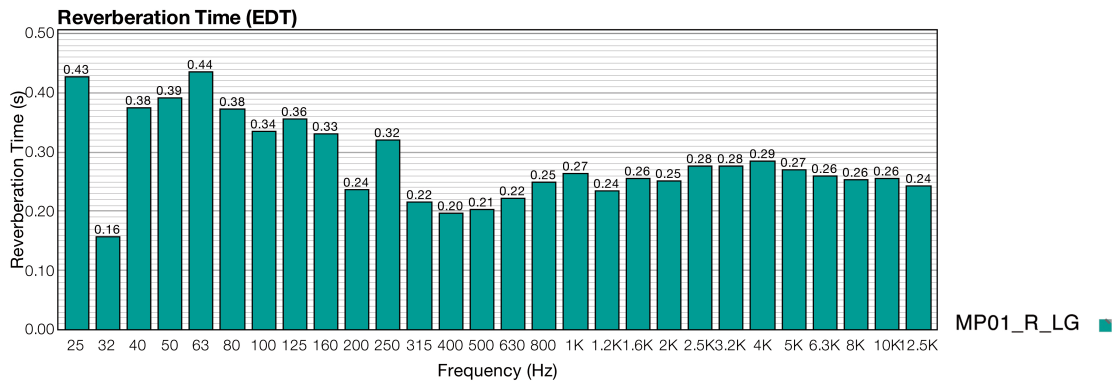


Abb 6.23 Frühe Nachhallzeit (EDT); rechter Kanal ETC / Nachhallzeit

Die Energie-Zeit-Verläufe dürfen für beide Wiedergabekanäle als gut bezeichnet werden. Die Reflexionen bis 50 ms nach dem Direktschall sind bei beiden Kanälen um deutlich mehr als 15 dB gegenüber dem Direktschall gedämpft. Die Pegel der ersten Reflexionen liegen sogar ca. 40 dB unter Direktschallpegel. Eine gute und ungestörte Lokalisation der Stereowiedergabe sollte gewährleistet sein.

Die Nachhallzeiten liegen, über das gesamte Frequenzband betrachtet, im gewünschten Bereich. Die Nachhallzeit im Bassbereich steigt bis 0,45 s an. Erstaunlich ist die Kerbe bei 500 Hz, diese Frequenz von stimmt mit der berechneten Frequenz des Schnellemaximums beim gewählten Wandabstand des porösen Absorbers überein.

Die mittlere Nachhallzeit im Raum (Abhörposition) beträgt: $T_m (400 \text{ Hz} - 1250 \text{ Hz}) = 0.24 \text{ s}$

EDT		T20	
Summe	2,77	Summe	2,96
Mittelw.	0,31	Mittelw.	0,33
Min.	0,19	Min.	0,23
Max.	0,46	Max.	0,64
Anzahl	9	Anzahl	9

Abb 6.24 Mittelwerte der Messungen EDT und T20 (aus Numbers)

Der Mittelwert für die EDT Messreihe liegt bei 0,31 s. Unter der geforderten Maßgabe von maximal 10 % Abweichung dürfte der Maximalwert 0,3131 s der Minimalwert nur 0,3069 s betragen. Der Maximalwert liegt reell bei 0,46 s @ 60 Hz der Minimalwert bei 0,19 s @ 500 Hz. Diese strenge Forderung lässt sich nicht erfüllen.

Energieabfall-Diagramme / EDC-Diagramme

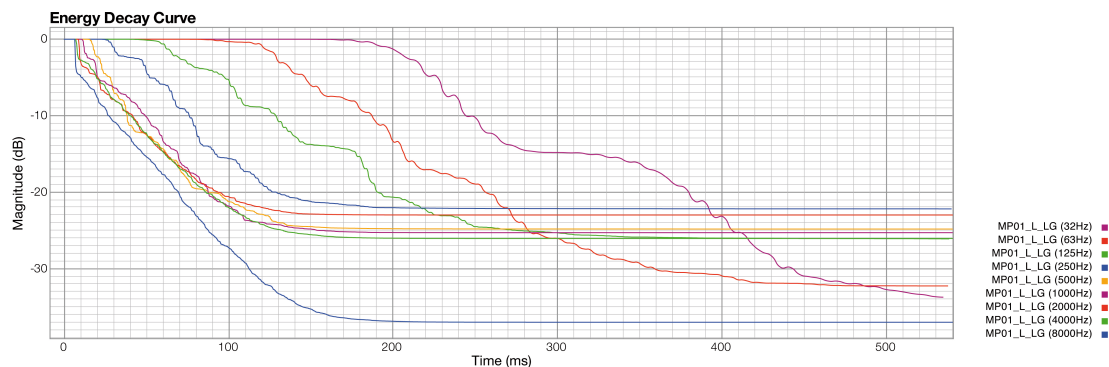


Abb 6.25 Energy-Decay-Curve (EDC) an der Abhörposition; linker Kanal

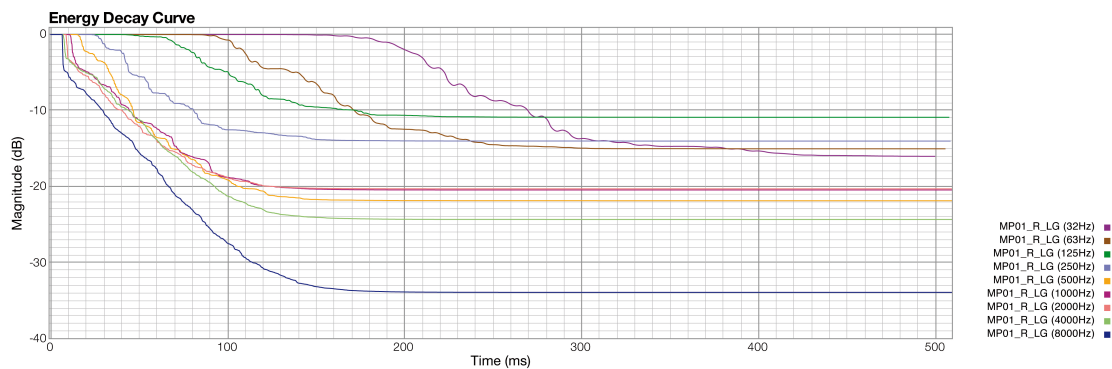


Abb 6.26 Energy-Decay-Curve (EDC) an der Abhörposition; rechter Kanal

Kommentar EDC

In der hier gezeigten Darstellung des Abfalls der Schallenergie ist das frequenzabhängige Verhalten sehr gut zu sehen. Die Frequenzbänder sind aufgeteilt und entsprechend farblich kodiert um gleichzeitig und eindeutig dargestellt werden zu können. Die einzelnen Graphen sollten im optimalen Fall nah beieinander liegen und zusammen abfallen. Dies ließe auf eine über den Frequenzgang gleichmäßige Nachhallzeit schließen. In diesem Fall lässt sich ein besonders schneller Abfall im obersten Band erkennen. Die Bänder von 500 Hz bis 4 kHz liegen in ihrem Verhalten dicht beieinander. Wie zu erwarten klingen die Oktavbänder mit sinkender Frequenz immer länger nach. Besonders das 32 Hz-Band klingt lang nach, spielt aber keine Rolle da in der Audio-Praxis dieser Frequenzbereich ohnehin beschnitten wird. Trotzdem lässt sich aus der Kurve eine unzureichende Dämpfung im unteren Frequenzspektrum ablesen.

