

Interaktion von Lautsprecher und Raum im Tonstudio (*Loudspeaker - Room Interaction*)

*Anselm Goertz **, *Michael Makarski ***

* TU Berlin (Fachgebiet Audiokommunikation) und IFAA, anselm.goertz@ifaa-akustik.de

** IFAA (Institut für Akustik und Audiotechnik), michael.makarski@ifaa-akustik.de

Kurzfassung

Neben dem Frequenzgang auf Achse und den Verzerrungswerten gehört die Directivity zu den wichtigsten technischen Eigenschaften eines Lautsprechers. Die Directivity eines Lautsprechers bestimmt in welchem Maße der umgebende Raum angeregt wird und kann deshalb als ein signifikanter Einflussfaktor der Raumakustik betrachtet werden. Für den Entwickler und auch für den Anwender stellt sich daher die Frage, welche Directivity für eine bestimmte Raumakustik die besten Ergebnisse liefert und ob eine generelle Aussage möglich ist, welche Directivity bei der Konstruktion eines Studiomonitors anzustreben ist.

1. Einleitung

Die Interaktion zwischen Lautsprecher und Wiedergaberaum ist in der Vergangenheit immer wieder Thema verschiedenster Publikationen und Diskussionsrunden gewesen. Dabei wurden je nach Anlass und Background der Autoren unterschiedliche Schwerpunkte der Thematik behandelt. So wird in [1] beispielsweise der Einfluss des Wiedergaberaums auf die Lautsprechereigenschaften untersucht oder in [2] gar ein Konzept vorgestellt, das Lautsprecher und Raum als komplett integriertes System behandelt. Eine umfassende Zusammenfassung zu dem Thema ist der Beitrag [3], wobei hier neben den Grundlagen zur Raumakustik kleiner Räume schwerpunktmäßig psychoakustische Aspekte untersucht werden. Andere Autoren untersuchen spezielle Anordnungen zur Verbesserung der Wiedergabe, wie zum Beispiel die Anwendung von Bass Arrays in Abhörräumen [4] oder den Einsatz von Dipol-Lautsprechern [5].

In diesem Beitrag ist der thematische Schwerpunkt die Interaktion der Raumakustik mit dem Abstrahlverhalten des Lautsprechers. Anlass diese Thematik zu vertiefen war u.a. eine ausführliche, seit 2006 andauernde Testreihe zu Studiomonitoren in einer Fachzeitschrift. Vergleicht man die dort veröffentlichten gemessenen Abstrahlverhalten der Lautsprecher, so fällt auf, dass eine große Diversität an Abstrahleigenschaften vorherrscht. Interessanterweise ist es nicht möglich hier eine Abhängigkeit der Abstrahlungseigenschaften vom Preis des Lautsprechers oder vom gedachten Anwendungszweck auszumachen. Das ist schon etwas erstaunlich, da beispielsweise im professionellen Beschallungsbereich dem Abstrahlverhalten der Lautsprecher eine sehr hohe Aufmerksamkeit zukommt, und folglich in der Entwicklung durch entsprechende Maßnahmen und numerische Optimierungen auch berücksichtigt wird. Es stellt sich damit aus Sicht des Anwenders, aber auch aus Sicht des Lautsprecherentwicklers, die Frage, wie die Directivity eines Studiomonitors aussehen sollte, um im Zusammenspiel mit der Akustik des Abhörraumes zu einem optimalen Ergebnis zu führen.

Es werden zunächst die raumakustischen Grundlagen der Lautsprecher-Raum-Interaktion erläutert. Daraus lassen sich dann bereits grundlegende Forderungen an das Abstrahlverhalten und mögliche raumakustische Maßnahmen formulieren. Anhand von Beispielmessungen in einem kleinen Abhörraum wird gezeigt, wie sich Unterschiede in der Directivity in der praktischen Anwendung auswirken.

2. Grundlagen

2.1. Zusammenhang zwischen Raumvolumen, Nachhallzeit und modaler Dichte

Ein für professionelles Abhören hergerichteter Raum unterscheidet sich zu den in der Raumakustik normalerweise behandelten Räumen, wie Konzertsälen, Sitzungsräumen, usw., im Wesentlichen durch ein deutlich kleineres Volumen und eine geringere Oberfläche sowie eine erheblich stärkere Bedämpfung. Dadurch ergibt sich, dass nicht der ganze Audiofrequenzbereich mit den Methoden der statistischen Raumakustik behandelt werden kann, sondern nur der Frequenzbereich, der auch tatsächlich ein hinreichend diffuses Schallfeld vorweisen kann. Diese Grenzfrequenz wird als Schröder-Frequenz bezeichnet und ist so definiert, dass ab dieser Frequenz mindestens drei Eigenfrequenzen des Raumes innerhalb der Halbwertsbreite einer Raumresonanz liegen [6]. Die Schröder Frequenz kann näherungsweise durch

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (1)$$

berechnet werden. V ist das Raumvolumen in m^3 und T die Nachhallzeit des Raumes in s. Für einen kleinen Abhörraum mit 50 m^3 Raumvolumen und einer mittleren Nachhallzeit von $0,4 \text{ s}$ ergibt sich nach der Schröder-Formel, dass ab einer Frequenz von ca. 180 Hz das Schallfeld als diffus zu betrachten ist. Im Bereich unter der Schröderfrequenz ist die modale Dichte, also die Anzahl der Eigenfrequenzen des Raumes bezogen auf die Frequenz, so niedrig, dass statistische Methoden nicht angewendet werden können.

Abb. 1 zeigt eine Frequenzgangmessung in einem kleinen Abhörraum. Es ist gut zu erkennen, dass im tieffrequenten Bereich einzelne Eigenfrequenzen dominant sind und dass ab ca. 200 Hz die Eigenfrequenzdichte ansteigt. *Abb. 2* zeigt noch mal den Frequenzbereich bis 1000 Hz mit linearer Frequenzachse für 3 Mikrofonpositionen.

An dieser Stelle ist noch anzumerken, dass die unreflektierte Anwendung geometrischer Methoden in kleinen Räumen u.U. zu falschen Resultaten führt. Das ist z. B. darauf zurückzuführen, dass Welleneffekte (Beugung und Interferenz) aufgrund der verhältnismäßig kleinen Abmessungen von Wänden, Diffusoren und Absorbern deutlich stärker zu Gewichten sind, als dies in großen Räumen der Fall ist [7].

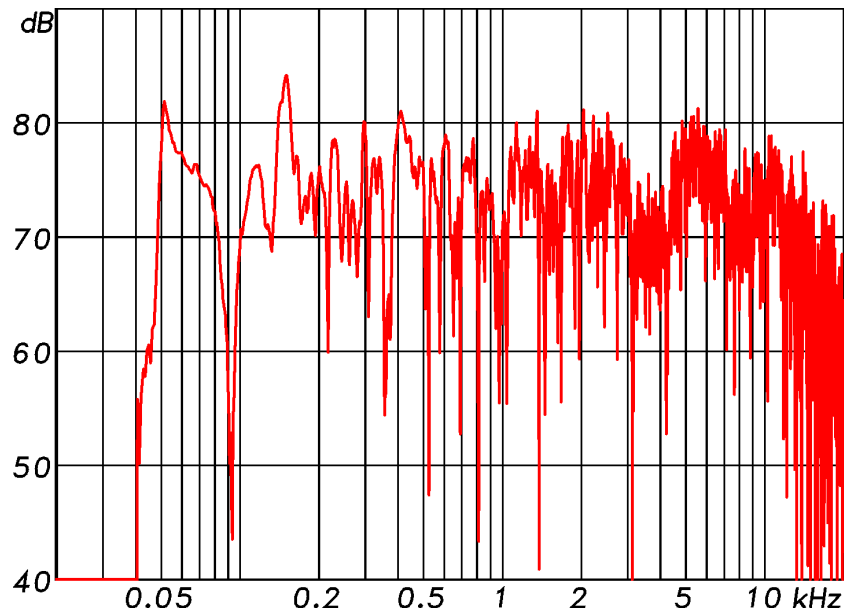


Abb. 1: Frequenzgang an einer Mikrofonposition in der Nähe des Hörerplatzes in einem ca. 50 m³ großen Abhör室. Die Nachhallzeit des Raumes beträgt ab 250 Hz aufwärts konstant 0,2 s und steigt unterhalb von 250 Hz auf ca. 0,4 s bei 125 Hz an.

