

Charalampos Ferekidis [w vier], Uwe Kempe [w vier]

Veränderung der tieffrequenten Modenverteilung am Beispiel eines Mehrkanal-Abhörtraumes (Thomson MultiMedia Hannover)

Alteration of the low frequency Modal distribution in a multi-channel-listening room (Thomson MultiMedia Hannover)

1. Einleitung

In kleinen Abhörträumen treten, aufgrund ihrer tieffrequenten Modenverteilung, in der Regel Probleme bei der raumakustischen Gestaltung auf. Die für eine gleichmäßige Verteilung tieffrequenter Moden ausschlaggebende Geometrie ist oft durch bauliche oder andere Gegebenheiten weitestgehend vorbestimmt. Die Folge sind starke, ortsabhängige Schwankungen im tieffrequenten Übertragungsverhalten eines Raumes. Um diese Problematik bereits im Vorfeld zu umgehen, ist deshalb eine frühzeitige Auseinandersetzung mit der zu erwartenden Modenstruktur und möglichen Optimierungsansätzen erforderlich.

Der Bezug eines neuen Gebäudekomplexes war für die Firma Thomsen MultiMedia Hannover Anlaß die Planung für einen Mehrkanal-Abhörtraum aufzunehmen. Die baulichen Voraussetzungen, dieses als Bürogebäude ausgelegten Komplexes, machten eine intensive Vorplanung bezüglich der Realisierungsmöglichkeiten des Abhörtraumes erforderlich.

2. Bauliche und geometrische Voraussetzungen

Bürogebäude sind zwangsläufig nach den Erfordernissen der Nutzung als Büroflächen ausgelegt und bieten damit keine günstigen Voraussetzungen für die Planung und Gestaltung eines Abhörtraumes. Dies gilt sowohl für die Störschallverhältnisse, sprich die Bauakustik, wie auch die Raumakustik. So befindet sich der geplante Abhörtraum auf einer Etage zusammen mit Büroräumen in einer vorgegebenen Bausubstanz und Flächenaufteilung. In Abbildung1 ist die räumliche Situation dargestellt. Grundstruktur des Gebäudes bildet ein Stahlbetongerüst, daß an den Außenwänden durch Fensterflächen abgeschlossen wird.

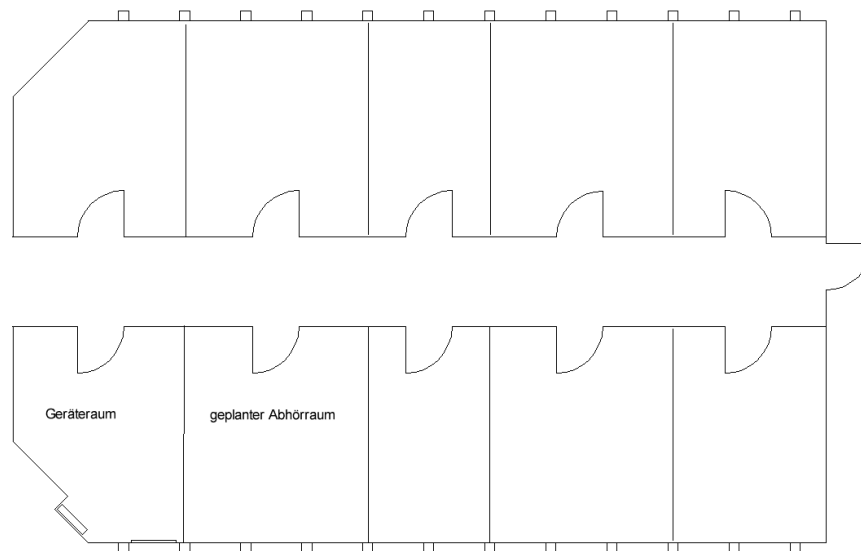


Abbildung 1: Gebäudeetage mit Büroräumen und geplantem Mehrkanal-Abhörraum

Die längs verlaufenden Wände im Innenbereich sind als tragende Wände ausgelegt, wohingegen die Raumaufteilung in Trockenbau ausgeführt ist. Der Deckenbereich ist mit einer durchgehenden Standardabhängendecke versehen. Die Begutachtung der baulichen Substanz und Struktur machte schnell deutlich, daß an die Schallisolation des geplanten Abhörspaces keine all zu hohen Anforderungen gestellt werden konnten. Dies war vor allem auf die fehlende Kontrolle über die Körperschallstrecken im Gebäude wie auch die statischen Voraussetzungen zurückzuführen.