Energie-Zeit-Frequenz Diagramme / ETF-Diagramme

auch: Zerfallsspektren; Spectral Cumulative Decay (CSD) ; Wasserfalldiagramm

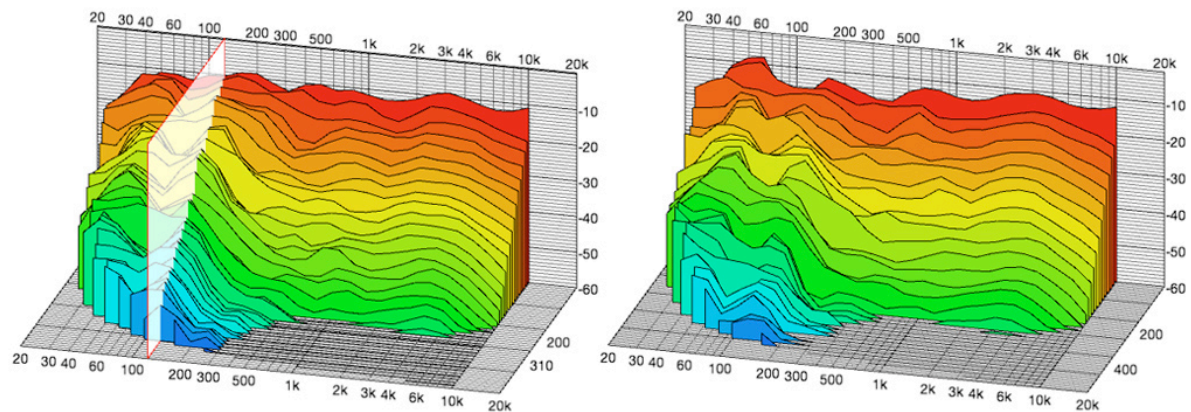


Abb 6.27 Zerfallsspektrum an der Abhörposition, linker und rechter Kanal

Kommentar ETF

auch: Zerfallsspektren (CSD); Spectral Cumulative Decay ; Wasserfalldiagramm

Die Energie-Zeit-Frequenzdiagramme zeigen im Hoch- und Mittelsonbereich die aus den übrigen Messungen zu erwartenden, gleichmässigen Verläufe. Abhängig von der Hörposition zeigen sich durch die Modenlandschaft Resonanzen bei 50 Hz - 60 Hz und deren doppelter Frequenz um 125 Hz. Hier sollte noch gezielt mit Helmholtzresonatoren gearbeitet werden. Bei gezielter Bekämpfung der Resonanzen ist dieses Problem in den Griff zu bekommen.

6.3.3 Vergleich Messresultate ohne/mit Akustikausbau



Abb 6.28 Messaufbau zur Messung ohne Akustikausbau

Um beurteilen zu können wie sich der Ausbau konkret auf das Schallfeld ausgewirkt hat, wurden die Messungen auch am unbehandelten Raum ausgeführt. Der Raum wurde, bis auf den Holzboden komplett beräumt. Messequipment und Lautsprecher sind identisch zur Messung im Vollausbau.

Raumimpulsantwort (RIA) - Vergleich vorher / nachher

Im Diagramm ist sehr gut zu sehen wie das Abklingverhalten beeinflusst wird, ohne dass direkte Ergebnisse ablesbar sind. Der rote Graph zeigt die Raumimpulsantwort vor, der blaue Graph die Raumimpulsantwort nach der akustischen Behandlung des Raumes. Der rote Graph zeigt deutliche starke einzelne Rückwürfe und allgemein das sehr viel langsamere Abklingen des angeregten Schalls.

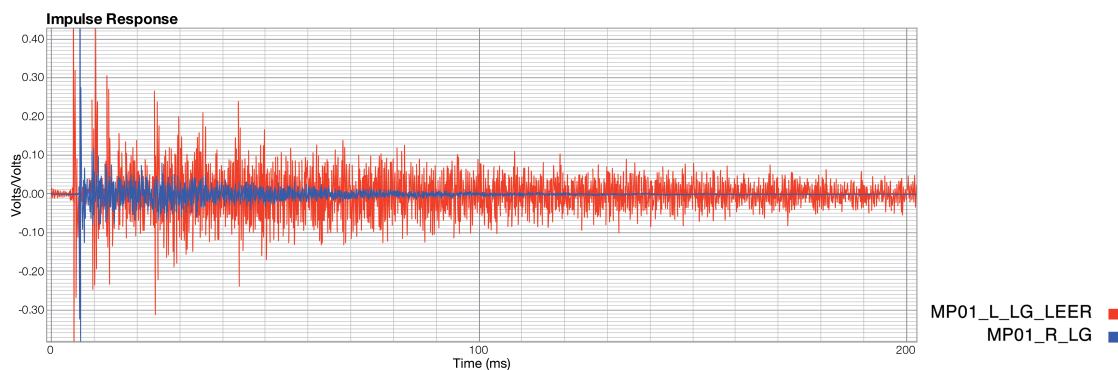


Abb 6.29 Raumimpulsantworten mit und ohne Akustikausbau

Energie-Zeit-Verlauf (ETC) Nachhallzeit - Vergleich vorher / nachher

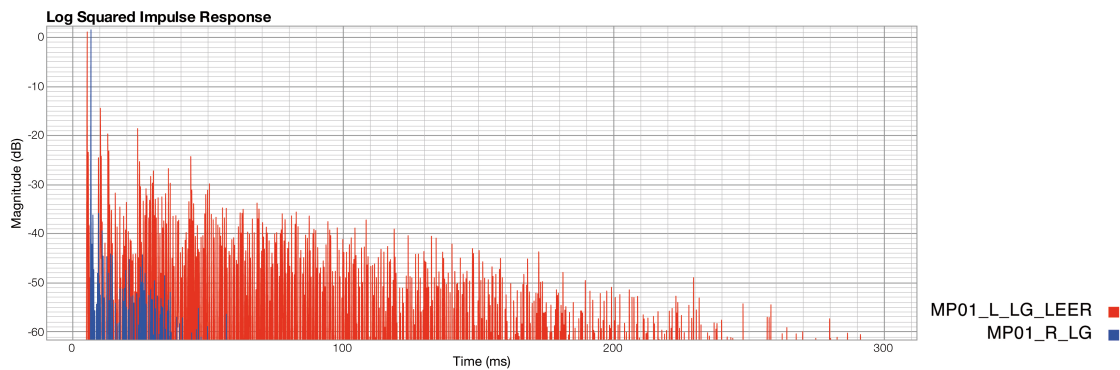


Abb 6.30 Energie-Zeit-Verlauf (ETC) an Abhörposition; rechter Kanal

In dieser Darstellung lässt sich bei Betrachtung der Energie-Zeit-Verläufe eine Aussage über die Nachhallzeiten im jeweiligen Raumzustand treffen. Der blaue Graph zeigt ein Schallfeld, welches nach ca. 0,3 s um 60 dB abgeklungen ist. Der rote Graph zeigt das Schallfeld des unbehandelten Raumes, welches deutlich länger nachhallt, was sich auch in der Darstellung der frühen Nachhallzeit (EDT) dokumentiert. Der Pegel der Erstreflexionen im behandelten Raum liegt deutlich unter denen des unbehandelten.

■ EDT MP01_L+R_LG_LEER (vor) ■ EDT MP01_L+R_LG (nach)
 ■ T20 MP01_L+R_LG_LEER (vor) ■ T20 MP01_L+R_LG (nach)

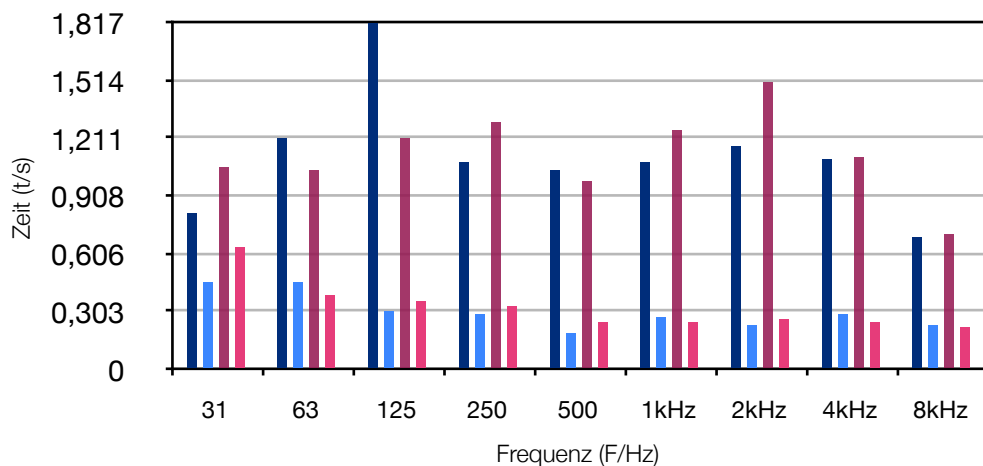


Abb 6.31 Vergleich EDT,T20 - vorher/nachher

Im Balkendiagramm sind die Nachhallzeiten des unbehandelten und des behandelten Raumes gegenübergestellt. Auch hier lässt sich deutlich die Auswirkung ablesen. Die Datensätze welche dem Diagramm zugrunde liegen, wurden aus den Nachhallzeit-Darstellungen von FuzzmeasurePro gewonnen.