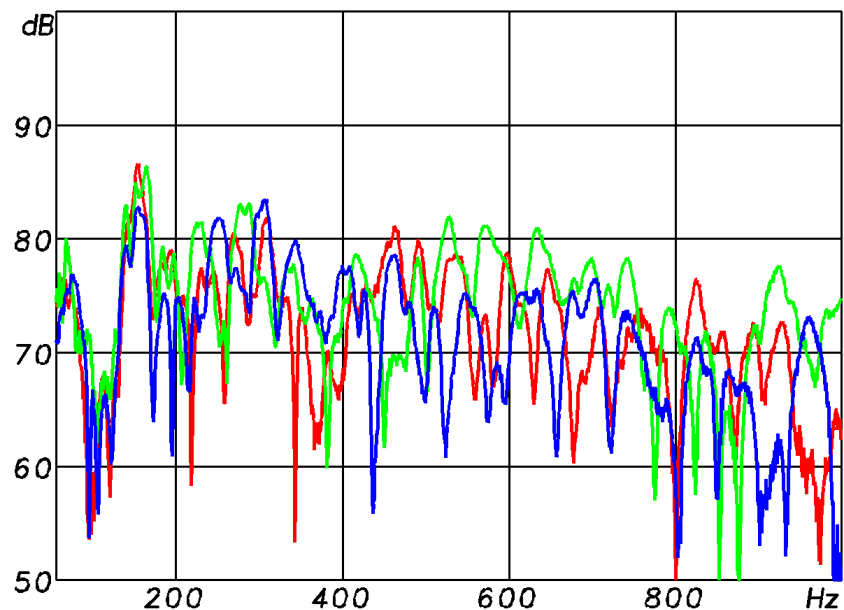


Abb. 2: Frequenzgänge an drei verschiedenen Mikrofonposition um den Hörerplatz dargestellt mit einer linearen Frequenzachse

2.2. Directivity des Lautsprechers und Diffusfeldfrequenzgang

Jeder reale Schallwandler erzeugt ein Schallfeld, das mehr oder weniger stark von einem omnidirektionalen Schallfeld, also dem Schallfeld einer idealisierten Punktquelle, abweicht. Zur Beschreibung der richtungs- und frequenzabhängigen Schallfeldeigenschaften können verschiedene Darstellungen herangezogen werden. Zur Darstellung der Richtwirkung in einer Messebene um den Lautsprecher können unter anderem sogenannte Isobarendiagramme verwendet werden. Abb. 3 zeigt beispielhaft solch ein Diagramm. Für diese Beispielmessung

liegen die Messpunkte auf einem Kreis mit einem Radius von 4 m um den Lautsprecher. Der Winkelabstand benachbarter Messpunkte beträgt 5°. Für andere Lautsprechertypen und Anwendungen können auch andere Messentfernungen und feinere oder auch gröbere Winkelauflösung für die Isobarendiagramme genutzt werden. Die an diesen Messpunkten gemessenen Frequenzgänge werden zunächst auf den Mittelachsenfrequenzgang (Hauptabstrahlrichtung) bezogen und dann über Winkel und Frequenz dargestellt. Die Farbübergänge zeigen Frequenz-Winkelpaare konstanten Drucks an. So kann auf einen Blick, wie z.B. im dargestellten Isobarendiagramm aus *Abb. 3* abgelesen werden, dass in einem Winkelbereich von $\pm 30^\circ$ um die Mittelachse für den gesamten Frequenzbereich keine Abweichungen größer -3 dB vom Achsenfrequenzgang auftreten (orange Fläche im Diagramm).

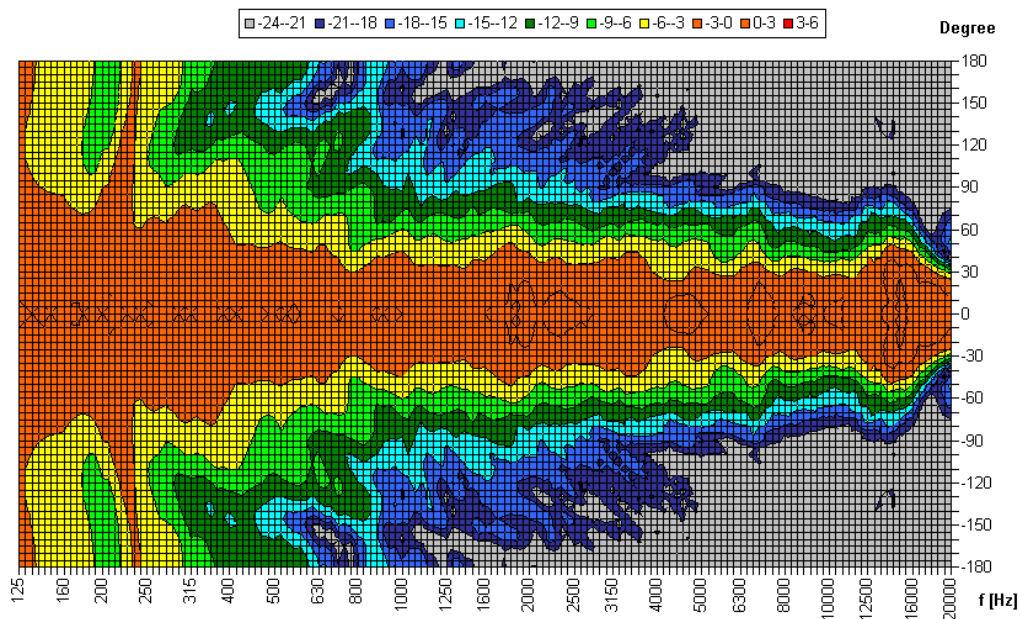


Abb. 3: Abstrahlverhalten in der Horizontalebene als Isobarendiagramm

Zur Charakterisierung des gesamten räumlichen Abstrahlverhaltens müssen die Frequenzgänge auf einer Kugeloberfläche um den Lautsprecher erfasst werden. Diese sogenannten Balloon-Daten können jedoch nur frequenzselektiv ähnlich wie Polardiagramme dargestellt werden und erlauben keinen Überblick über den gesamten Frequenzbereich. Für eine schnelle Übersicht haben sich daher Isobarenkurven der horizontalen und vertikalen Ebene sehr gut bewährt.

Betrachtet man zunächst nur den Einfluss des Lautsprechers auf das diffuse Schallfeld, also im Frequenzbereich deutlich über der Schröderfrequenz, so ist nicht das Abstrahlverhalten im Detail maßgeblich, sondern die über der Frequenz abgestrahlte Leistung (Leistungsfrequenzgang) des Lautsprechers. Anschaulich lässt sich das so verstehen, dass die vom Lautsprecher abgestrahlte Schallenergie im stationären Fall mit der durch Absorption vernichteten Energie im Gleichgewicht ist, also ein Schallfeld konstanter Energiedichte vorherrscht. Die Diffusfeldenergiedichte w ist proportional zur vom Lautsprecher abgestrahlten Leistung P und umgekehrt proportional zur äquivalenten Absorptionsfläche A .

$$w = \frac{4P}{cA} \quad (2)$$

Um einen linearen Diffusfeldfrequenzgang zu erzielen, ist es erforderlich den Quotient von abgestrahlter Leistung und äquivalenter Absorptionsfläche konstant zu halten. Da sowohl Hersteller von Absorbern, als auch die Hersteller von Studiolausprechern um eine größtmögliche Kombinationsfreudigkeit von Raum und Lautsprecher bemüht sein sollten, kann man von dieser einfachen Überlegung ableiten, dass der Lautsprecher einen möglichst gleichmäßigen Leistungsfrequenzgang haben sollte und dass das im Raum eingesetzte Material zu einem frequenzkonstanten Absorptionsverhalten führen sollte.

Der Leistungsfrequenzgang kann z. B. aus einer Balloon-Messung durch Integration der über die Kugeloberfläche interpolierten und quadrierten (Fernfeld-) Schalldruckfrequenzgänge berechnet werden. Bezieht man die auf Mittelachse gemessene (Fernfeld-) Intensität I_{max} auf den auf die Kugeloberfläche normierten Leistungsfrequenzgang, so erhält man den Bündelungsgrad.

$$\gamma = \frac{\oint_S p_0^2 dS}{\oint_S p^2(\vartheta) dS} = \frac{I_{max} S}{P} \quad (3)$$

Wenn jetzt gefordert wäre, dass Achsenfrequenzgang **und** Diffusfeldfrequenzgang beide möglichst linear sein sollen, so entspricht das der Forderung nach einem möglichst frequenzunabhängigem Bündelungsgrad. Da sich beide Größen bei einer Frequenzgangkorrektur mittels elektrischer Filterung immer im gleichen Maße ändern, ist dies eine Eigenschaft die am Lautsprecher konstruktiv vom Hersteller umgesetzt sein muss.

2.3. Directivity, Direktschall und frühe Reflexionen

Gerade in kleineren Abhörräumen sind sowohl die Abstände vom Hörer zum Lautsprecher, als auch die Abstände zu reflektierenden Begrenzungen recht gering. Bei einem Hörabstand von 4 m erreicht der Direktschall den Hörer nach ca. 11,8 ms. Bei einem Wandabstand von 2 m kommt die erste Reflexion in der Horizontalebene nach ca. 16,5 ms. Boden- und/oder Pultreflexionen treffen je nach Aufstellung und Hörabstand durchaus mit noch geringerem zeitlichen Abstand beim Hörer ein.