Um einem zu starken Absinken der Nachhallzeiten bei tiefen Frequenzen und einem schlechten Störschallverhältnis, bedingt durch die Trockenbauweise und evtl. Verbindungsvolumen, vorzubeugen, konnte zumindest die Option einer zweiseitigen Raumabtrennung mit Gasbetonwänden erreicht werden.

Für den eigentlichen Abhörraum stellten jedoch die vorliegenden, weitgehend unveränderlichen Abmessungen das Hauptproblem dar. Neben der Tatsache, daß ein Volumen von $4,86 \times 4,5 \times 2,5 (2,75) \text{m}^3$ für die Nutzung als Mehrkanal-Abhörraum sehr klein dimensioniert ist, ergeben sich besonders durch die ungünstigen Proportionen des Raumes Einschränkungen in der zu erwartenden Übertragungscharakteristik für tiefe Frequenzen.[3], [4]. Bedingt durch die Seitenverhältnisse von 1,8:1,6:1 (Länge:Breite:Höhe) ergibt sich eine ungleichmäßige, Modenverteilung im Raum. Diese ist in Abbildung 2 bis zu einer Frequenz von 285Hz dargestellt.

Man erkennt, daß unterhalb von 100 Hz sowohl die Dichte der auftretenden Moden gering ist, als auch ihre Verteilung ungleichmäßig ausfällt.

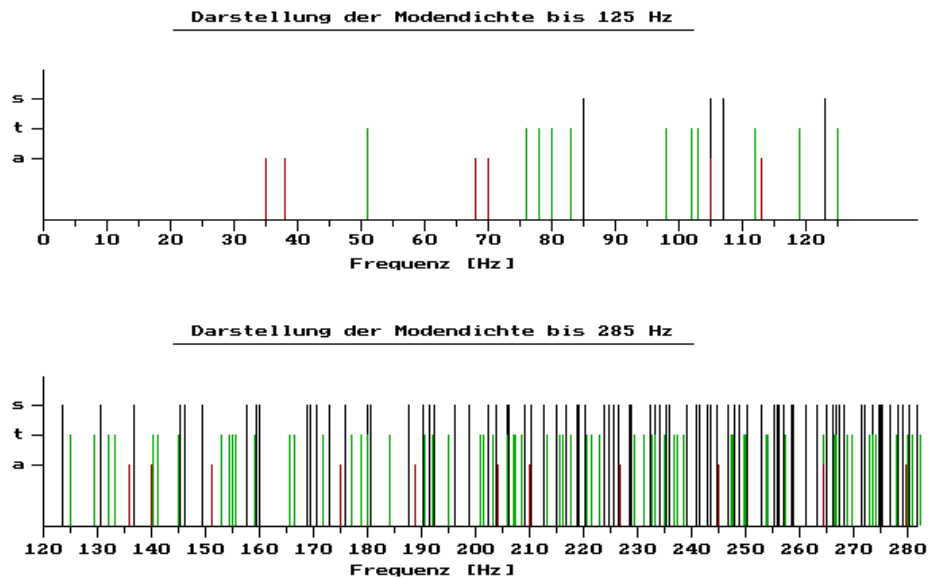


Abbildung 2: Modendichte eines rechteckigen Raumes mit 4,86x4,5x2,5m bis zu einer Frequenz von 285Hz
 "a" = Axialmoden, "t" = Tangentialmoden, "s" = Schräge Moden

Aufgrund dieser Eigenschaften und um einen Eindruck von der voraussichtlichen Übertragungsqualität des geplanten Abhörzimmers zu gewinnen, wurden für einige typische Abhörordnungen im Raum die zu erwartenden Übertragungsfunktionen simuliert. Abbildung 3 zeigt die simulierte Übertragungsfunktion für den linken, vorderen Kanal