Energieabfall-Diagramm (EDC) - Vergleich vorher / nachher

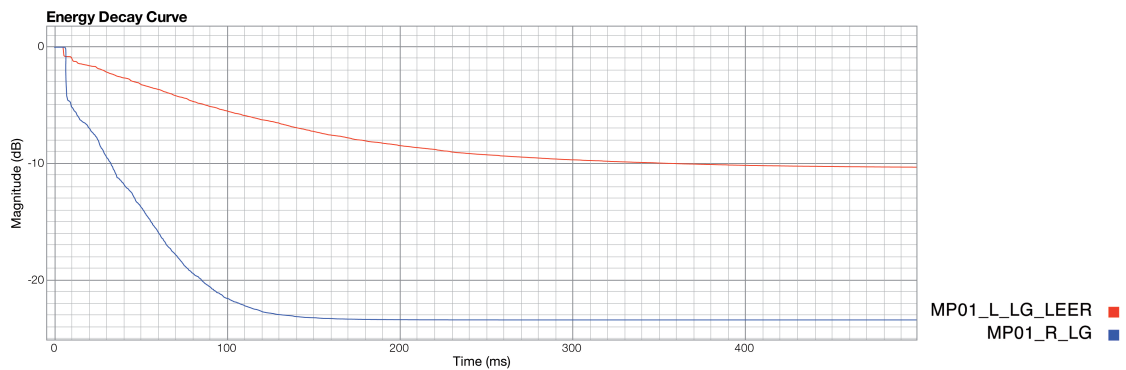


Abb 6.32 Energy-Decay-Curve (EDC) an der Abhörposition vorher/nachher

Die gemittelte Darstellung der Schallenergie zeigt über die Zeit betrachtet den Energieabfall des Schallfeldes. Deutlich zu erkennen ist der rapide Abfall der Energie nach der Anregung im behandelten Raum (blauer Graph). Dieser lässt sich an der ausgeprägten Stufe erkennen.

Energie-Zeit-Frequenz-Diagramm (ETF) nach Akustikausbau

auch: Zerfallsspektren; Spectral Cumulative Decay (CSD); Wasserfalldiagramm

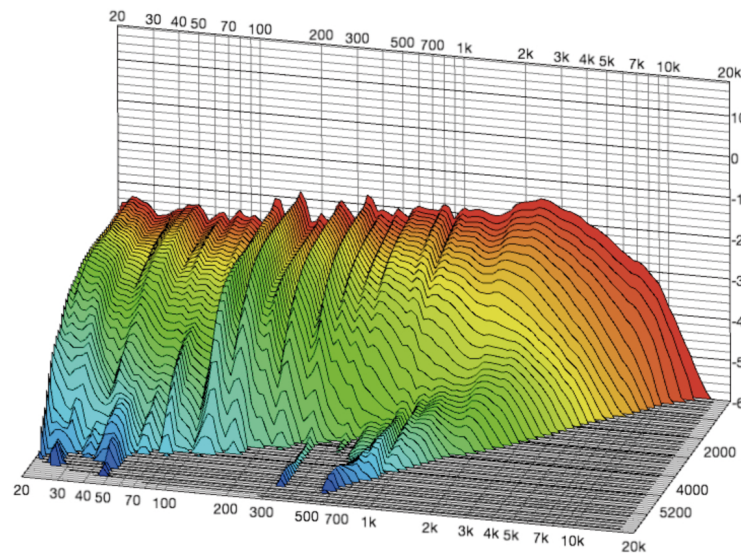


Abb 6.33 Zerfallsspektrum an MP01_L_LG_LEER

Das Energie-Zeit-Frequenzdiagramm zeigt Nachhallzeiten von bis zu 0,5 s. Zwischen 1 kHz und 16 kHz ist eine nahezu linearer verlaufende Verkürzung im Hochtonbereich zu erkennen. Zu erkennen sind auch hier die Resonanzfrequenzen bei ca. 60 Hz sowie 100 Hz -120 Hz, jedoch weniger deutlich ausgeprägt, da der gesamte Frequenzbereich länger abklingt.

6.3.4 Vergleich Messresultate ohne/mit Schroeder-Diffusoren



Abb 6.34 abgedecktes Frontend

Um den Einfluss der um die Lautsprecher angeordneten streuenden Struktur zu untersuchen, wurden die Schroeder-Elemente abgedeckt. Die Abdeckung erfolgte durch Wellpappe. In diesem Zustand wurden nun die Messungen wiederholt um direkte Vergleiche der Kurven anstellen zu können.

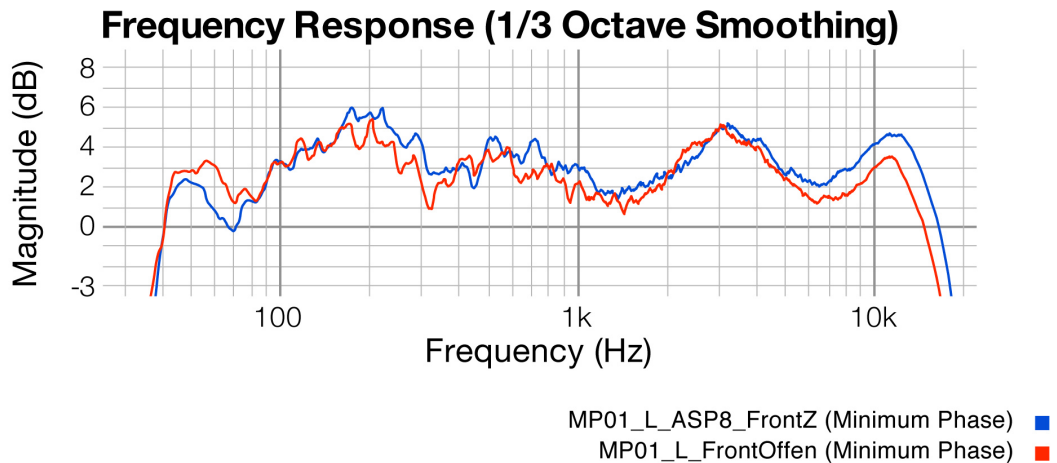


Abb 6.35 Vergleich Frequenzantworten offene/geschlossene Struktur; linker Lautsprecher

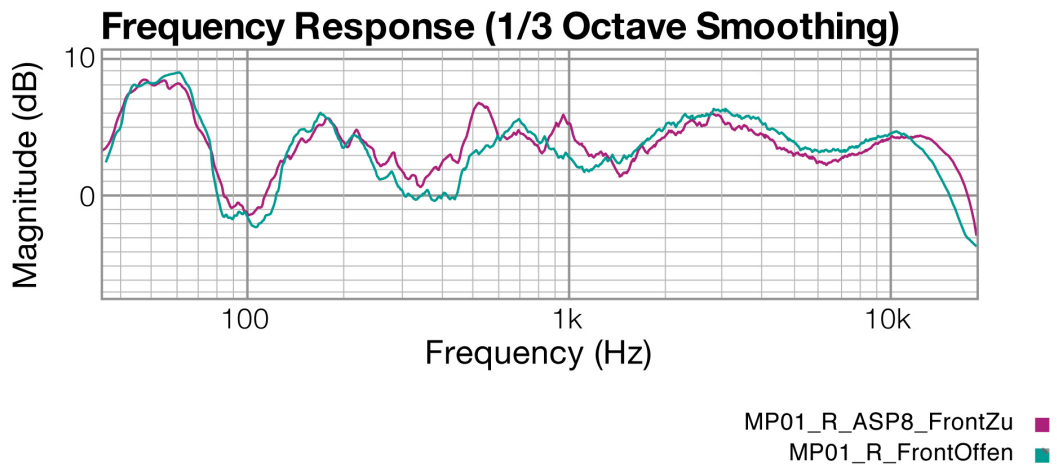


Abb 6.36 Vergleich Frequenzantworten offene/abgedeckte Struktur; rechter Lautsprecher an MP01

Bei Analyse der Kurven lässt sich kein offensichtlicher Unterschied zwischen der offenen und geschlossenen Situation feststellen. Sie stimmen weitgehend überein, auffällig beim linken Kanal ist eine Verschiebung der Klangbalance. Im Bassbereich zwischen 30 Hz und 85 Hz und ab 5 kHz bis 16 kHz besteht ein Unterschied von 1 dB zwischen den Messungen. Die Messkurve der offenen Situation ist dadurch insgesamt ausgewogener. Auffällig ist wiederum die Kerbe um 100 Hz in der Frequenzantwort des rechten Lautsprechers. Eine konkrete Auswirkung, z.B. in Form einer Glättung des Frequenzgangs ist jedoch nicht erkennbar.