Vom Hörer werden solche kurz nach dem Direktschall eintreffenden Reflexionen in der Wahrnehmung mit dem zuerst eintreffenden Direktschall verschmolzen (Präzedenz-Effekt). Die Wahrnehmungsschwellen solcher Reflexionen sind von einigen Parametern abhängig, wie Signaltyp (transient, stationär, Sprachsignale, usw.), Nachhallzeit des Raumes, Delay zum Direktschall, spektrale Änderung zum Direktschall, u.a.. Dies wurde in [8] ausführlich untersucht und kann hier nicht weiter vertieft werden. Aufgrund der vielen Einflussfaktoren stellt sich eher die Frage, welche Art von Reflexionen unerwünscht sind. Stellt man sich eine Schallquelle mit einer schmalbandigen stark ausgeprägten Aufweitung in einer bestimmten Richtung vor, so würde, je nach Reflexionsfaktor der betroffenen Raumbegrenzungen, genau aus diesen Richtungen ein bestimmter Frequenzbereich betont werden. Das wiederum könnte vom Hörer als tonale Verfärbung oder Veränderung der Quellenlokalisierung wahrgenommen werden. Aus dieser Überlegung kann man folgern, dass für eine neutrale Wiedergabe geeignete Schallquellen einen über der Frequenz möglichst gleichmäßigen, konstanten Verlauf der Abstrahlung haben sollten. Für diese Forderung spricht auch, dass der Präzedenz-Effekt besonders effektiv ist, wenn das Spektrum der Reflexionen dem Direktschallspektrum möglichst ähnlich ist [3].

Abb. 4 zeigt als Beispiel die horizontale Directivity eines kleinen 2-Wege Studiomonitors. Bis 3 kHz strahlt der Lautsprecher recht gleichmäßig ab, darauf folgt dann eine Einschnürung bis

8 kHz und bei 10 kHz eine starke Aufweitung des Abstrahlverhaltens. Bei der 10 kHz-Aufweitung wird sogar deutlich mehr Schalldruck im Winkelbereich von 20-60° erzeugt, als auf Mittelachse. Beim Einsatz eines solchen Lautsprechers ist zu erwarten, dass die tonale Ausgewogenheit und Quellenlokalisierung durch die ungleichmäßige Abstrahlung gefährdet ist. Genau wie der Leistungsfrequenzgang, ist das Abstrahlverhalten und die Wechselwirkung mit reflektierenden Begrenzungen durch eine elektrische Filterung nicht mehr zu beeinflussen und muss durch eine entsprechende Auslegung der Komponenten, Frequenzweichenfilter und Schallführung konstruktiv optimiert sein. Durch eine Filterung für die Raumkorrektur lässt sich zwar der mittlere Summenfrequenzgang am Hörerplatz linearisieren, was aber insbesondere bei ungleichmäßig abstrahlenden Lautsprechern unvermeidlich zu entsprechenden Degradationen im Direktschallfrequenzgang führt.

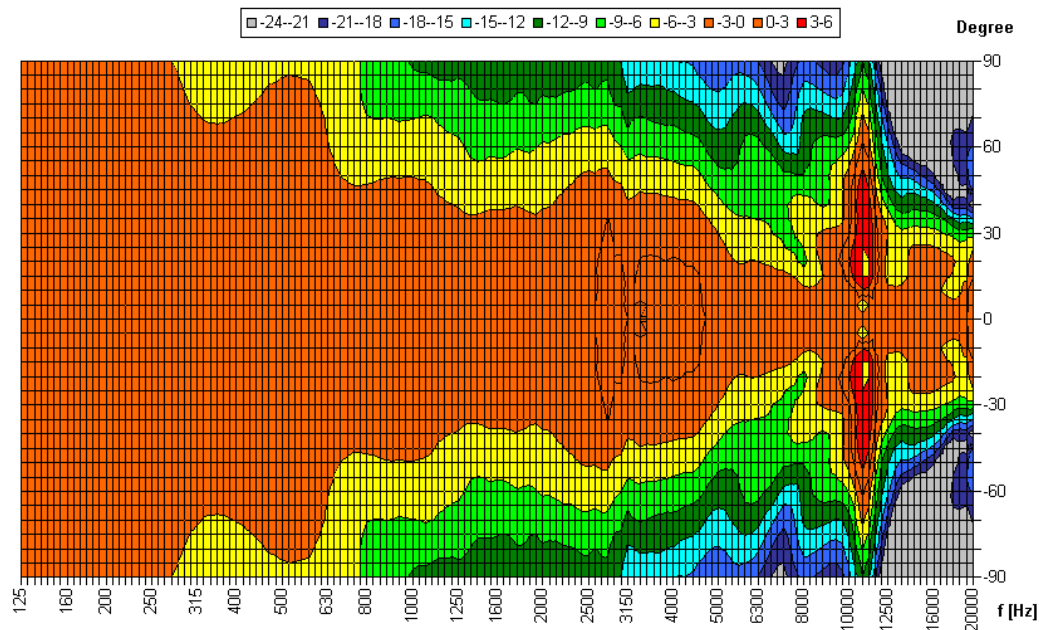


Abb. 4: Directivity eines kleinen 2-Wege Studio-Monitors in der Horizontalebene

3. Welche Directivity ist aus Sicht des Anwenders geeignet?

Bisher wurden nur Aspekte der physikalischen Wechselwirkung zwischen Raum und Lautsprecher diskutiert und daraus allgemeine Anforderungen an die Directivity und den Leistungsfrequenzgang abgeleitet. Als weitere Auswahlkriterien spielen natürlich die individuelle Situation und die gesetzten Anforderungen an die Gleichmäßigkeit der Direktschallverteilung im Abhörbereich eine entscheidende Rolle.

In Abhängigkeit vom Abhörabstand und der Ausdehnung des Bereichs, in dem abgehört wird, ergibt sich für die Horizontalebene (und auch Vertikalebene) ein zu berücksichtigender Winkelbereich. Wird beispielsweise eine maximale Abweichung von 3 dB in diesem Winkelbereich gefordert, so kann im Isobarendiagramm sofort die Eignung eines Lautsprechers beurteilt werden. Dazu ist der minimale Winkel des Übergangs der roten auf die gelbe Fläche zu suchen. Im Frequenzbereich bis 16 kHz liegt dieser bei dem in *Abb. 4* gezeigten Beispiel bei ca. 8 kHz und $\pm 10^\circ$ (aber auch nur, wenn man die kleine Inseln bei 10 kHz vernachlässigt). Ein solches Exemplar wäre also für eine Nahfeldbeschallung völlig ungeeignet, obwohl gerade das die Domäne von kleinen 2-Wege-Monitoren ist. Die gleichen

Überlegungen lassen sich auch für die vertikale Ebene anstellen. Hier kommt es bei den meisten Lautsprechern zu den typischen Interferenzeinbrüchen im Übernahmebereich der einzelnen Wege, wodurch der nutzbare vertikale Winkelbereich oftmals begrenzt wird.

Ein weiteres Kriterium ist die Minimierung von Pult-Reflexionen. Hier wäre die Forderung an die Directivity, dass die Strahlbreite in der Vertikalen möglichst klein und gleichmäßig ist.

Die Definition der Nutzwinkel eines Lautsprechers, also der Winkelbereich in dem der Lautsprecher ein Direktschallfeld mit definierten maximalen Schwankungen im Frequenzgang erzeugt, ist folglich abhängig von der konkreten Anwendung und der räumlichen Situation. Je strenger die Anforderungen an die erlaubten Schwankungen sind, desto perfekter muss die Directivity des Monitors optimiert sein, da sich Problemstellen in einem Frequenzband, wie in *Abb. 4* bei 10 kHz, meist über den gesamten Winkelbereich erstrecken.

Für die meisten Anwendungen können daraus abgeleitet die Anforderungen an das Abstrahlverhalten eines Abhörlautsprechers wie folgt beschrieben werden:

1. In der horizontalen Ebene sollte der Abstrahlwinkel möglichst breit sein und sich mit einem konstanten Wert von einer konstruktiv bedingten unteren Eckfrequenz bis zu den höchsten Frequenzen von 20 kHz hin erstrecken. Damit wird eine gute Bewegungsfreiheit für den Tonmeister hinter dem Pult ermöglicht, ohne dass es zu tonalen Veränderungen kommt.
2. In der vertikalen Ebene sollte der Abstrahlwinkel eher eng sein und sich ebenfalls mit einem konstanten Wert von einer konstruktiv bedingten unteren Eckfrequenz bis zu den höchsten Frequenzen von 20 kHz hin erstrecken. Störende Reflexionen von der Pultoberfläche werden so reduziert. Nebenmaxima, die unterhalb der Hauptachse auftreten sollten unbedingt vermieden werden, da es sonst zu frequenzselektiven besonders störenden Reflexionen kommen kann.

Ein einfaches Schema zur Bewertung, welche Directivity gut oder schlecht ist, kann man daraus jedoch nicht pauschal ableiten. Vielmehr muss die Directivity der Anwendung entsprechend passend sein. Die vorab genannten Vorgaben dürfte schätzungsweise für 75% aller Abhörräume zutreffend sein. Abweichungen davon kann es jedoch geben, wenn z.B. hoch eingebaute Hauptmonitore mehrere hintereinander sitzenden Zuhörerreihen beschallen sollen. Dann wäre auch ein eher breites vertikales Abstrahlverhalten wünschenswert. Die Einbausituation in einem Ü-Wagen oder unter sonstigen beengten Bedingungen kann auch ein enges horizontales Abstrahlverhalten wünschenswert machen um Reflexionen von seitlichen Einbauten oder Wandflächen zu verringern. Unterschiedliche Anforderungen kann es auch aus der Anwendung heraus geben, ob ein Monitor z.B. in einer Misch-Regie oder in einem Mastering-Studio steht. In allen Fällen gilt jedoch, das Abstrahlverhalten sollte so gleichmäßig wie möglich sein. Das kann eine Constant-Directivity Charakteristik sein oder aber auch eine kontinuierlich mit der Frequenz leicht zunehmende Bündelung. Die meisten Hersteller verfolgen hier den Ansatz der Constant-Directivity.