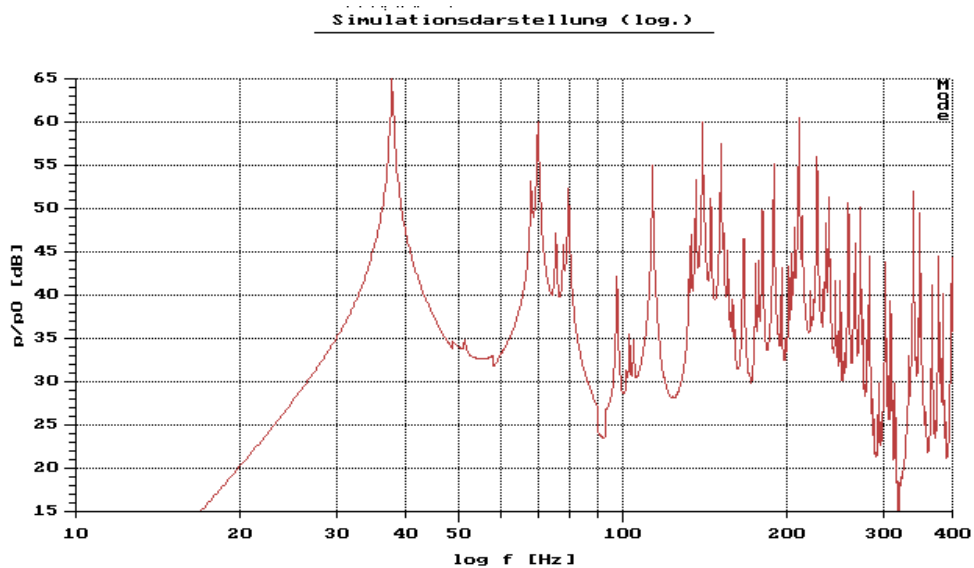


Abbildung 3: Simulation des ungedämpften Gesamtschalldruckes einer "typischen" Lautsprecher-Hörer-Anordnung (linker vorderer Kanal) für den geplanten, rechteckigen Abhörzimmers mit 4,86x4,5x2,5m.

Aus dieser Charakteristik wird ersichtlich, daß bei den vorliegenden Abmessungen des Raumes keine hinreichend hohe Übertragungsqualität zu erreichen ist. Durch eine starke Bedämpfung des Raumes bei tiefen Frequenzen könnten sowohl die ausgeprägten Pegelschwankungen als auch die Ortsabhängigkeit des Übertragungsverhaltens reduziert werden. Das grundsätzliche Probleme mit den "Modenlücken" würde aber nicht beseitigt. Darüber hinaus würde das Gesamtverhältnis des Nachhalles im Raum auf einem sehr niedrigen Niveau festgelegt werden.

Als möglicher Lösungsansatz bot sich die Verschiebung der Trennwand zum, neben dem Abhörraum vorgesehen Geräteraum, an. Aufgrund der im Geräteraum geplanten Einrichtung wäre somit eine maximale Vergrößerung einer Raumdimension des Abhörraumes von 4,5m auf 5,35m realisierbar. Die Überprüfung der Modenverteilung und Simulation der Übertragungseigenschaften dieses neuen Raumes ergab jedoch keine entscheidenden Verbesserungen der Situation, so daß hier über grundlegend andere Lösungsansätze nachgedacht werden mußte.

3. Raumkonzept und Realisierung

Wesentliches Ziel der Überlegungen zum Konzept des Raumes mußte die Verbesserung der Modenverteilung unter Beibehaltung der grundsätzlich möglichen Abmessungen sein. Hinweise und Verfahren zur Beeinflussung der Modenstruktur eines Raumes mittels geometrischer Veränderungen wurden bereits in der Literatur beschrieben [1] und im praktischen Einsatz ausgeführt [2]. Die Einführung eines tieffrequenten Diffusorprofiles in einer Dimension des Raumes bietet die angestrebten Eigenschaften.

Als Ausgangspunkt der Planungs- und Realisierungsarbeiten zum Mehrkanalabhörraum stand somit die Auslegung und Dimensionierung eines solchen Diffusorprofiles unter den vorliegenden geometrischen Bedingungen. Dabei war es erforderlich, die speziellen Anforderungen der Geräteausstattung für den Abhörraum und den Geräteraum mit in die Realisierung einzubeziehen um eine möglichst hohe Integration sicherzustellen und unnötigen Volumenverlust zu vermeiden. Daneben waren eine Reihe weiterer raumakustischer und praktischer Vorgaben zu erfüllen. Diese lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. Raumnutzung sowohl als Mehrkanal-Abhörraum wie auch als Besprechungsraum