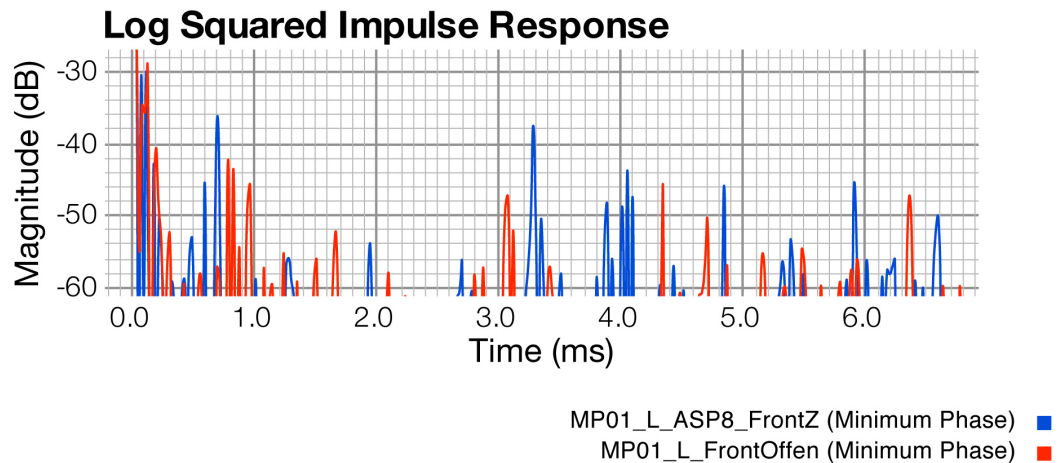


Abb 6.37 Vergleich Raumimpulsantworten offene/abgedeckte Struktur an MP01

Die Raumimpulsantworten der beiden Messungen lassen eine Wirkung des diffusen Frontends erkennen. Da der Schall für 1 m Weg 3 ms benötigt, könnte der blaue Peak bei 0,7 ms die Reflexion der glatten Frontwand sein, oder eine Pultreflexion darstellen. Andere Reflexionsflächen sind bei diesem kurzen Umweg ausgeschlossen. Es kann jedoch als sicher angenommen werden, dass es sich um die Wandreflexion handelt, da der rote Graph an diesem Zeitpunkt ein, in Zeitdimension verbreitertes und im Pegel verringertes Signalpeak zeigt. Überhaupt lässt sich erkennen, dass die zeitigen Reflexionen mit offener Diffuserstruktur geringere Pegel besitzen.

Das 100 Hz Problem

Die Kerbe im Frequenzgang der rechten Lautsprecherbox ist recht auffällig. Deshalb der Vergleich der beiden Boxen.

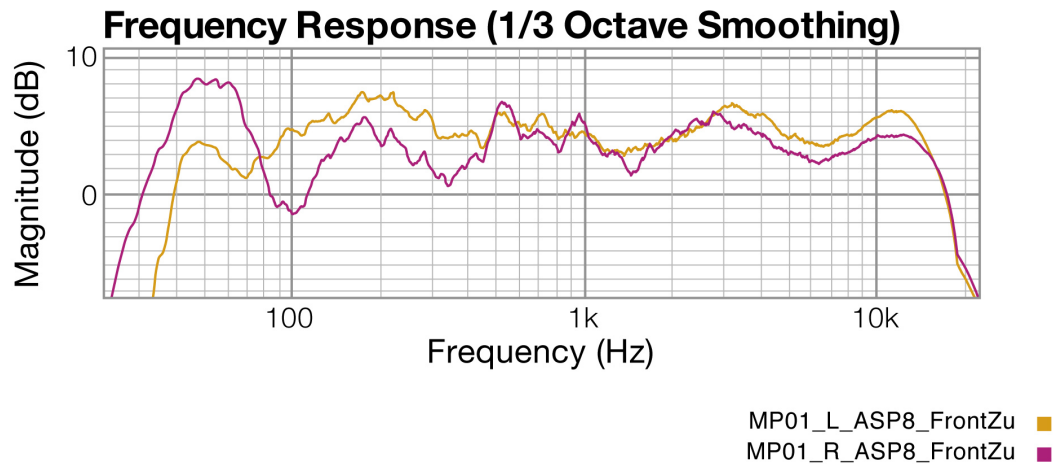


Abb 6.38 Vergleich Frequenzgang links/rechts bei abgedeckter Struktur an MP01

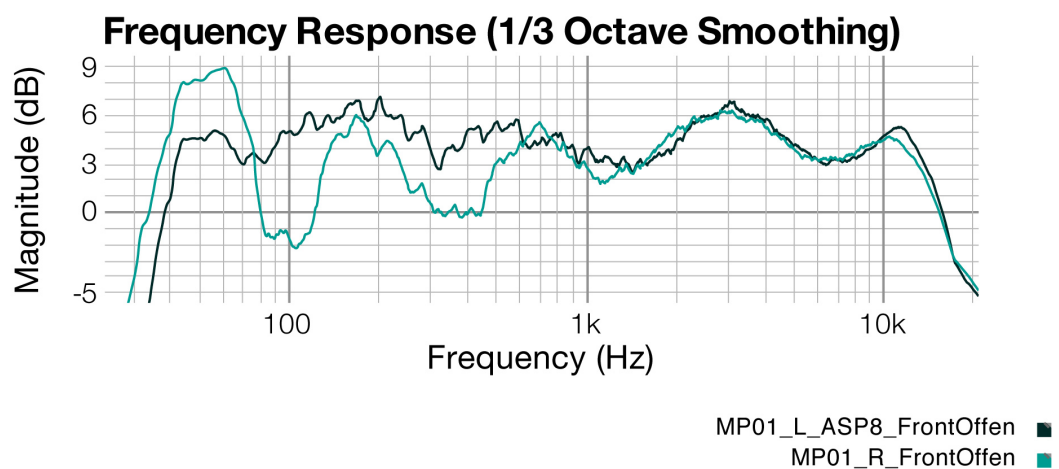


Abb 6.39 Vergleich Frequenzgang links/rechts bei offener Frontstruktur an MP01

Wie in Abb 6.18 zeigt die Antwort der rechten Box in der offenen wie in der geschlossenen Situation die starke Kerbe um die 100 Hz und die entsprechende Anhebung um 50 Hz. In beiden Messsituationen zeigen die Frequenzgänge ein identisches Verhalten. Um die Raumeinflüsse etwas auszuschließen, erfolgt eine Messung in 1 m Entfernung zur Lautsprecher-Front.