4. Messungen

In den folgenden Absätzen werden exemplarisch für zwei recht unterschiedliche Studiomonitore die typischen die Directivity betreffenden Messungen gezeigt und erläutert. Beide Monitore sind Midfield Modelle für Abhörentfernungen von 3-6 m.

Monitor Nummer 1, im weiteren als 3-Wege bezeichnet, ist ein klassisch aufgebautes 3-Wege System mit einem 10“-Tieftöner im Bassreflexgehäuse, einer 3“- Gewebekalotte in den Mitten und einer 1“-Hochtonkalotte. Die Ansteuerung erfolgt voll aktiv mit ausschließlich analoger Technik und Filtern. Die Trennfrequenzen liegen bei 600 Hz und 2 kHz. Alle Wege sind in einer Linie übereinander angeordnet, so dass die Box bezüglich der horizontalen Ebene symmetrisch ist. Die große Mitteltonkalotte ist ebenso wie der Hochtoner mit einem Waveguide ausgestattet, das zum einen die Directivity kontrolliert und für einen Zuwachs in der Sensitivity sorgt.

Monitor Nummer 2, im weiteren 2-Wege Koaxial genannt, ist zumindest den Aufbau betreffend ebenfalls ein Klassiker. Der Treiber ist ein 12“ + 1,5“-Horn Koaxial-System, so wie man es vor 30 Jahren in vielen großen Monitoren der Hersteller Tannoy, Altec oder Urei fand, um nur drei große Namen zu nennen. Die so aufgebauten Abhörlautsprecher lieferten hohe Schalldrücke, hatten aber auch mit diversen prinzipbedingten Problemen zu kämpfen, was Partialschwingungen von Membranen, ungünstige Horngeometrien etc. betraf. Mit den heute fast 30 Jahre später zur Verfügung stehenden Mitteln können die meisten dieser Problemstellen gut unter Kontrolle gebracht werden. Genau hier setzt der betreffende Lautsprecher an. Man versucht die Vorzüge der großen koaxialen Hornsysteme mit moderner Lautsprechertechnik zusammenzubringen. Daraus entstand das 12“-Koaxial-System in einem kompakten Bassreflexgehäuse. Die Ansteuerung erfolgt auch hier voll aktiv, jedoch mit einem integrierten DSP-System für alle Filterfunktionen.

Gemessen wurde für beide Modelle als Basismessung zunächst der Frequenzgang auf Achse unter Freifeldbedingungen. Die Messentfernung betrug 4 m und entsprach damit einer typischen Abhörentfernung für die beiden Lautsprechermodelle. *Abb. 5* und *Abb. 11* zeigen die Ergebnisse. Beide Lautsprecher haben erwartungsgemäß einen gleichmäßigen und weit ausgedehnten Frequenzgang, was besonders ausgeprägt für das 3-Wege System zutrifft.

In zwei weiteren Messreihen unter Freifeldbedingungen wurden die Monitore in ihrer Directivity vermessen. Auch diese Messungen erfolgten in 4 m Abstand. Die Winkelauflösung betrug 5°. Aus diesen Messreihen konnten die horizontalen und vertikalen Isobarendiagramme erstellt werden. Alle Isobarendiagramme sind relativ zur Messung auf der 0°-Achse skaliert. Zu erkennen ist daher die Abweichung des Frequenzganges unter den gemessenen Winkeln vom Verlauf auf Achse. Es wird nicht der absolute Frequenzgang dargestellt. Die Auflösung der Messungen im Frequenzbereich betrug 2,93 Hz (FFT Grad 14 bei 48 kHz). Für die Darstellung in den Isobarendiagrammen wurden die Frequenzgänge mit einer Bandbreite von 1/20 Oktave geglättet.

4.1. Freifeldmessungen 3-Wege Monitor

Die horizontalen und vertikalen Isobarendiagramme für den 3-Wege Monitor zeigen *Abb. 7* und *Abb. 8*. Hier fällt vor allem das sehr gleichmäßige Verhalten in der horizontalen Ebene auf, das sich von 500 Hz an aufwärts nahezu ideal verhält. Die -6 dB Strahlbreite beträgt 106° bei einer Standardabweichung von nur 17°. Unterhalb von 500 Hz weitet sich der Abstrahlwinkel unweigerlich aus und wird durch die Größe der Strahlerfläche des 10“-Tieftöners sowie die Gehäuseabmessungen bestimmt. Oberhalb von 500 Hz wird das

Abstrahlverhalten durch die Waveguides am Mittel- und Hochtöner bestimmt. In der vertikalen Ebenen fallen die Isobarenkurven ungleichmäßiger aus, da hier, bedingt durch die Anordnung der Lautsprecher, Interferenzeffekte in den Übergangsbereichen zwischen den Wegen bei 600 Hz und bei 2 kHz auftreten. Für die vertikale Ebene lässt sich eine mittlere Strahlbreite von 83° bei einer Standardabweichung von nunmehr 32° angeben. Die Zielsetzung bei diesem Lautsprecher ist ein breites und möglichst gleichmäßiges horizontales Abstrahlverhalten und ein etwas engeres in der vertikalen Ebene, wo einige prinzipbedingte Unregelmäßigkeiten als Kompromiss hingenommen werden müssen.

Aus diesen Messreihen konnten auch die sogenannten Off-Axis Frequenzgänge gewonnen werden. Die Off-Axis Frequenzgänge zeigen ebenfalls auf die 0° -Achse bezogen die Abweichungen im Frequenzgang unter bestimmten Winkeln. Es handelt sich somit um Ausschnitte aus den Isobarendiagrammen um den Verlauf im Detail besser beurteilen zu können. *Abb. 9* und *Abb. 10* enthalten die relativen Off-Axis Frequenzgänge für die horizontale Ebene von -90° bis $+90^\circ$ und für die vertikale Ebene von -45° bis $+45^\circ$. Die Schrittweite beträgt 15° . In der Horizontalen verhält sich der Monitor symmetrisch zur Mittelachse in der Vertikalen gibt es unterschiedliche Kurven für den oberen und unteren Winkelbereich.

4.2. Freifeldmessungen 2-Wege Koaxial Monitor

Für den koaxial aufgebauten 12“ Treiber des zweiten Monitors beschränkten sich, konstruktiv bedingt, die Möglichkeiten der Entwickler weitgehend auf das Design des Hochtonhorns. Der Hochtontreiber ist von hinten auf den Tieftöner aufgesetzt und das Horn verläuft zunächst durch den Polkern des Tieftöners um dann vorne vor der Tieftonmembran in der endgültigen Form auszulaufen. Durch das integrierte DSP-System kann der Laufzeitversatz zwischen den beiden Wegen leicht ausgeglichen werden, so dass es sich im ganzen betrachtet um eine fast ideale Abstrahlung aus einer Quelle handelt. Im Gegenzug müssen allerdings bei der Konstruktion eines koaxialen Chassis auch diverse Kompromisse in Kauf genommen werden, da sich beide Wege in der Schallabstrahlung gegenseitig beeinflussen.

Die zugehörigen Isobarenkurven für den koaxialen 2-Wege Monitor finden sich in *Abb. 13* und *Abb. 14*. Das vorab schon zum Thema Einflussnahme auf das Abstrahlverhalten gesagte ist hier gut zu erkennen. Unterhalb der Trennfrequenz bestimmt einzig die Strahlerfläche des 12“-Tieftöners den Öffnungswinkel, der bis 2 kHz ca. 120° beträgt, wenn man den -6 dB Verlauf betrachtet. Für eine weitere Oktave bis 4 kHz schnürt sich der Verlauf dann ein, um oberhalb von 4 kHz in einen weitgehend konstanten $80^\circ \times 40^\circ$ Verlauf überzugehen, der dann ausschließlich durch die Horngeometrie bestimmt wird. Die Angabe eines mittleren Abstrahlwinkels mit Standardabweichung für den Frequenzbereich oberhalb von 500 Hz ist bei diesem Monitor daher weniger sinnvoll. Der $80^\circ \times 40^\circ$ Öffnungswinkel des Hochtöners zeigt die Intention der Entwickler eine breite horizontale und enge vertikale Abstrahlung zu erzielen.

Die Off-Axis Kurven in *Abb. 15* und *Abb. 16* zeigen das Verhalten mit einer klaren Trennung des Frequenzbereiches bis 2 kHz und oberhalb von 4 kHz ebenfalls deutlich. Vor allem in der vertikalen Ebene ist die scharfe Abgrenzung durch das Horn gut zu erkennen. Im Vergleich zum 3-Wege Monitor fällt eine insgesamt stärkere Unruhe in den Frequenzgängen auf.