2. Raumakustische Bedingungen vorwiegend für 5.1 Abhörsituation ausgelegt:
 - a. Minimale, reflexionsarme Initialzeit von 6ms für alle fünf Hauptkanäle bei einem Hörerfeld bis 6 Personen (gute Lokalisation für alle Richtungen).
 - b. Angestrebte RT60 zwischen 0,25-0,3 Sekunden von 125Hz-8kHz bei einem ausgeprägtem Diffusschallfeld (bei geringer Raumgröße guter virtueller Raumeindruck und nicht zu "trockener" Charakter" für Besprechungen)
 - c. Maximale Pegelschwankungen von +/- 5dB im Übertragungsverhalten aller 5 Kanäle zwischen ca. 100Hz-10kHz
 - d. Stetiger, leichter Anstieg der Nachhallzeiten unter 125Hz und eine gleichmäßige Übertragungscharakteristik für eine markante Tieftonwiedergabe (vor allem bei Filmtönen)
3. Integration des Centerkanals und des Bildgerätes in die raumakustische Konstruktion
4. Beibehaltung des Deckenrasters der ursprünglichen, abgehängten Decke
5. Zugänglichkeit der Fensterflächen und weitgehende Erhaltung des Tageslichteinfall

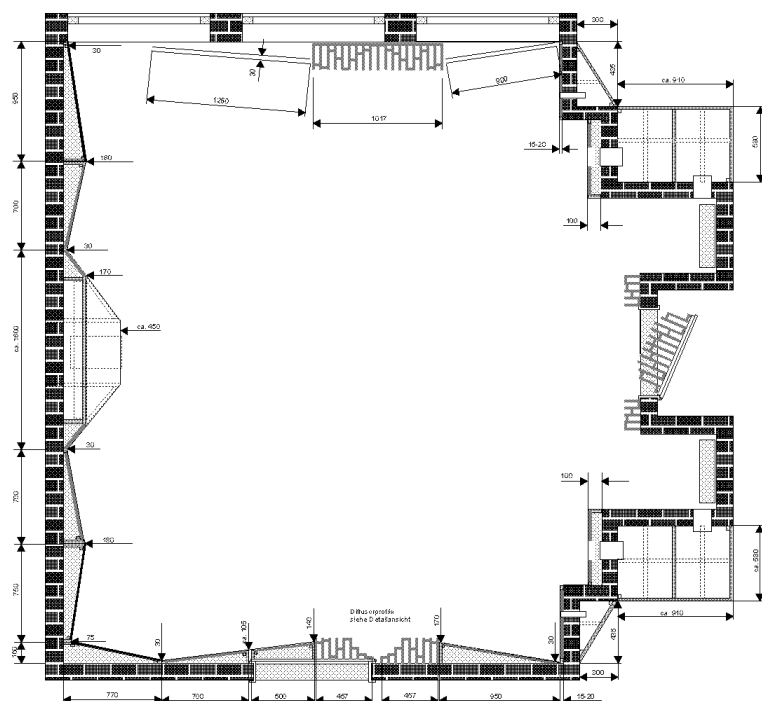


Abbildung 4: Grundrisschema des Mehrkanal-Abhörzimmers mit der optimierten geometrischen Form und der raumakustischen Oberflächengestaltung

Diese Anforderungen fanden ihren Eingang in ein raumakustisches Konzept, daß in der Abbildung 4 im Grundriß des Raumes schematisch dargestellt ist. Die in Gasbeton gemauerte Trennwand zum Geräteraum ist in Form eines eindimensionalen "QRD"-Diffusorprofiles [3] ausgeführt und beinhaltet, vom Abhörraum zugängliche Geräteschränke, sowie darüber angeordnete Helmholtz-Resonatoren im Geräteraum. Die profilierte, reflexionssteuernde Oberflächengestaltung der Wände beinhaltet ein- und zweidimensionale Diffusflächen sowie spezielle Absorberflächen für mittlere und tiefe Frequenzen. Im Bereich der Fensterflächen wird eine mobile, raumakustische Gestaltung mit lichtdurchlässiger "Microsorberfolie ®" und eindimensionaler Diffusfläche eingesetzt. Das Abhängesystem der Decke wird weiter verwendet und durch entsprechende Einlagen (zweidimensionale Diffusoren, geschlossene und perforierte Platten) ergänzt und verändert. Ein Plasmabildschirm mit entsprechender Be- und Entlüftung sowie der Centerkanal (Abstrahlverhalten entzerrt) sind konstruktiv in die Gestaltung der Stirnwand eingebunden.