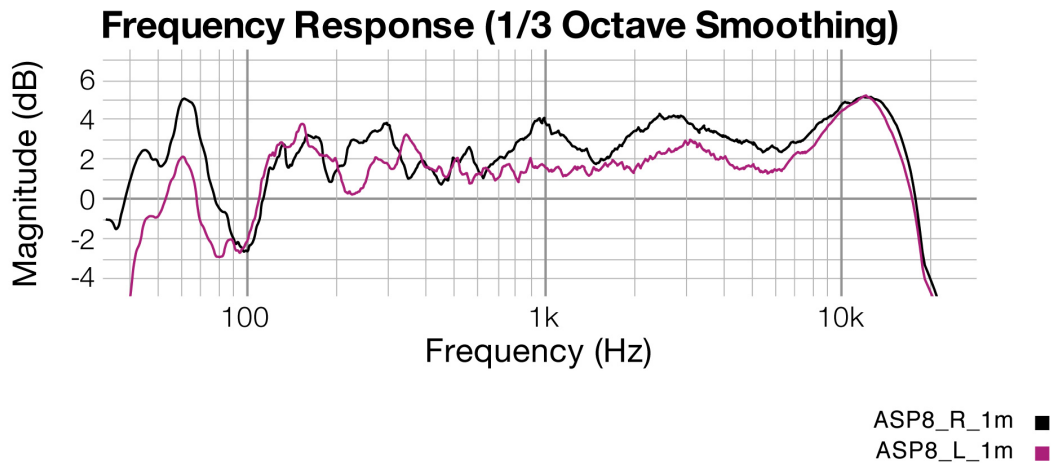


Abb 6.40 Vergleich Frequenzgang links/rechts in 1 m Entfernung

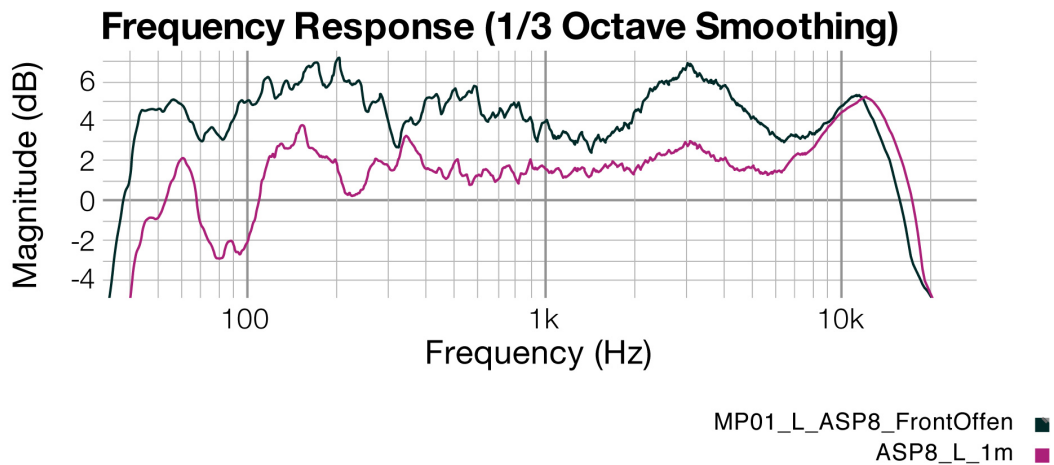


Abb 6.41 Vergleich ASP8 in 1 m Entfernung und an MP01 mit offener Struktur

Auch hier zeigt sich die charakteristische Kerbe, wenn auch etwas weniger ausgeprägt. Die Kurven des linken und rechten Kanals nähern sich an einander an. Ein Zeichen für die verminderten Raumeinflüsse. Auf der rechten Seite ist das 100 Hz-Phänomen auch hier stärker ausgeprägt.

Diese Unregelmäßigkeit des Frequenzganges sind auf Raumeinflüsse zurückführbar. Für den Einfluss des Raumes spricht die Abmessung der Raumtiefe von 3,40 m, welche exakt der Wellenlänge von 100 Hz entspricht (siehe Abb 6.42).

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{344 \frac{m}{s}}{100 \frac{1}{s}} = 3,44 \text{ m}$$

Abb 6.42 Berechnung Wellenlänge bei 100 Hz

Warum die Ausprägung der zwischen den beiden Kanälen so unterschiedlich ist bleibt zunächst unklar. Bei der Freifeldmessung des Übertragungsfrequenzganges der ASP8 zeigt sich deutlich der Einfluss des Raumes bei der 100 Hz Problemstelle.



Abb 6.43 Messaufbau Freifeldmessung ASP8

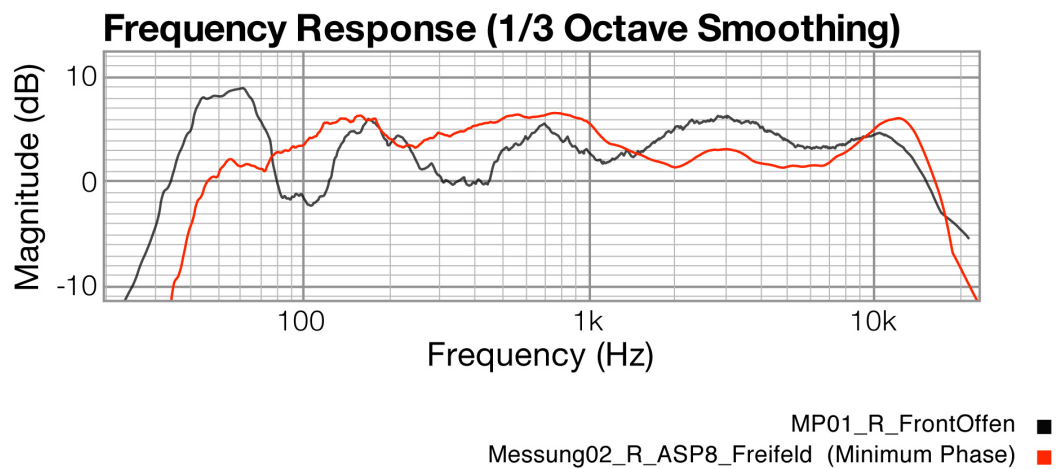


Abb 6.44 Vergleich Raumimpulsantworten vs. Freifeldmessung

Bei Messung im Freifeld, in diesem Fall im Hinterhof vor dem Studio, zeigt der Frequenzgang nicht die ausgeprägte Kerbe, sondern trotz der Aufhebung des Bass-Roll-Offs einen leichten Abfall von 100 Hz nach 50 Hz hin. Absolut eindeutig ist also das Verhalten im Raum auf die Modenlandschaft zurückzuführen. Gegen den doch erheblichen Pegelunterschied zwischen 50 Hz und 100 Hz von ca. 10 dB muss in der Konsequenz etwas getan werden.

ASP8 auf der Meterbridge und anderes

Zur Ermittlung des Verhaltens der Lautsprecherbox ASP8 wurden noch einige Messungen vorgenommen. So z.B. Messungen der ASP8 platziert auf der Meterbridge des Mischpults, im Vergleich mit der „ALESIS MonitorOne“ ebenfalls platziert auf der Meterbridge.



Abb 6.45 Messaufbau ASP8 auf Meterbridge

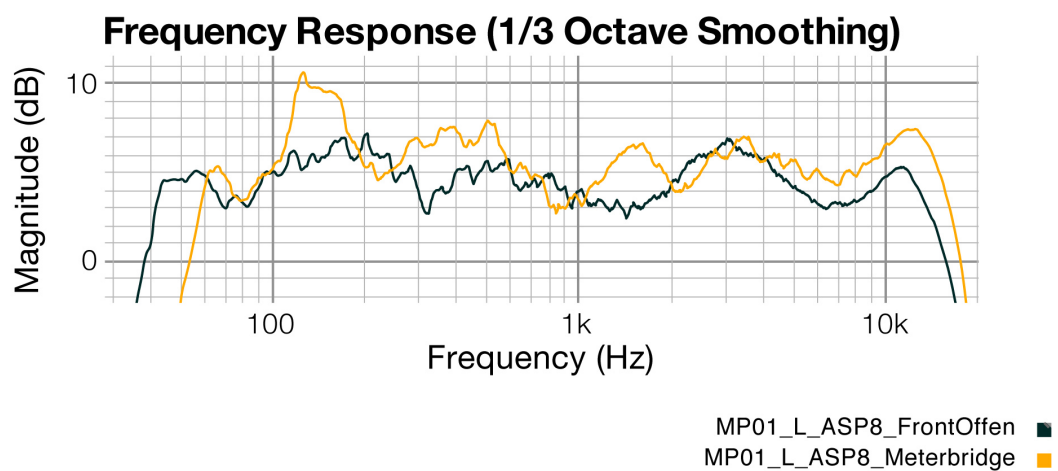


Abb 6.46 Vergleich Frequenzantworten ASP8 auf Meterbridge vs. ASP8 in offenen Struktur

Bei Platzierung der ASP8 auf der Meterbridge kommt es zur starken Überbetonung des Bereichs zwischen 100 Hz und 200 Hz. Dies ist auf den Druckstau effekt durch die Pultoberfläche zurückzuführen. Zwischen 600 Hz und 3 kHz kommt es zu den erläuterten Interferenzphänomenen, welche sich in deutlichen Kerben und Spitzen im Frequenzgang bemerkbar machen. Ganz allgemein ist die Meterbridge-Kurve wesentlich unruhiger als die der Fernfeld-Variante.

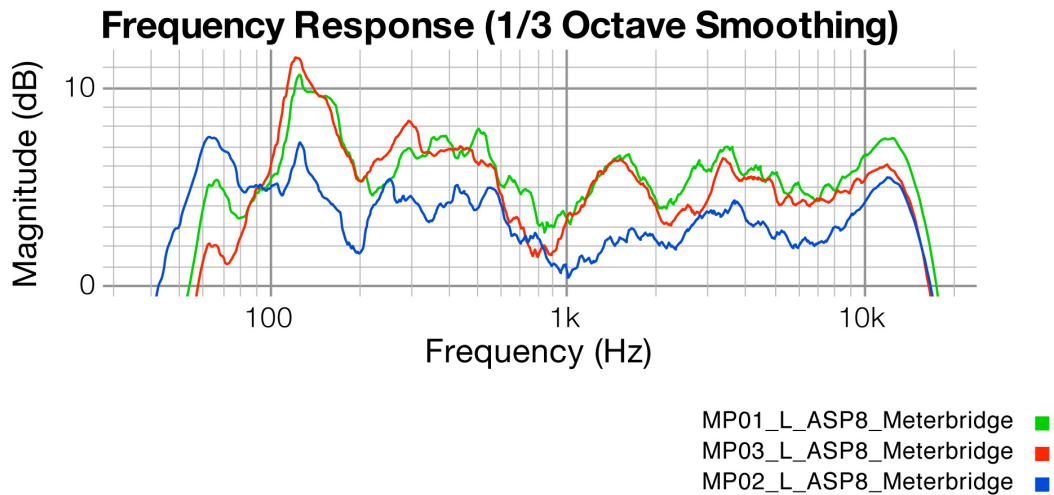


Abb 6.47 Vergleich ASP8 auf Meterbridge an verschiedenen Messentfernungen

Der Vergleich der Messungen an den verschiedenen Messpunkten zeigt die Auswirkungen nochmals deutlich. Je näher der Pultoberfläche sich die Abhörposition befindet (MP03), desto ausgeprägter die Spitzen und Täler im Frequenzgang. An der entfernten Position (MP02) haben besagte Effekte nicht mehr den großen Einfluss, die Kurve glättet sich.