4.3. Messungen im Raum

Alle bisher besprochenen Messungen fanden unter Laborbedingungen im reflexionsarmen Raum statt. In einem nächsten messtechnischen Schritt wurden nun die beiden Monitore in

einem ca. 50 m³ Hörraum installiert und dort gemessen. Der gut bedämpfte Raum hat oberhalb von 250 Hz eine Nachhallzeit von ca. 0,2 s, die unterhalb von 250 Hz bis auf 0,4 s bei 125 Hz ansteigt. Der Hörerplatz befand sich ca. 3 m von den Lautsprechern entfernt. Am Hörerplatz und in dessen Umfeld wurden für jeden Lautsprecher an 40 zufällig ausgewählten Positionen Messungen durchgeführt. Als Messsignal wurden gewichtete Sweeps vom Grad 16 bei 48 kHz Abtastrate eingesetzt [9], woraus eine Frequenzauflösung von 0,73 Hz resultiert. Eine zeitliche Fensterung wurde nicht vorgenommen, so dass alle Einflüsse des umgebenden Raumes komplett mit in die Messung eingingen. Anschließend wurde eine energetische Mittelung über alle Messpositionen durchgeführt, die als Resultat einen räumlich gemittelten Frequenzgang ergab [10]. Bei dieser Messmethode gleichen sich die in den einzelnen Messungen noch sehr ausgeprägt vorhandenen Interferenzeffekte in der gemittelten Kurve weitgehend aus. Die Messpunkte waren so um den Hörerplatz angeordnet, dass sie in einem horizontalen Winkelbereich der Lautsprecher von ca. $\pm 30^\circ$ und in einem vertikalen Winkelbereich von ca. $\pm 15^\circ$ lagen.

Abb. 6 und *Abb. 12* zeigen für die beiden Monitore die Ergebnisse der Messungen im Raum jeweils als blaue Kurve, die für die Darstellung auf den Freifeldfrequenzgang der betreffenden Monitore bezogen sind. Die in den gleichen Diagrammen abgebildeten grünen Kurven stellen die daraus abgeleiteten Filtereinstellung dar. Die Filter beschränken sich auf den tieffrequenten Bereich und hier insbesondere auf die Reduzierung der störenden Einflüsse einzelner Raummoden, die durch die limitierte Größe des Hörraumes besonders hervorstechen. Zusätzlich zu diesen beiden Kurven ist noch der Kehrwert des Bündelungsmaß der Lautsprecher eingezeichnet. Zum einen bezogen auf die Abstrahlung im 4π Vollraum (rote Kurven) und bezogen auf den vorderen Hauptabstrahlbereich von $\pm 30^\circ$ horizontal und $\pm 15^\circ$ vertikal (orange Kurven). Aus den beiden Kurven für das invertierte Bündelungsmaß lässt sich ablesen, welche Energie die Monitore in den umgebenden Raum abstrahlen im Vergleich zu einer Kugelquelle mit dem gleichen Freifeldfrequenzgang. Bei tiefen Frequenzen, wo die Monitore auch nahezu kugelförmig abstrahlen, ist der Wert 0 dB und bei höheren Frequenz nimmt er entsprechend ab, da die Monitore hier weit mehr Energie in Richtung ihrer Hauptachse abstrahlen als in die anderen Richtungen. Das invertierte Bündelungsmaß kann so als Maßstab gesehen werden, wie sehr ein Lautsprecher den umgebenden Raum anregt. Die zweite sich auf den vorderen Hauptabstrahlbereich beschränkende Kurve für das invertierte Bündelungsmaß, lässt erkennen, wie gleichmäßig ein Lautsprecher in diesem Winkelbereich arbeitet. Im Idealfall wäre diese Kurve konstant bei 0 dB, d.h. es gibt im Mittel über den betrachteten Winkelbereich keine Abweichung gegenüber der Abstrahlung auf Achse.

Im Zusammenhang mit der im Raum gemessenen Kurve sind für beide Lautsprecher gleichermaßen folgende Rückschlüsse möglich:

1. Für hohe Frequenzen dominiert der vom Lautsprecher abgestrahlte Direktschall. Die gut bedämpfte Raumakustik im Zusammenhang mit dem Richtverhalten des Lautsprechers sorgt für ein geringes Diffusfeld. Die Raumkurve (blau) wird primär vom Direktschallanteil im Hauptabstrahlbereich (orange Kurve) bestimmt.
2. Im mittleren Frequenzbereich nimmt das Richtverhalten des Lautsprechers ab und die Interaktion mit dem umgebenden Raum entsprechend zu. Der Einfluss des Bündelungsmaß für den 4π Vollraum (rote Kurve) auf die Raumkurve wird stärker. Wie sehr der Einfluss zunimmt, steht im direkten Zusammenhang mit der Bedämpfung respektive Nachhallzeit des Hörraumes. Für die Nachhallzeit lässt sich daraus ableiten, dass diese möglichst konstant und damit unabhängig von der Frequenz sein sollte.

3. Für die tiefen Frequenzen bis zur Schröder-Frequenz (hier bei ca. 180 Hz) wird das Übertragungsverhalten durch einzelne Raummoden bestimmt. [10]

4.4. Messungen an einem konventionell aufgebauten 3-Wege Monitor

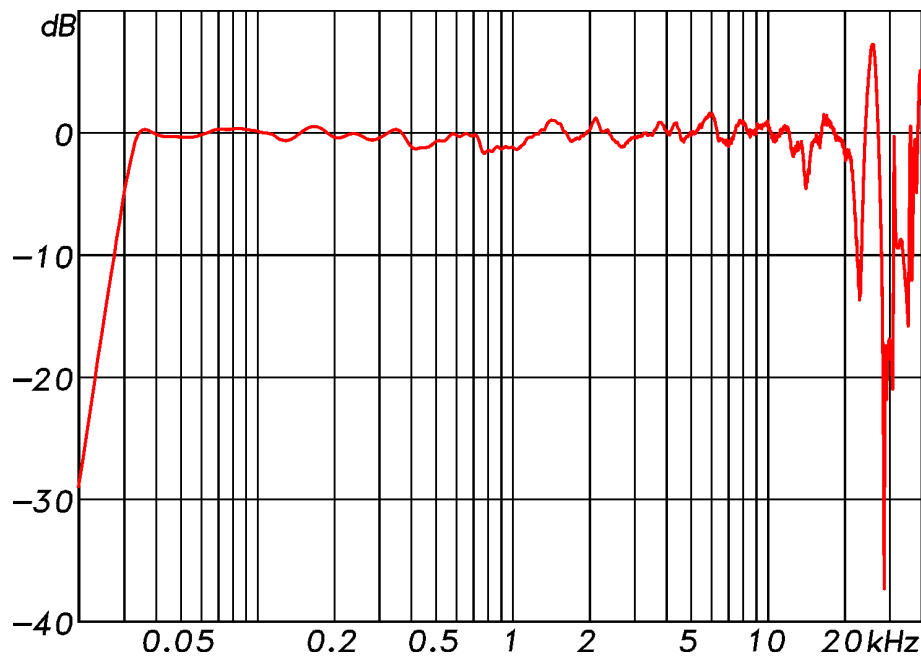


Abb. 5: Frequenzgang des 3-Wege Monitors unter Freifeldbedingungen auf Achse in 4 m Entfernung gemessen (Darstellungsbereich 20 Hz bis 40 kHz)

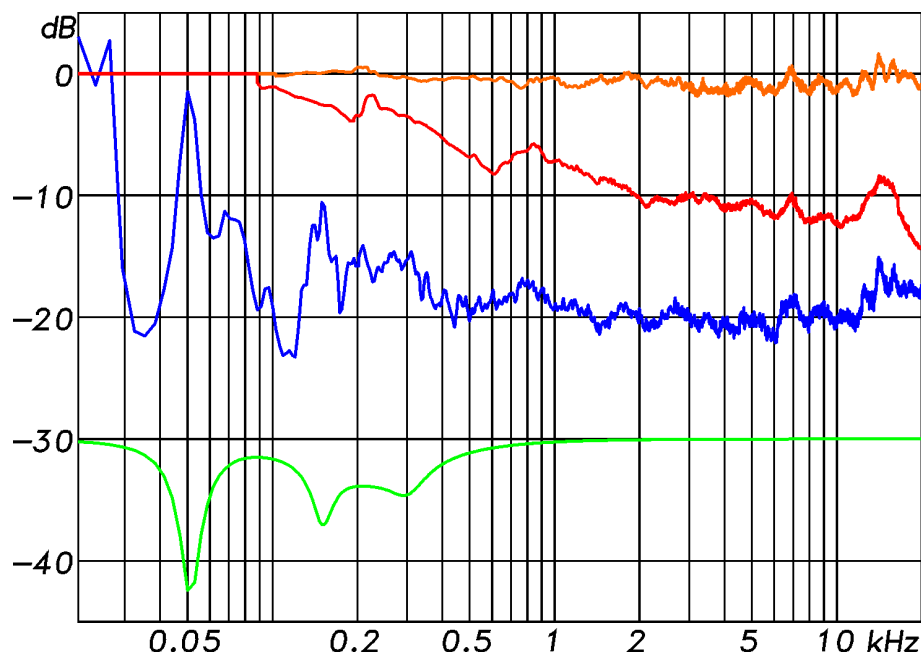


Abb. 6: 3-Wege Studiomonitor

orange: Bündelungsmaß (inv.) bezogen auf den Bereich hor. von $\pm 30^\circ$ und ver. von $\pm 15^\circ$
 rot: Bündelungsmaß (inv.) bezogen auf den gesamten 4π Raum
 blau: Gemittelter Frequenzgang im Raum über 40 Messpositionen um den Hörerplatz
 grün: Aus der Messung im Raum (blau) abgeleitet Filtereinstellung
 Alle Messungen sind in der Darstellung bezogen auf den Frequenzgang auf Achse unter Freifeldbedingung aus Abb. 5.