Abbildung 5: Strinwandseite des Abhörspaces mit linkem, rechten und integriertem Centerkanal



Abbildung 6: Rückwandansicht mit den hinteren Kanälen und der tieffrequenten Diffusorprofilierung der Rückwand

Der besondere geometrische Aufbau der Rückwand des Abhörraumes besitzt neben den praktischen Vorzügen der Integration von Geräten und raumakustischen Funktionen nun auch die geforderte Eigenschaft die Modenverteilung und Modendichte des Raumes und damit die Übertragungseigenschaften bei tiefen Frequenzen zu verbessern, ohne das eine Volumenvergrößerung nötig wird. Die Dimensionierung der Diffusstruktur wurde so vorgenommen, daß ein guter Kompromiß zwischen der Wirkungsbandbreite der Struktur und ihrer geometrischen Ausdehnung erreicht wurde. In Abbildung 7 sind die simulierte Übertragungsfunktion des rechteckigen Raumes und die gemessene Übertragungsfunktion des Rohraumes mit profilierter Rückwand für die, bereits unter Abbildung 3 gültige Lautsprecher - Hörer – Anordnung dargestellt. Man erkennt, daß zwischen der ersten Tangentialmode des Raumes (110 Mode ca. 51Hz) und 100Hz die Modendichte zugenommen hat und darüber hinaus eine gleichmäßigere Anregung dieser Moden statt findet. Durch einbringen der Diffusstruktur wurden also die Voraussetzungen für ein gleichmäßiges Übertragungsverhalten im Raum in einem Maße gesteigert, wie dies unter Beibehaltung des ursprünglichen Grundrisses nicht möglich gewesen wäre.

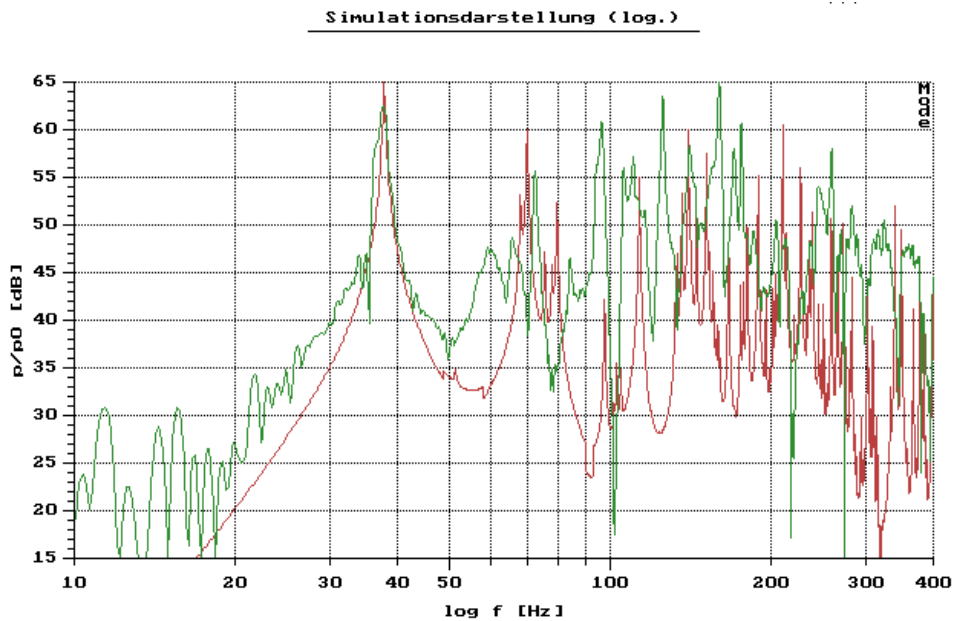


Abbildung 7: Vergleich des simulierten (rechteckiger Raum) und gemessenen (profilierter Raum) Gesamtschalldruckes für eine typische Lautsprecher-Hörer-Anordnung (linker vorderer Kanal)

4. Raumakustische Bedingungen

Die unter 3. beschriebenen Maßnahmen bilden die Basis für die Einstellung der geforderten, raumakustischen Bedingungen. Diese sind in den Abbildungen 8-14 dokumentiert.