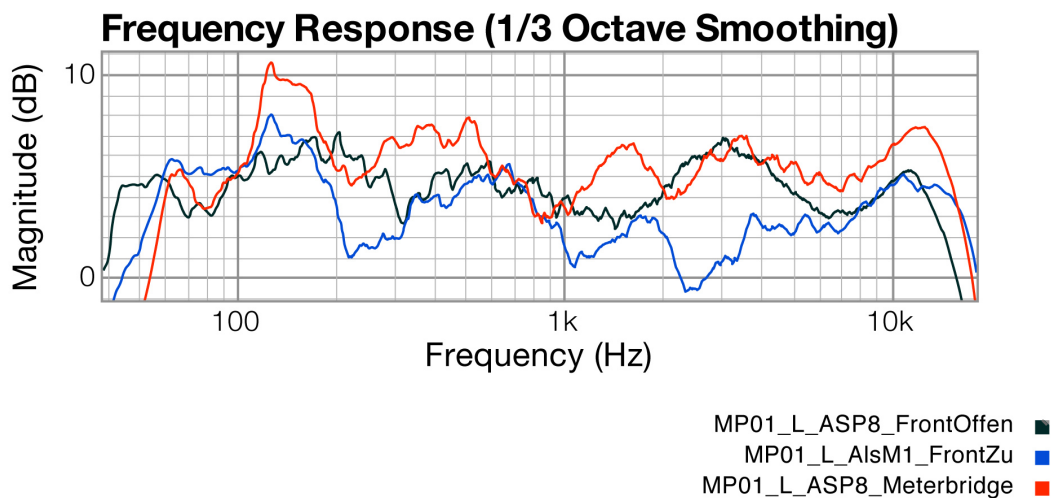


Abb 6.48 Vergleich ASP8 vs. ALESIS Monitor One @ Meterbridge und ASP8 @ ESS

Schlussendlich noch ein Vergleich der ASP8 mit der derzeit als Alternativabhöre eingesetzten „ALESIS Monitor One“- Lautsprecherbox. Die Kurve der auf der Meterbridge positionierten, ALESIS-Box zeigt zwingende Ähnlichkeiten der Spitzen und Täler zwischen 1 kHz und 4 kHz und die selbe Überhöhung bei 150 Hz wie die ASP8. Das lässt den Rückschluss auf charakteristische Pultreflexionen, und den daraus resultierenden Effekten zu. Der Wandeinbau der Lautsprecher scheint anhand dieses Vergleichs die beste Lösung zu sein.

7 Fazit

Ziel war es, einen Regie- und einen angeschlossenen Aufnahmerraum hinsichtlich der Akustik zu konzipieren, wobei das Augenmerk in dieser Arbeit auf der Regie lag.

Durch die vorgegebene, räumliche Struktur fiel die Wahl auf das Konzept der frühen Schallstreuung (ESS). Durch dieses Konzept sollte ein diffuses Schallfeld an der Abhörposition erreicht werden, welches die akustischen Eigenheiten des Raumes verbirgt. Die Raumakustischen Standards wie eine optimale Nachhallzeit sollten durch preiswerte Massnahmen realisiert werden, ohne auf Lösungen von Planungsbüros ö.ä. zurückzugreifen.

Das Ergebnis lässt sich anhand subjektiver Hörtests und Messdiagrammen auswerten. Die Diagramme zeigen die Stärken der gewählten Lautsprecherkonfiguration als Fernfeldvariante auf.

Gewünschte Effekte sind erzielt, unerwünschte Effekte vermieden worden. Bestehendes Manko bleibt die existierende Raummode bei 50 Hz bzw. 100 Hz, welche deutlich hör- und messbar die tonale Balance im Schallfeld beeinflusst. Bei Bewegung durch den Raum sind die Auslöschungs- und Überlagerungseffekte wahrnehmbar, welche sich durch relativ stark wechselnde Wahrnehmung des Tiefbassbereichs auswirken. Hier wäre im Nachgang eine gezielte Bekämpfung durch Bassfallen oder Helmholtzresonatoren nötig, um ein wirklich störungsfreies Klangbild zu schaffen.

Auffällig und mutmaßlich ebenso Auswirkung der stehenden Welle bei 100 Hz, ist der Unterschied zwischen den Übertragungsfrequenzgängen zwischen linker und rechter Monitorbox (Abb 6.39).

Anhand der Auswertung der Messdiagramme in Verbindung mit dem Wissen aus der Literatur präsentiert sich der Wandeinbau der Lautsprecher im Rahmen des ESS-Konzepts als die Lösung mit den besten Messresultaten (Abb 6.46).

Die Auswirkungen von ESS machen sich in subjektiven Höreindrücken bemerkbar.

Der relativ kompakte Lautsprecher erscheint als „wandgroße“ Schallquelle. Das Schallfeld im Raum ist homogen, die Signale der linken und/oder rechten Schallquelle lassen sich auch von einer etwas seitlichen Hörposition außerhalb des Sweetspots zuordnen.

Anhand von Abb 6.39 lässt sich ein Effekt der ESS-Diffuser zeigen. Scharfe Reflexionen werden in der Zeitdimension gestreut und im Pegel verringert. Sie haben so nicht die nötige Energie, das Klangbild charakteristisch zu beeinflussen.

8 Bildquellenverzeichnis

- Abb 1.1 Henle, Hubert: Das Tonstudio Handbuch. 4. Aufl. - München: GC Carstensen Verlag, 1998, S.320
- Abb 1.2 Henle, Hubert: Das Tonstudio Handbuch. 4. Aufl. - München: GC Carstensen Verlag, 1998, S.321
- Abb 1.3 eigene Grafik erstellt mittels „Adobe Photoshop“
- Abb 3.1 eigene Grafik erstellt mittels Google „SketchUp“
- Abb 3.2 eigene Grafik erstellt mittels „Pages“ von Apple
- Abb 3.3 eigene Grafik erstellt mittels „Numbers“ von Apple auf Grundlage eines XLS-Dokuments aus:
Frieeseke, Andreas: Studio Akustik. - 1.Aufl. - Bergkirchen: PPVMEDIEN , 2006
- Abb 3.4 eigene Grafik erstellt mittels „Numbers“ von Apple auf Grundlage eines XLS-Dokuments aus:
Frieeseke, Andreas: Studio Akustik. - 1.Aufl. - Bergkirchen: PPVMEDIEN , 2006
- Abb 3.5 eigene Grafik erstellt mittels Google „SketchUp“
- Abb 3.6 eigene Grafik erstellt mittels Google „SketchUp“
- Abb 4.1 <info@eventelectronics.com> : STUDIO PRECISION USER GUIDE.
URL:<<http://www.eventelectronics.com/products/pdfs/asp8.pdf>>, 20.08.2006:
- Abb 4.2 <info@eventelectronics.com> : STUDIO PRECISION USER GUIDE.
URL:<http://www.eventelectronics.com/Support/Manuals/SP_Man.pdf>, 20.08.2006:
- Abb 4.3 Görne, Thomas; Bergweiler, Steffen: Monitoring. -1.Aufl. - Bergkirchen: PPVMEDIEN, 2004, S.107
- Abb 4.3 Fey, Fritz: Böse Nachbarn - Lautsprecher in feindlichem Umfeld.
In: Studio Special Studiomonitring. - Oberhausen: Studio Presse Verlag GmbH. -2006,
Studio Magazin Sonderausgabe. S.47
- Abb 4.5 Wolff, Markus: Gestatten, Studiomonitor...Grundlagen und Qualitätsparameter.
In: Studio Special Studiomonitring. - Oberhausen: Studio Presse Verlag GmbH. -
2006 Studio Magazin Sonderausgabe. S.20
- Abb 4.6 <info@eventelectronics.com> : STUDIO PRECISION USER GUIDE.
URL:<<http://www.eventelectronics.com/products/pdfs/asp8.pdf>>, 20.08.2006:
- Abb 4.7 eigene Grafik, erstellt in „Apple Grapher“, „Adobe Photoshop“, und „Google SketchUp“
- Abb 4.8 eigene Grafik erstellt mittels „CARA“ und „Apple-Pages“
- Abb 4.9 eigene Grafik erstellt mittels „Google SketchUp“, „CARA“ und „Adobe Photoshop“
- Abb 4.10 Dynaudio: Placing the Monitors. In: Manual AIR monitor system.
URL:<<http://www.dynaudioacoustics.com/Default.asp?Id=413>> Letzter Zugriff 25.8.2006
- Abb 4.11 Fey, Fritz: Böse Nachbarn - Lautsprecher in feindlichem Umfeld. In: Studio Special Studiomonitring. -
Oberhausen: Studio Presse Verlag GmbH. - 2006, Studio Magazin Sonderausgabe. S.41
- Abb 4.12 Dynaudio: Placing the Monitors. In: Manual AIR monitor system.
URL:<<http://www.dynaudioacoustics.com/Default.asp?Id=413>> Letzter Zugriff 25.8.2006