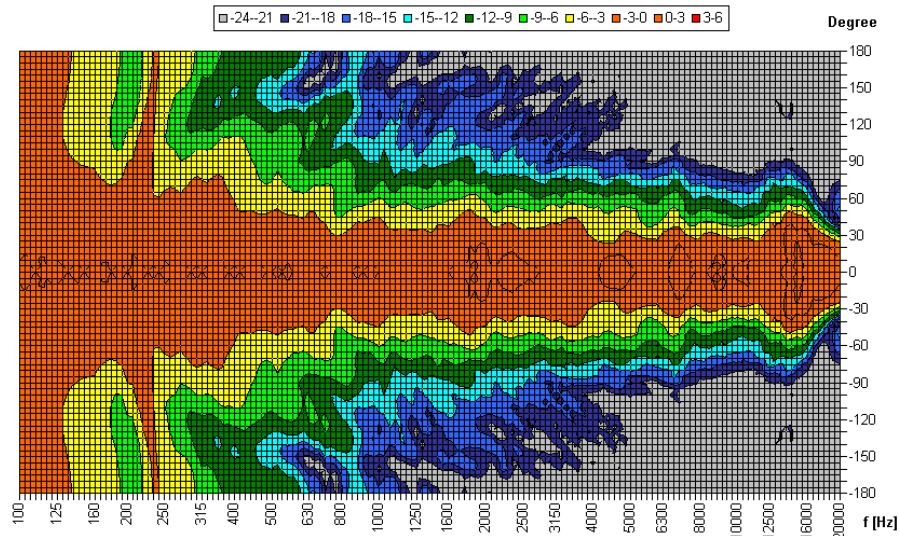


Abb. 7: 3-Wege Studiomonitor

Horizontale Isobarenkurven in einer Darstellung bezogen auf den Frequenzgang auf Achse bei 0° (Messentfernung: 4 m)
 Die Strahlbreite (-6 dB Übergang von gelb auf grün) gemittelt von 500 Hz bis 10 kHz beträgt 106° mit einer Standardabweichung von 17° .

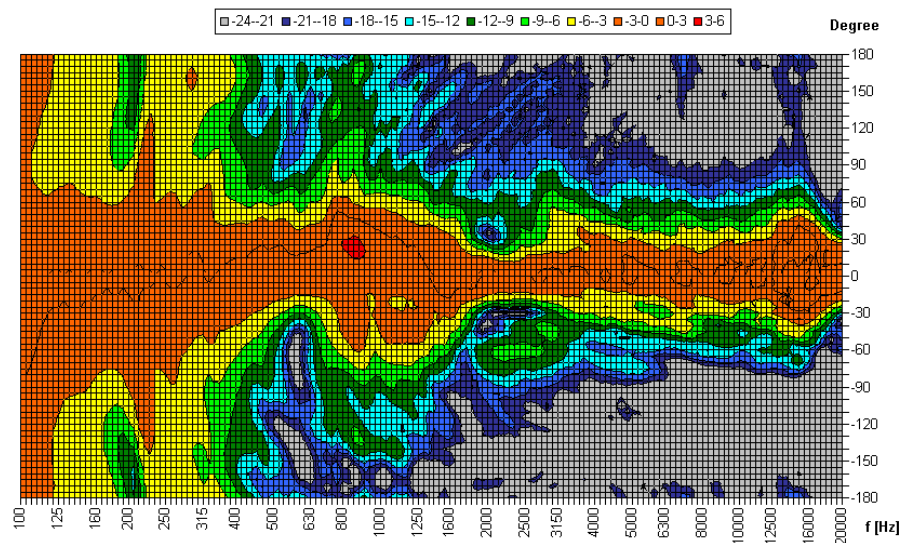


Abb. 8: 3-Wege Studiomonitor

Vertikale Isobarenkurven in einer Darstellung bezogen auf den Frequenzgang auf Achse bei 0° (Messentfernung: 4 m)
 Die Strahlbreite (-6 dB Übergang von gelb auf grün) gemittelt von 500 Hz bis 10 kHz beträgt 83° mit einer Standardabweichung von 32° .

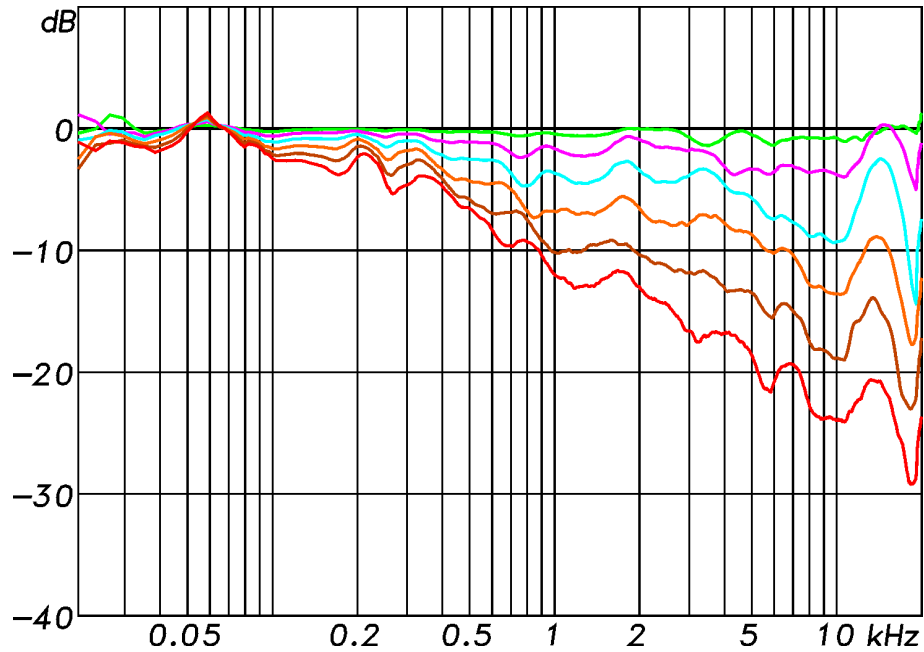


Abb. 9: 3-Wege Studiomonitor

Frequenzgänge außerhalb der Mittelachse in der horizontalen Ebene für Winkel von: $\pm 15^\circ$ (grün), $\pm 30^\circ$ (lila), $\pm 45^\circ$ (blau), $\pm 60^\circ$ (orange), $\pm 75^\circ$ (braun) und $\pm 90^\circ$ (rot)
 Alle Messungen sind in der Darstellung bezogen auf den Frequenzgang auf Achse unter Freifeldbedingung aus Abb. 5.

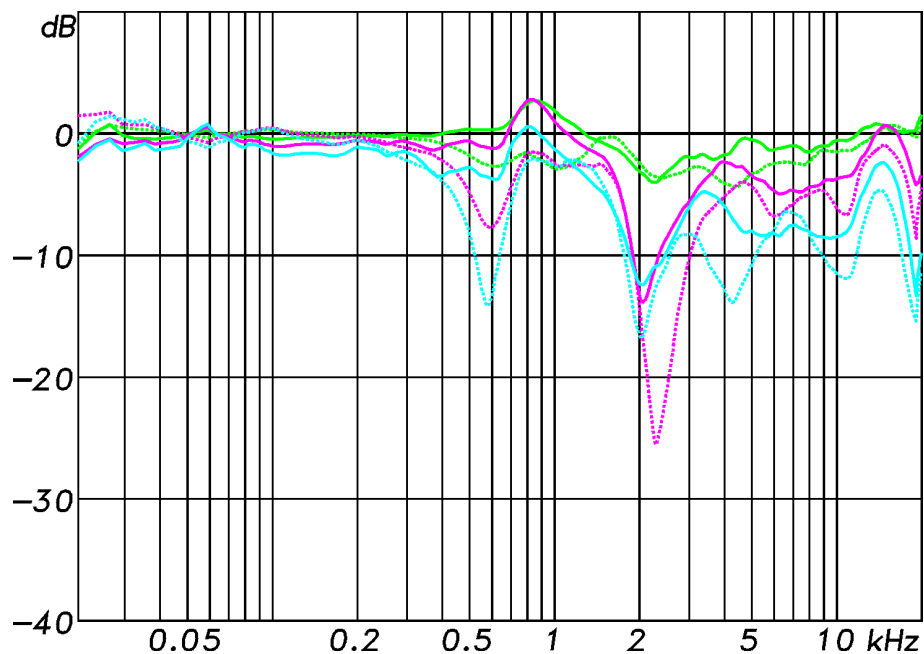


Abb. 10: 3-Wege Studiomonitor

Frequenzgänge außerhalb der Mittelachse in der vertikalen Ebene für Winkel von: $\pm 15^\circ$ (grün), $\pm 30^\circ$ (lila), $\pm 45^\circ$ (blau) (nach oben mit durchgezogene Linien und nach unten mit gestrichelten Linien). Alle Messungen sind in der Darstellung bezogen auf den Frequenzgang auf Achse unter Freifeldbedingung aus Abb. 5.

