

# Zur Ermittlung des Freifeld-Frequenzgangs von Lautsprechern

### Inhalt

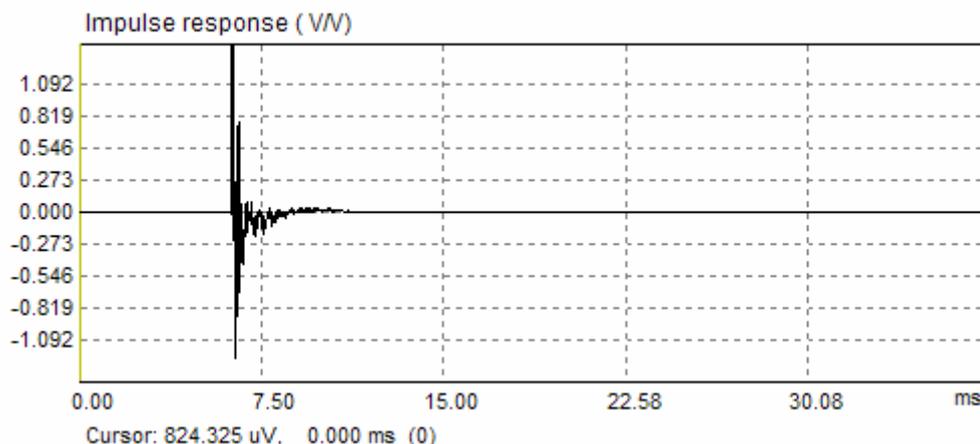
|   |    |
|---|----|
| 1. Nahfeld, Fernfeld, Freifeld und Diffusfeld.....  | 1  |
| 2. Übergang von Nahfeld - Fernfeld bei halbkugelförmiger Abstrahlung ( $2\pi$ ).....                            | 3  |
| 3. Ermittlung des Freifeld-Frequenzgangs bei halbkugel- ( $2\pi$ ) und kugelförmiger Abstrahlung ( $4\pi$ ) ... | 4  |
| 4. Ermittlung des Freifeld-Frequenzganges bei tiefen Frequenzen.....  | 6  |
| 5. Ermittlung des Gesamt-Freifeldfrequenzganges.....  | 9  |
| 6. Zusammenfassung.....   | 12 |
| 7. Literatur.....   | 13 |

## 1. Nahfeld, Fernfeld, Freifeld und Diffusfeld

Diese Application Note soll zeigen, wie in normalen Räumen, also in reflektierender Umgebung, der Freifeld-Frequenzgang eines Lautsprechers aus einem Satz Messungen ermittelt wird.

Bei der Messung des Frequenzgangs eines Lautsprechers werden die vorkommenden Messbedingungen üblicherweise als Nahfeld, Fernfeld, Freifeld oder Diffusfeld bezeichnet. Die Begriffe Nah- und Fernfeld beziehen sich auf den Abstand zur Schallquelle, die Bezeichnungen Frei- (oder auch Direkt-) und Diffusfeld dagegen auf die Umgebungsbedingungen der Schallquelle.

Zur weiteren Vertiefung schauen wir uns nun reale Messungen (Impulsantwort, Frequenzgang) von einer kleinen Lautsprecherbox im Wohnraum an.



**Bild 1:** Impulsantwort eines Lautsprechers im normalen Wohnraum. Mikrofon direkt vor der Lautsprechermembran (Nahfeld)