- Abb 4.13 Dynaudio: Placing the Monitors. In: Manual AIR monitor system.
URL:<<http://www.dynaudioacoustics.com/Default.asp?Id=413>> Letzter Zugriff 25.8.2006
- Abb 4.14 eigene Grafik erstellt mittels „Google SketchUp“
- Abb 4.15 eigene Fotografie
- Abb 4.16 Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1.Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.149
- Abb 4.17 Henle, Hubert: Das Tonstudio Handbuch. 4. Aufl. - München: GC Carstensen Verlag, 1998, S.366
- Abb 4.18 Seite „Maskierungseffekt“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 26. Oktober 2008, 16:43 UTC. URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Maskierungseffekt&oldid=52273928> (Abgerufen: 13. Februar 2009, 17:03 UTC)
- Abb 4.19 Seeber, Bernhard <E-Mail-Adresse> : Psychoakustische Maskierung. URL: <http://www.bseeber.de/itg_page/maskierung.html>, 03.02.2006:
- Abb 4.20 Sengpiel, Eberhard <eberhard@sengpielaudio.com> : Die Anfangszeitlücke und der Naeheeindruck. URL: <www.sengpielaudio.com/DieAnfangszeitlueckeNaeheeindruck.pdf>, 20.08.2006:
- Abb 4.21 Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1.Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.71
- Abb 4.22 eigene Grafik erstellt mittels Google „SketchUp“
- Abb 4.23 eigene Grafik erstellt mittels Google „SketchUp“
- Abb 4.24 Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1.Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.71
- Abb 4.25 eigene Grafik erstellt mittels Google „SketchUp“
- Abb 4.26 eigene Grafik erstellt mittels Google „SketchUp“
- Abb 4.27 eigene Grafik, erstellt in „Apple Grapher“
- Abb 4.28 eigene Grafik, erstellt in „Apple Grapher“
- Abb 4.29 eigene Grafik erstellt mittels „Adobe Photoshop“
- Abb 4.30 eigene Grafik erstellt mittels Google „SketchUp“
- Abb 4.31 Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1.Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.114
- Abb 4.32 eigene Grafik erstellt mittels Google „SketchUp“
- Abb 4.33 eigene Grafik erstellt mittels Google „SketchUp“
- Abb 4.34 eigene Grafik erstellt mittels Apple „Pages“
- Abb 4.35 eigene Grafik erstellt mittels „Adobe Photoshop“
- Abb 4.36 Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1.Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.96

- Abb 4.37 Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1.Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.74
- Abb 4.38 Fasold, Wolfgang; Winkler, Helgo: Bauphysikalische Entwurfslehre. -1. Aufl. - Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1976, S. 88
- Abb 4.39 Prinzip Plattenabsorber
- Abb 4.40 eigene Grafik erstellt mittels Google „SketchUp“
- Abb 4.41 eigene Grafik erstellt mittels Google „SketchUp“
- Abb 4.42 eigene Grafik erstellt mittels „Adobe Photoshop“
- Abb 4.43 Fasold, Wolfgang; Winkler, Helgo: Bauphysikalische Entwurfslehre. -1. Aufl. - Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1976, S. 89
- Abb 4.44 CARA Bildschirmfoto
- Abb 4.45 CARA - Grafik
- Abb 4.46 eigene Grafik erstellt mittels Google „SketchUp“
- Abb 4.47 Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1.Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.106
- Abb 4.48 SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG : Akustic SSP 1 / SSP 2 Schallschluck-Platte .
URL:<http://www.isover.de/PortalData/1/Resources//produkte/akustic/technische_datenblaetter/TD_akustic_ssp_1_2.pdf >, 09/2005
- Abb 4.49 Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1.Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.80
- Abb 4.50 eigene Grafik basierend auf: Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1.Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.74
- Abb 4.51 eigene Grafik basierend auf: Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1.Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.74
- Abb 4.52 Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudientechnik (Band 1). - 6.Aufl. - München: K.G.Saur Verlag KG, 1997, S. 28
- Abb 4.53 eigene Grafik basierend auf: Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1.Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.74
- Abb 4.54 eigene Grafik basierend auf: Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1.Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998, S.74
- Abb 4.55 CARA Bildschirmfoto
- Abb 4.56 CARA Bildschirmfoto
- Abb 4.57 CARA Bildschirmfoto
- Abb 4.58 eigene Grafik, erstellt in CARA
- Abb 4.60 eigene Grafik, erstellt in CARA
- Abb 4.61 eigene Grafik, erstellt in CARA

Abb 4.62	eigene Grafik, erstellt in CARA
Abb 4.63	eigene Grafik, erstellt in CARA
Abb 4.64	eigene Grafik, erstellt in CARA
Abb 5.1	eigene Fotografie
Abb 5.2	eigene Fotografie
Abb 5.3	Fotografien von Ralf Jakubski
Abb 5.4	Fotografien von Ralf Jakubski
Abb 5.5	Fotografien von Ralf Jakubski
Abb 6.1	BEHRINGER Spezielle Studioteknik GmbH : Technical SpecificationsI_ECM_8000. URL: < http://www.behringerdownload.de/ECM8000/ECM8000_C_Specs.pdf >, 27.10.2008:
Abb 6.2	Bildschirmfoto „FuzzmeasurePro 3“
Abb 6.3	Müller, Swen; Masserani, Paulo: Transfer-Function Measurement with Sweeps . URL: < http://www.anselmgoertz.de/Page10383/Monkey_Forest_dt/Manual_dt/aes-swp-english.PDF >, 15.11.2008:
Abb 6.4	Liscio, Chris < website@supermegaultragroovy.com > : Getting Started with FuzzMeasure Pro. URL:< http://www.supermegaultragroovy.com/products/FuzzMeasure/gs/index.html >, 25.08.2006 :
Abb 6.5	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.6	eigene Grafik erstellt aus FuzzMeasurePro3-Datensätzen)
Abb 6.7	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.8	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.9	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.10	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.11	eigene Grafik, erstellt in Google SketchUp
Abb 6.12	eigene Fotografie
Abb 6.13	Dayton, Calvert; Wenig, Rob < info@eaw.com > : EAW Smaart 6 Operation Manual . URL: < www.eaw.com/Info/EAW_20Smaart/Manuals/Smaart6_UserManual.pdf >, Datum des Auffindens 27.10.2008:
Abb 6.14	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.15	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.16	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.17	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.18	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.19	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.20	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3

Abb 6.21	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 2.22	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.23	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.24	eigene Grafik, erstellt in Apple Numbers
Abb 6.25	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.27	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.28	eigene Fotografie
Abb 6.29	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.30	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.31	eigene Grafik, erstellt in Apple Numbers
Abb 6.32	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.33	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.34	eigene Fotografie
Abb 6.35	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.36	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.37	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.38	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.39	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.40	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.41	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.42	eigene Grafik, erstellt in „Apple Grapher“
Abb 6.43	eigene Fotografie
Abb 6.44	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.45	eigene Fotografie
Abb 6.46	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.47	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3
Abb 6.48	eigene Grafik, erstellt in FuzzMeasurePro3