4.5. Messungen an einem koaxial aufgebauten 2-Wege Hornlautsprecher

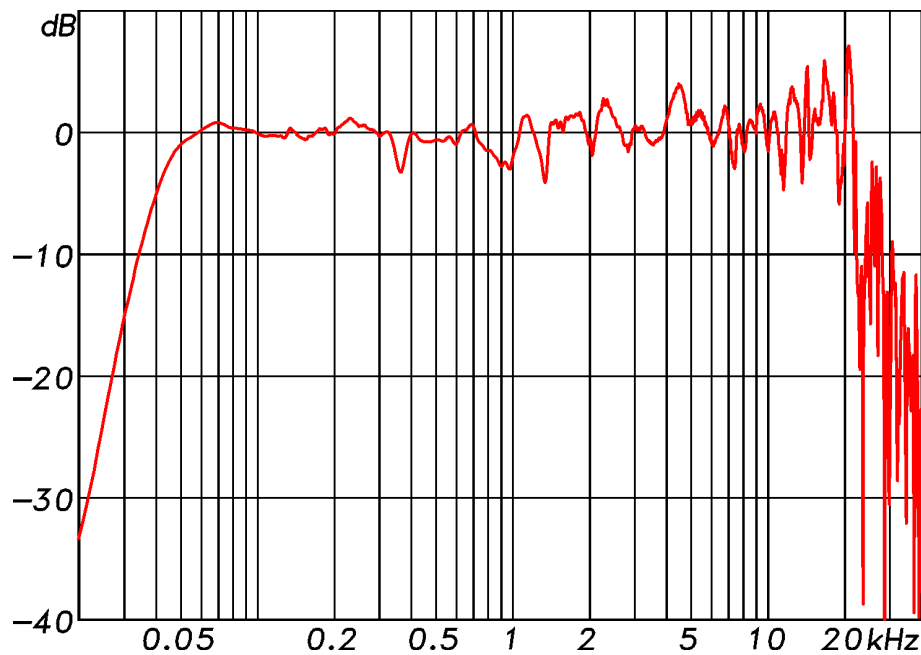


Abb. 11: Frequenzgang des 2-Wege Koaxial Monitors unter Freifeldbedingungen auf Achse in 4 m Entfernung gemessen (Darstellungsbereich 20 Hz bis 40 kHz)

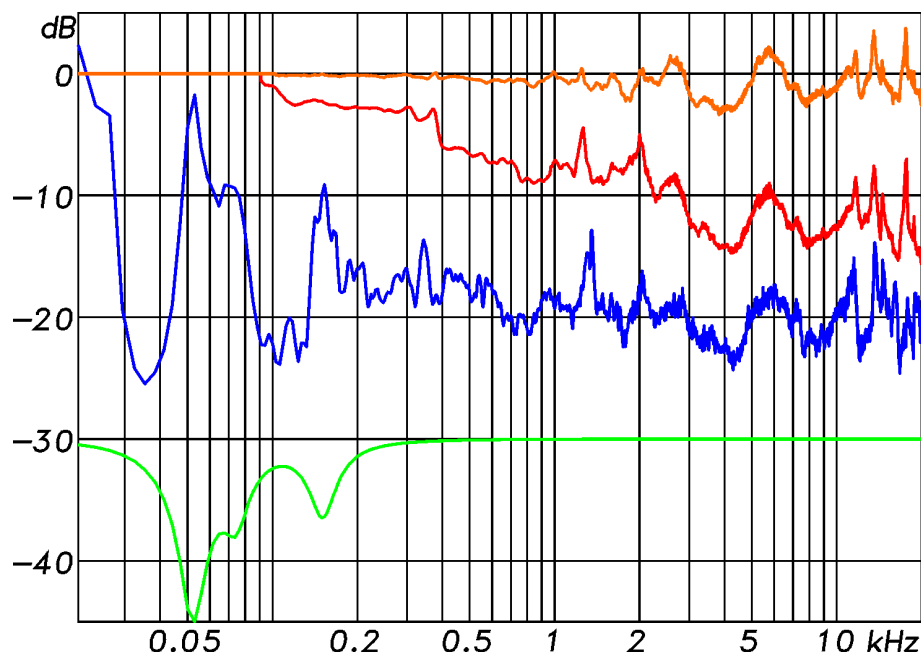


Abb. 12: 2-Wege Koaxial Studiemonitor

orange: Bündelungsmaß (inv.) bezogen auf den Bereich hor. von $\pm 30^\circ$ und ver. von $\pm 15^\circ$

rot: Bündelungsmaß (inv.) bezogen auf den gesamten 4π Raum

blau: Gemittelter Frequenzgang im Raum über 40 Messpositionen um den Hörerplatz

grün: Aus der Messung im Raum (blau) abgeleitete Filtereinstellung

Alle Messungen sind in der Darstellung bezogen auf den Frequenzgang auf Achse unter Freifeldbedingung aus Abb. 11.

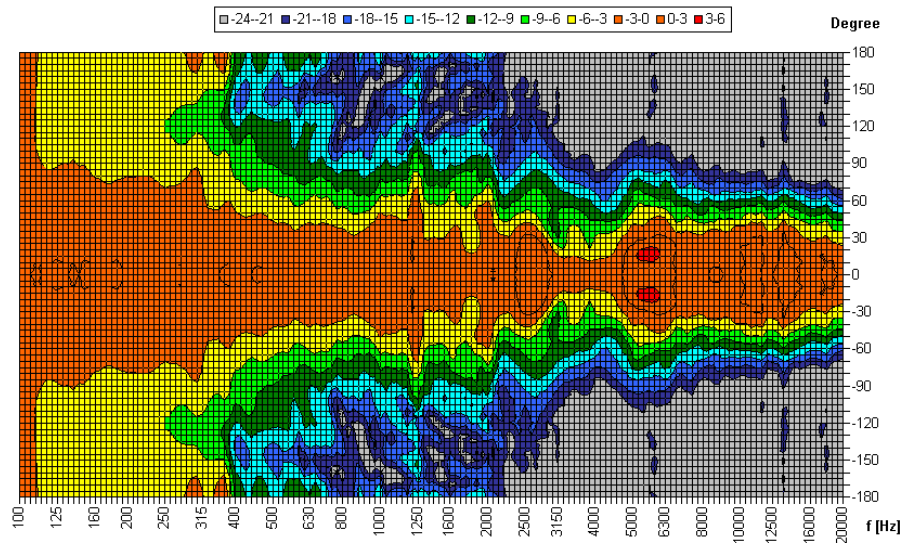


Abb. 13: 2-Wege Koaxial Studiomonitor

Horizontale Isobarenkurven in einer Darstellung bezogen auf den Frequenzgang auf Achse bei 0° (Messentfernung: 4 m)
 Die Strahlbreite (-6 dB Übergang von gelb auf grün) gemittelt von 500 Hz bis 10 kHz beträgt 103° mit einer Standardabweichung von 22° .

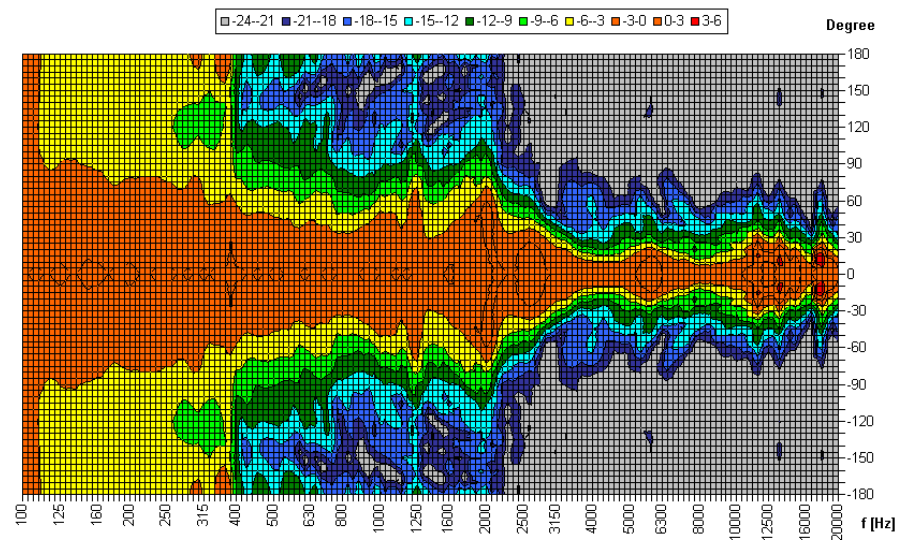


Abb. 14: 2-Wege Koaxial Studiomonitor

Vertikale Isobarenkurven in einer Darstellung bezogen auf den Frequenzgang auf Achse bei 0° (Messentfernung: 4 m)
 Die Strahlbreite (-6 dB Übergang von gelb auf grün) gemittelt von 500 Hz bis 10 kHz beträgt 89° mit einer Standardabweichung von 43° .