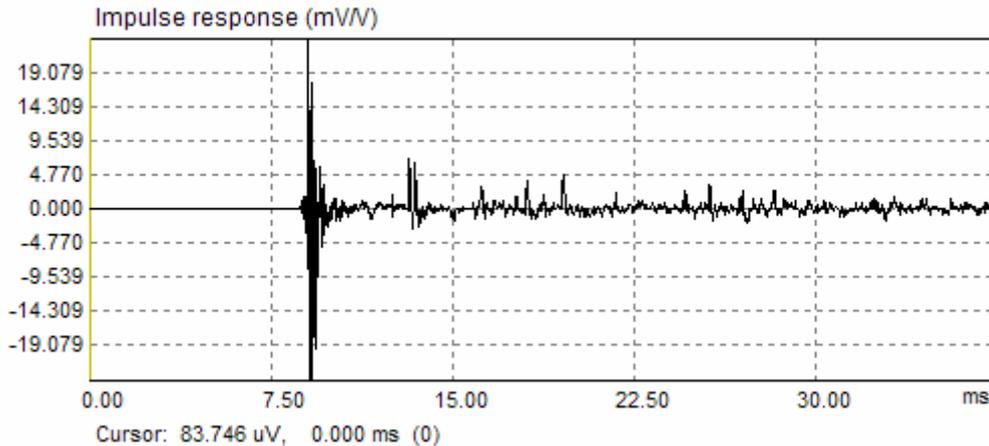
Bild 1 zeigt den Frequenzgang des Lautsprechers im Nahfeld. Das Mikrofon war wenige Millimeter vor der Staubschutzkalotte der Lautsprechermembran platziert. Wir sehen einen scharfen Impuls bei ca. 6,3 ms, gefolgt vom Abklingen der Lautsprecherresonanz von einigen Millisekunden Dauer.



# ARTA - APPLICATION NOTE

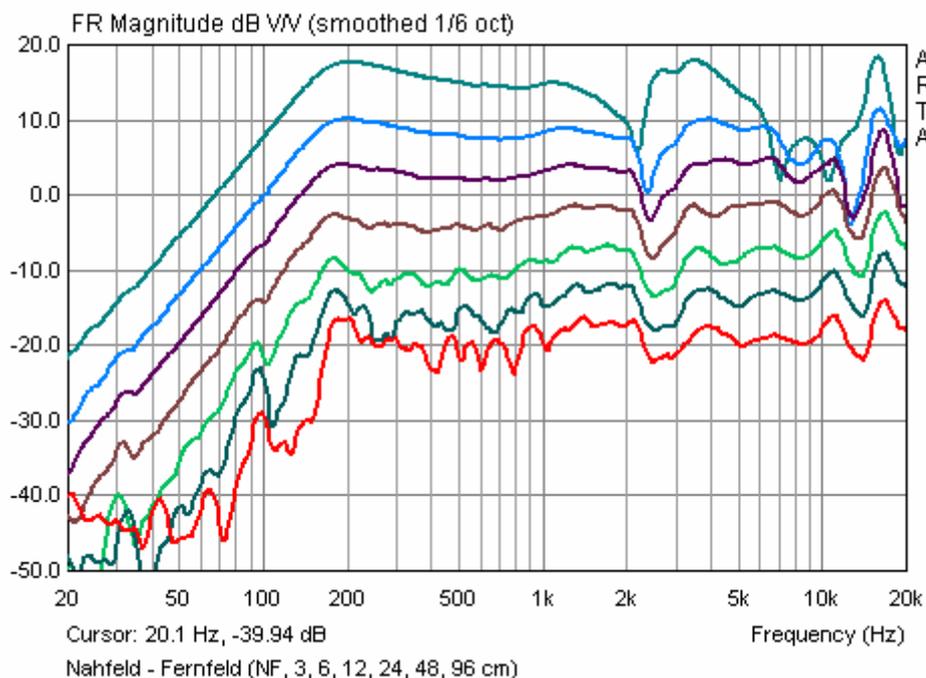
## No 4: Ermittlung des Freifeld-Frequenzgangs

Bild 2 zeigt die Impulsantwort des Lautsprechers im Fernfeld. Das Mikrofon stand bei dieser Messung 96 cm vor dem Zentrum der Lautsprechermembran. Wir sehen wieder den scharfen Impuls, jetzt bei ca. 9 ms gefolgt vom Abklingen der Lautsprecherresonanz. Dieser erste Impuls wird „Direktschall“



**Bild 2:** Impulsantwort eines Lautsprechers im Wohnraum. Mikrofon 96cm vor der Lautsprechermembran.

genannt. Innerhalb der nächsten Millisekunden folgt eine Vielzahl schwächerer, aber immer noch deutlicher Impulse- ebenfalls mit eigener Abklingcharakteristik. Diese Impulse sind Reflektionen der umliegenden Wände und werden „frühe Reflektionen“ genannt. Das Ende der Impulsantwort zeigt ein langsames Abklingen ohne stärkere Reflektionen. Dieser „Nachhallschwanz“ repräsentiert das Diffusfeld.