9 Literaturverzeichnis

9.1 Bücher

- Görne, Thomas: Mikrophone in Theorie und Praxis, - 5. Aufl. - Aachen: Elektor-Verlag GmbH, 1994
- Görne, Thomas: Tontechnik. - 1. Aufl. - München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006
- Görne, Thomas; Bergweiler, Steffen: Monitoring. - 1. Aufl. - Bergkirchen: PPVMEDIEN, 2004
- Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudioteknik (Band 1). - 6. Aufl. - München: K.G.Saur Verlag KG, 1997
- Fasold, Wolfgang; Veres, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. - 1. Aufl. - Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998
- Fasold, Wolfgang; Winkler, Helgo: Bauphysikalische Entwurfslehre. - 1. Aufl. - Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1976
- Frieeseke, Andreas: Studio Akustik. - 1. Aufl. - Bergkirchen: PPVMEDIEN , 2006
- Görne, Thomas; Bergweiler, Steffen: Monitoring. - 8. Aufl. - Bergkirchen: PPVMEDIEN, 2004
- Günther, B. C.; Hansen, Karl-Heinz; Ivar, Veit: Technische Akustik. - 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. - Grafenau : Expert Verlag, 1982
- Henle, Hubert: Das Tonstudio Handbuch. 4. Aufl. - München: GC Carstensen Verlag, 1998
- Newell, Philip R.: Project Studios-a more professional approach. - Oxford: Focal Press, 2000

9.2 Hochschulschriften

- Wendt, Nathanael: Untersuchung der Raum- & Bauakustik des Tonstudios der Hochschule Mittweida durch akustische Vermessung, Berechnung & Simulation. Diplomarbeit, Hochschule Mittweida (FH), Fachbereich Medien, Mittweida 2004

9.3 Sonstige Schriften

- Lachmann, M.: ZÜNDSTOFF STUDIO, GOLDAU AKUSTIK-MESSBERICHT TONREGIE.
- primeline_2005_d.pdf (RIGIPS@ Produkt Katalog, siehe RIGIPS Webseite)

9.4 Zeitschriften

- Studio Special Studiomonitring. - Oberhausen: Studio Presse Verlag GmbH. -2006 Studio Magazin Sonderausgabe.
- Studio Magazin. - Oberhausen: Studio Presse Verlag GmbH. - 1999 Heft-Nr.03
- Keys. - Bergkirchen: PPVMedienGmbH. 2003 Heft-Nr.06
- Sound&Recording. - Köln: MM-Musik-Media-Verlag. 2006 Heft-Nr.04
- Sound&Recording. - Köln: MM-Musik-Media-Verlag. 2006 Heft-Nr.05
- Sound&Recording. - Köln: MM-Musik-Media-Verlag. 2006 Heft-Nr.06

9.5. elektronische Quellen

- Fuzzmeasure Pro3
- Smaart®
- CARA®
- Odeon® Room Acoustics Software
- CATT-ACOUSTIC v6.1 DEMO

9.6 Internetquellen

- http://www.soundonsound.com/sos/1997_articles/jan97/controlrooms.html?print=yes
- <http://www.electroacoustics.co.uk/article/ctrlroom.htm>
- <http://www.supermegaultragroovy.com/products/FuzzMeasure/>
- <http://www.trikustik.at/akustikplatten-zm.asp?menu=25>
- <http://www.hestudiotechnik.de/deutsch/akustik/akustik.htm>
- <http://www.archiexpo.de/architektur-design-hersteller/schalldiffusor-1510.html>
- <http://www.rhintek.com/tutorial/aura.php> (CARA)
- <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-raum-moden.htm>
- <http://www.fastaudio.com/DE/rechenservice.html>
- http://www.irt.de/IRT/FuE/ak/swf/Lautsprecher_O98.swf
- <http://www.digitalaudiorock.com/cgi-bin/qrd.cgi>
- <http://www.whealy.com/acoustics/ControlRoom.html>
- <http://www.acousticalsolutions.com/education/>
- <http://www.realtraps.com/>
- <http://www.studio-magazin.de/>
- <http://www.madisound.com/services/hifispeakerdesign.php>
- http://www.jocaviacousticpanels.com/uk/info_acoustic/index.shtml
- http://www.far-audio.com/research_dev.php
- <http://www.audio-software.de/index.html>
- <http://www.wvier.de/>
- <http://www.hunecke.de/de/wissen/index.html>
- <http://www.dr-jordan-design.de/>
- <http://www.syntheticwave.de/Anfangszeitluecke%20ITDG.htm>
- <http://www.staff.uni-mainz.de/langc/aufnahmetechnik/aufnahmeverfahren.htm>
- http://www.ak.tu-berlin.de/uploads/media/KTlv9_01.pdf
- <http://www.aes-sda.org/cms/>

- <http://www.anselngoertz.de/Page10383/page10383.html>
- <http://www.digitalaudiorock.com/>
- http://www.soundonsound.com/sos/1997_articles/jan97/controlrooms.html
- http://broadcastengineering.com/newsrooms/broadcasting_control_room_acoustics/
- <http://www.auralex.com/>
- <http://www.rpginc.com/news/library.htm>
- <http://www.mmk.e-technik.tu-muenchen.de/~tal/demos/>
- <http://www.concept-a.net/>
- <http://www.electroacoustics.co.uk/>
- <http://www.odeon.dk/?q=node/1>
- <http://www.casakustik.de/forum/index.php?action=printpage;topic=151.0>
- [www.Singermagazin.com /sm28af](http://www.Singermagazin.com/sm28af)
- Dynaudio: Placing the Monitors. In: Manual AIR monitor system.
URL:<<http://www.dynaudioacoustics.com/Default.asp?Id=413>> Letzter Zugriff 25.8.2006
- Sengpiel, Eberhard <eberhard@sengpielaudio.com> : DieAnfangszeitlücke und der Naeheeindruck. URL: <
www.sengpielaudio.com/DieAnfangszeitlueckeNaeheeindruck.pdf>, 20.08.2006:
- Thomanek, Franz <info@CARA.de> : Funktionen von CARA 2.1/2.2 PLUS. URL: <
<http://www.CARA.de/GER/CARA/index.php?load=res2d1.html>>, 20.08.2006
- Seeber, Bernhard <E-Mail-Adresse> : Psychoakustische Maskierung. URL:
<http://www.bseeber.de/itg_page/maskierung.html>, 03.02.2006:
- SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG : Akustic SSP 1 / SSP 2 Schallschluck-Platte .
URL:<http://www.isover.de/PortalData/1/Resources//produkte/akustic/technische_datenblaetter/TD_akustic_ssp_1_2.pdf>, 09/2005
- BEHRINGER Spezielle Studioteknik GmbH : Technical SpecificationsI_ECM_8000. URL: <
http://www.behringerdownload.de/ECM8000/ECM8000_C_Specs.pdf>, 27.10.2008:
- Müller, Swen; Masserani, Paulo: Transfer-Function Measurement with Sweeps . URL: <
http://www.anselngoertz.de/Page10383/Monkey_Forest_dt/Manual_dt/aes-swp-english.PDF>, 15.11.2008:
- Liscio, Chris <website@supermegaultragroovy.com> : Getting Started with FuzzMeasure Pro.
URL:<<http://www.supermegaultragroovy.com/products/FuzzMeasure/gs/index.html>>, 25.08.2006 :
- Dayton, Calvert; Wenig, Rob <info@eaw.com> : EAW Smaart 6 Operation Manual . URL:
<www.eaw.com/Info/EAW_20Smaart/Manuals/Smaart6_UserManual.pdf>, Datum des Auffindens 27.10.2008:
- Seite „Maskierungseffekt“. In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 26.
Oktober2008,16:43UTC.URL:<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Maskierungseffekt&oldid=52273928> (Ab-
gerufen: 13. Februar 2009, 17:03 UTC)
- Dexter, Tom <tdexter@digitalaudiorock.com> : QRD Diffuser Well Depth Calculator.
URL:<<http://www.digitalaudiorock.com/cgi-bin/qrd.cgi>>, 02.02.2009:
- <mail@ascendo.de>:Room-Tools_Vers.2.4.URL:<www.ascendo.de/pdf/Room-Tools_2.4_Manual.pdf>,
20.08.2008, S.22

- Diffuser_design/ Cox Salford Uni
- Diffusoren-CD__WVier
- ACOUSTIC DIFFUSERS: THE GOOD, THE BAD AND THE UGLY / T J Cox, Salford University

9.7 Online Lexikon

- <http://www.lexikon.meyers.de>
- <http://www.wikipedia.de/>

10 Erklärung zur Selbstständigkeit

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Bearbeitungsort, Datum

Unterschrift