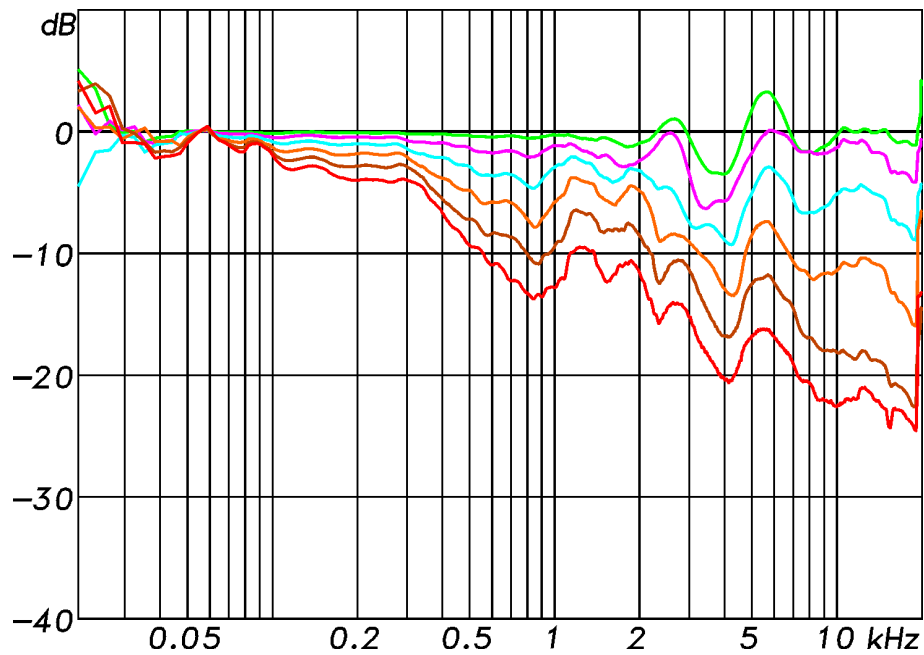


Abb. 15: 2-Wege Koaxial Studiomonitor
Frequenzgänge außerhalb der Mittelachse in der horizontalen Ebene für Winkel von:
 $\pm 15^\circ$ (grün), $\pm 30^\circ$ (lila), $\pm 45^\circ$ (blau), $\pm 60^\circ$ (orange), $\pm 75^\circ$ (braun) und $\pm 90^\circ$ (rot)
 Alle Messungen sind in der Darstellung bezogen auf den Frequenzgang
 auf Achse unter Freifeldbedingung aus *Abb. 11*.

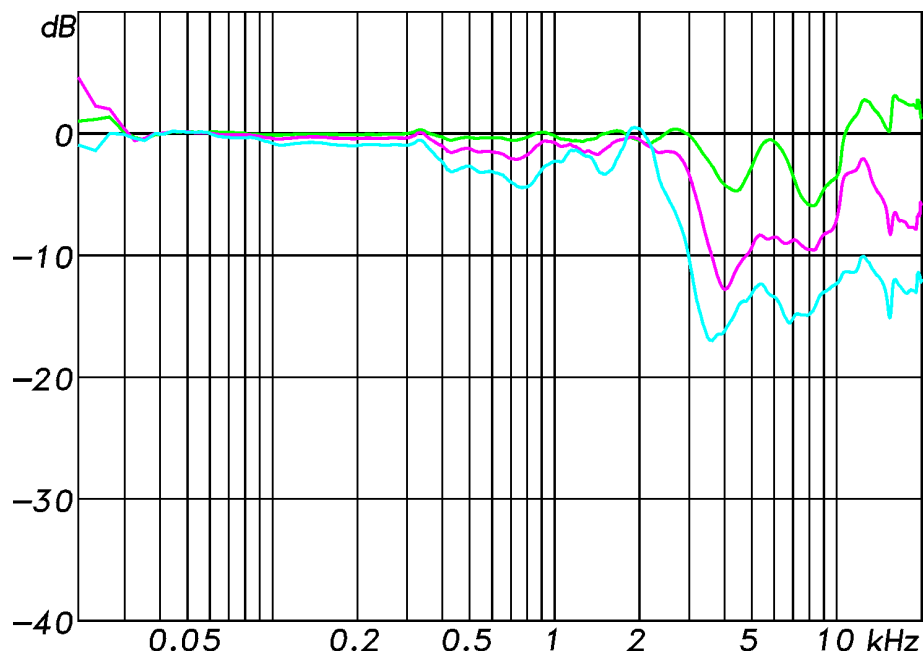


Abb. 16: 2-Wege Koaxial Studiomonitor
Frequenzgänge außerhalb der Mittelachse in der vertikalen Ebene für Winkel von:
 $\pm 15^\circ$ (grün), $\pm 30^\circ$ (lila), $\pm 45^\circ$ (blau) (nach oben mit durchgezogene Linien und nach
 unten mit gestrichelten Linien). Alle Messungen sind in der Darstellung bezogen auf
 den Frequenzgang auf Achse unter Freifeldbedingung aus *Abb. 11*.

5. Schlussfolgerungen

Das räumliche Abstrahlverhalten von Lautsprechern kann heute mit moderner PC-Messtechnik sehr komfortabel und schnell vollständig erfasst werden. Daraus lassen sich diverse mehr oder weniger übersichtliche Darstellungen des Abstrahlverhaltens ableiten. Für einen schnellen Überblick sind die horizontalen und vertikalen Isobarenkurven das bevorzugte Format. Die Gleichmäßigkeit des Lautsprechers im Hauptabstrahlbereich lässt sich entweder mit Off-Axis Frequenzgangkurven oder auch mit einem auf diesen Winkelbereich limitierten Bündelungsmaß beurteilen. Das 4π Bündelungsmaß liefert die notwendigen Informationen wie stark der umgebenden Raum von einem Lautsprecher angeregt wird.

Das Abstrahlverhalten eines Monitors sollte passend zur Anwendung und damit in der Regel horizontal relativ breit und vertikal etwas enger sein. Ausnahmen können vorkommen. Davon unabhängig gilt jedoch, dass das angestrebte Verhalten über einen möglichst weiten Frequenzbereich konstant eingehalten werden sollte. Akustisch schwierige Räume verlangen mitunter eine verstärkte Bündelung des Lautsprechers um ein ausreichendes Verhältnis von Direkt- zu Diffusschall zu erreichen und den Raum nicht zu sehr mit einzubeziehen.

Zusammengefasst kann damit ausgesagt werden, dass ein Studiomonitor bezüglich des Abstrahlverhaltens passend zu seiner Anwendung auszuwählen ist und dabei ein besonderes Augenmerk darauf liegen sollte, dass diese Eigenschaften für einen möglichst ausgedehnten Frequenzbereich gültig und gleichmäßig sind.

6. Quellenverzeichnis

- [1] Wollherr, H.; Goossens, S.: "Einfluss des Wiedergaberaums auf Lautsprechereigenschaften." Tonmeistertagung ? in ?
- [2] Putnam, M. T.: "The Loudspeaker and Control Room as a Wholly Integrated System." *Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 31, No. 4, 1983 April*
- [3] Toole, F. E.: "Loudspeakers and Rooms for Sound Reproduction - A Scientific Review." *Journal of the Audio Engineering Society, Vol.54, No. 6, 2006 June.*
- [4] Goertz, A., Wolff, M.: "Optimierung der Tieftonwiedergabe in Tonstudios und Abhörräumen." *Fortschritte der Akustik – DAGA 2003.*
- [5] Kates, J. M.: "Dipole Loudspeakers Response in Listening Rooms." *Journal of the Audio Engineering Society, Vol.50, No. 5, 2002 May.*
- [6] Kuttruff, H.: "Room Acoustics." Taylor Francis, 4th Ed., 1999.
- [7] Kuttruff, H.: "Sound Fields in Small Rooms." AES 15th International Conference, 1998.
- [8] Olive, S. E., Toole, F. E.: "The Detection of Reflections in Typical Rooms." *Journal of the Audio Engineering Society, Vol.37, No. 7/8, 1989 July/August.*
- [9] Müller, S., Massarani, P.: „Transfer Function Measurement with Sweep“ *Journal of the Audio Engineering Society, Vol.49, No. 6, 2001*
- [10] Goertz, A., Wolff, M., Naumann, L.: „Optimierung der Lautsprecherwiedergabe von Surround Lautsprecheranordnungen in Tonstudios und Abhörräumen“ *Tonmeistertagung 2002 in Hannover*