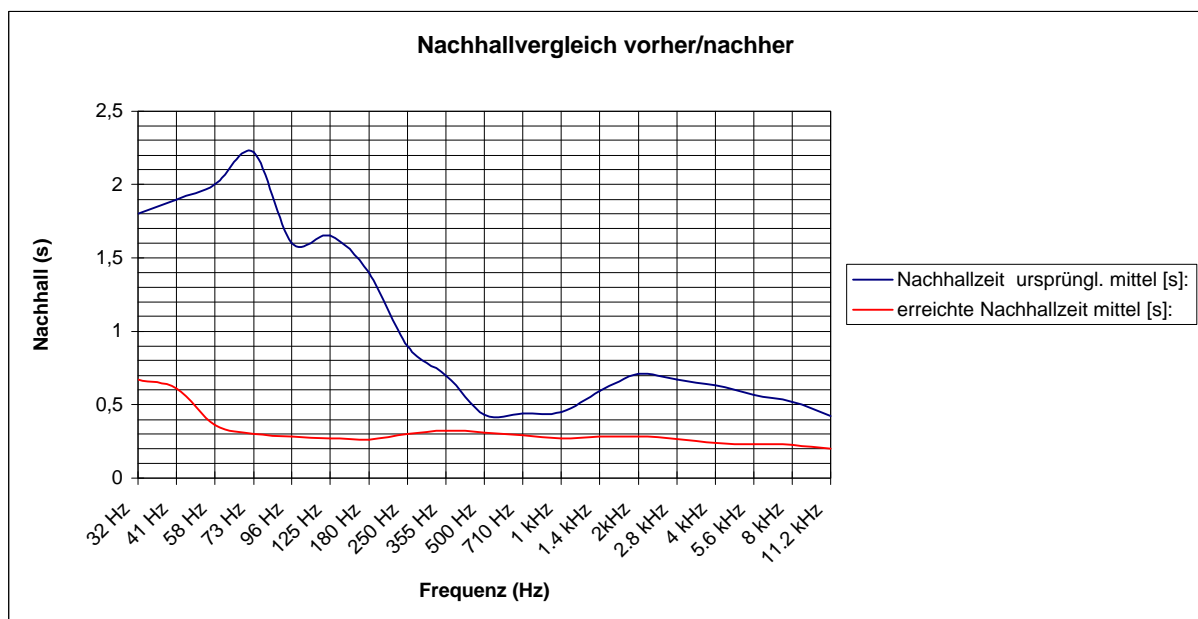
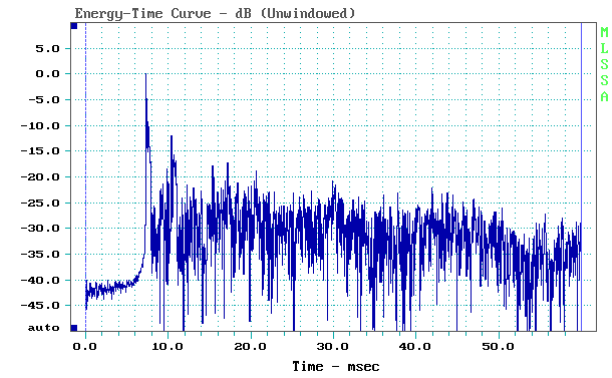
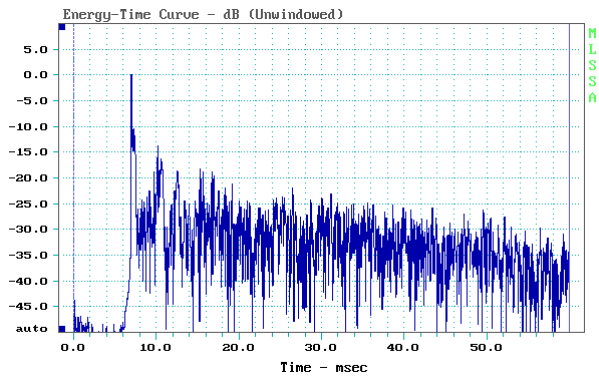
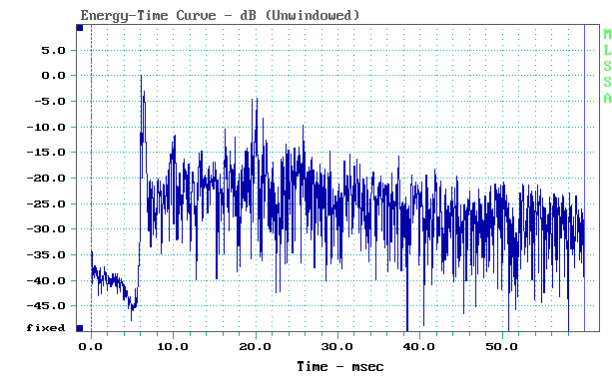
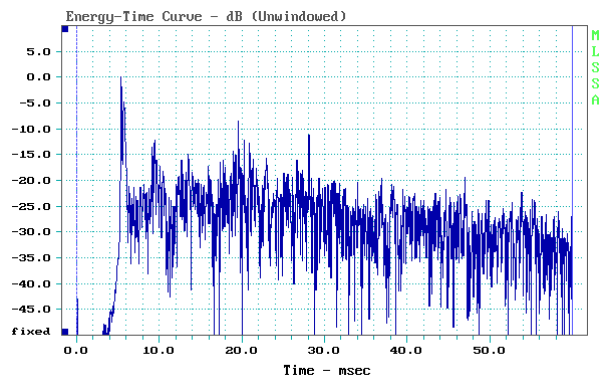


Abbildung 8: Vergleich der Nachhallzeiten des Abhörraumes im Rohzustand (blau) und mit raumakustischer Gestaltung (rot) für alle fünf Kanäle/Positionen gemittelt



Abbildungen 9 und 10: ETC-Diagramme des vorderen linken (links) und vorderen rechten (rechts) Lautsprecherkanals für eine Beispielposition im Hörfeld des Raumes



Abbildungen 11 und 12: ETC-Diagramme des hinteren linken (links) und hinteren rechten (rechts) Lautsprecherkanals für eine Beispielposition im Hörfeld des Raumes

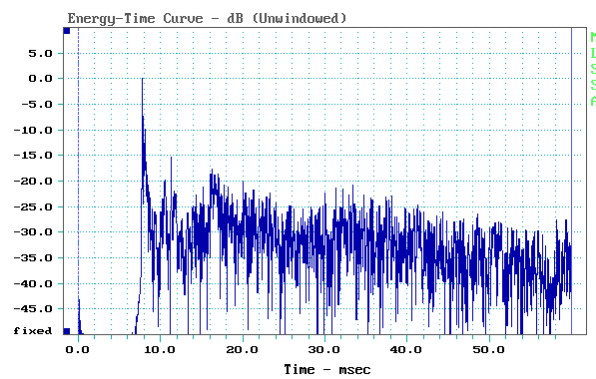


Abbildung 13: ETC-Diagramm des integrierten Centerkanals für eine Beispielposition im Hörfeld des Raumes

Die ETC-Diagramme zeigen die weitgehend unterdrückten, frühen Primärreflexionsanteile (vordere Kanäle ca. 8ms, hintere Kanäle ca. 12ms) sowie die ausgeprägten, darauf folgenden Diffusschallanteile für die fünf Lautsprecherkanäle. Der Diffusschallanteil der rückwärtigen

Kanäle ist stärker ausgebildet, was zusammen mit der etwas größeren Initialzeit trotz des geringeren Wandabstandes der Lautsprechersysteme einen hohen virtuellen Raumeindruck bei gleichzeitig guter Lokalisation vermittelt.

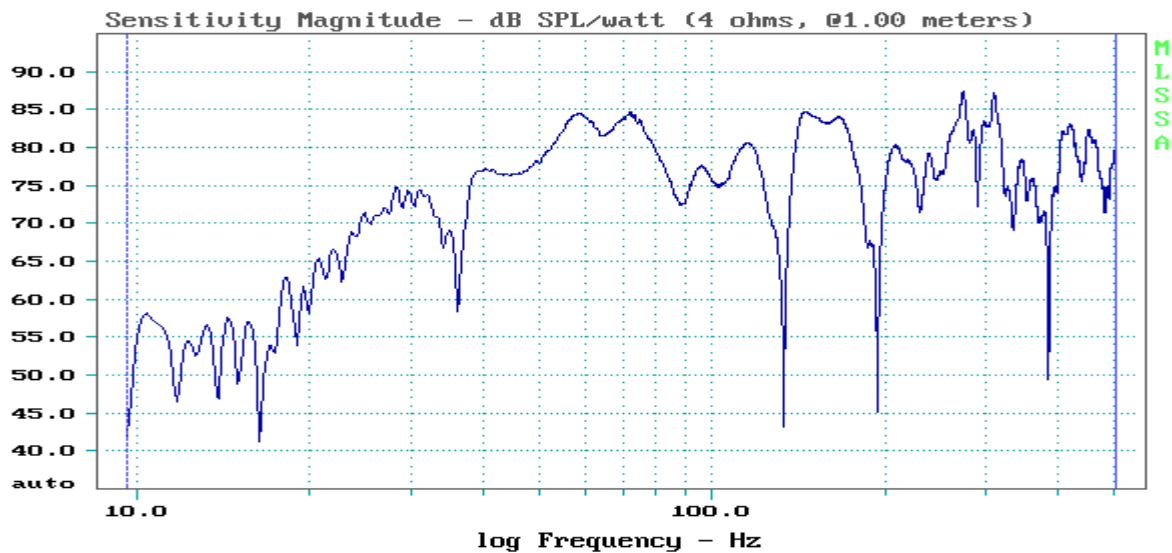


Abbildung 14: Gemessene, ungeglättete Übertragungscharakteristik bei tiefen Frequenzen, beispielhaft für den linken hinteren Kanal und einen Subwoofer (positioniert im Stirwandbereich zwischen Center und Links)

Die im Raum erreichbare Übertragungscharakteristik für tiefe Frequenzen wird in Abbildung 14 verdeutlicht. Es zeigt sich eine gleichmäßige Anregung der Raummoden mit Schwankungen des Schalldruckpegels innerhalb des Toleranzband von ± 5 dB.

Gleichzeitig wird eine grundlegende Problematik im 5.1 Betrieb eines Abhörraumes deutlich. Auffällig sind, die trotz Subwoofer geringe Anregung der Grundmoden (100/010 ca. 30-40Hz) im Raum und die zwischen 50-80Hz erkennbare Pegelbetonung. Beide Phänomene entstehen durch den Betrieb der Hauptkanäle als Vollbereichssystem. Je nach zugeordneten Signalanteilen für die einzelnen Kanäle kommt es so zu starken Überlappungsbereichen mit dem Subwoofer. Die Modenanregung im Raum wird somit durch mehrere Schallquellen bestimmt, so daß der Summenschalldruck nun vom Standort und der Phasenlage der Quellen zueinander bestimmt wird. Im vorliegenden Fall befinden sich die Schallquellen für die Grundmoden in entgegengesetzten Druckphasen - die Anregung ist somit gering. Für den betonten Pegelbereich kommt es zu einer gleichphasigen Anregung und die Anteile der Einzelquellen addieren sich. Neben den Schwankungen im Pegelverhalten ist außerdem eine Störung der Impulswiedergabe für tiefe Frequenzen zu verzeichnen.

Dieses Verhalten gibt Anlaß die frequenzmäßige und standortbezogene Ansteuerung der einzelnen Wiedergabekanäle eines Mehrkanalsystems (z.B. 5.1) zukünftig genauer zu untersuchen und stellt einen weiteren Aspekt in der Beurteilung der tieffrequenten Übertragungsqualität eines Raumes dar.

5. Zusammenfassung

Die Übertragungseigenschaften eines Raumes bei tiefen Frequenzen werden maßgeblich von der Modenverteilung und der Modendichte bestimmt. Am Beispiel eines Mehrkanal-Abhörtraumes wurde ein alternativer Lösungsansatz aufgezeigt, mit dessen Hilfe die durch ungünstige Raumgeometrie bedingte ungleichmäßige Modenverteilung, im Rahmen der baulichen Rahmenbedingungen verbessert werden kann.

Die geometrische Gestaltung mittels tieffrequenter Diffusorprofile im Abhörtraum ist ein effektives Mittel das Modenverhalten eines Raumes zu beeinflussen. Somit kann auch bei vorgegebenen, schlechten geometrischen Raumverhältnissen eine, den Anforderungen entsprechende, gute akustische Abhörsituation geschaffen werden. Gleichzeitig wird ein überdämpfen des Raumes vermieden, so daß auch höhere Nachhallzeiten einstellbar sind.

Neben den grundlegenden, raumakustischen Bedingungen hat sich jedoch auch gezeigt, daß gerade bei Mehrkanalsystemen die Ansteuerung der einzelnen Kanäle und deren räumliche Orientierung zueinander für die tieffrequente Anregung eines Abhörtraumes von großer Bedeutung ist. Dies sollte bei der frequenzmäßigen Zuordnung von Signalanteilen und den Betriebsbandbreiten der jeweiligen Lautsprechersysteme berücksichtigt werden. Hier bieten sich in der Zukunft noch Felder für weitergehende Untersuchungen.

Literaturhinweise

- [1] J.A.S. Angus, A.C.Marvin, J.Clegg, J.F. Dawson an A.Knobloch, The Effect of Acoustic Diffusors on Room Mode Decay, AES Preprint 99th Convention Oct. 1995
- [2] H. Kolbe, Acoustic Design des IMAX-Theaters imVerkehrshaus Schweiz/Luzern, DAGA 98
- [3] M. M. Loudon, Dimension-Ratios of Rectangular Rooms, *ACUSTICA*, Vol.24, 1971
- [4] O. J.Bonello, A New Criterion for the Distirbution of Normal Room Modes, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 29, No. 9, 1981 September.