**Bild 3:** Frequenzgang eines Lautsprechers im Wohnraum. Messdistanz: 0 cm, 3 cm, 6 cm, 12 cm, 24 cm, 48 cm, 96 cm (von oben nach unten).

Wenn die Messungen im Freien oder in einem reflektionsarmen Raum mit größerem Abstand vom Lautsprecher gemacht werden, sprechen wir von Freifeldmessungen. Wir können aus der

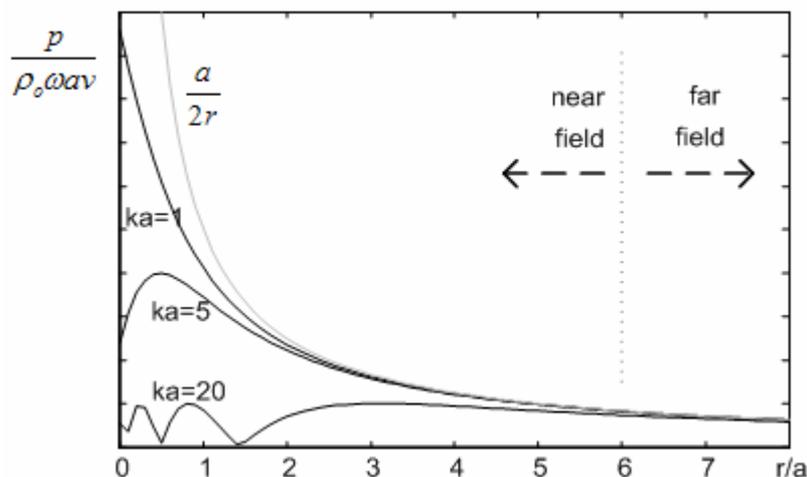
Impulsantwort einen Quasi-Freifeldfrequenzgang ermitteln, wenn wir alle Reflektionen ausblenden bzw. ein Fenster oder ein „Gate“ setzen. Der für die Analyse verbleibende Teil der Impulsantwort (Direktschall bis zur ersten Reflektion) wird „gefensterte Impulsantwort“ genannt.

Bild 3 zeigt die bei verschiedenen Messdistanzen (0cm, 3cm, 6cm, 12 cm, 24cm, 48cm and 96cm) im normalen Wohnraum ermittelten Frequenzgänge. Der Nahfeldfrequenzgang hat den glattesten Verlauf, allerdings mit einigen Einbrüchen bei höheren Frequenzen. Mit zunehmender Messdistanz wird der Frequenzgang bedingt durch Raumeinflüsse zunehmend unruhiger. Es ist normal, dass die Welligkeiten (Ripple) in reflektierender Umgebung größer als  $\pm 5\text{dB}$  sein können.

## 2. Übergang von Nahfeld - Fernfeld bei halbkugelförmiger Abstrahlung ( $2\pi$ )

Um zu verstehen, woher die Einbrüche im Nahfeldfrequenzgang kommen schauen wir uns die theoretische Analyse eines Lautsprechers bei halbkugelförmiger Abstrahlung ( $2\pi$ ) auf einer unendlichen Schallwand an.

Bild 4 zeigt den normalisierten Schalldruck einer runden Membran im Abstand  $r$  mit der Membrangeschwindigkeit  $v$  auf Achse.



**Bild 4:** Normalisierter Schalldruck für verschiedene Frequenzen ( $ka = 2\pi a/\lambda = 1, 5, 20$ ) im Übergang vom Nahfeld ins Fernfeld.

Aus der Lösung des Rayleigh-Integrals für die Abstrahlung einer runden Scheibe erhalten wir:

$$|p(r)| = 2\rho_0 c v \sin\left(ka \frac{(r^2/a^2 + 1)^{1/2} - r/a}{2}\right)$$

$a$  = Membranradius,  $k$  = Wellenzahl =  $\omega/c = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c$ ,  $\omega$  = Frequenz =  $2\pi f$ ,  
 $c$  = Schallgeschwindigkeit,  $\rho_0$  = Dichte der Luft

Wir sehen, bei Abständen kleiner dem 6-fachen Membranradius, hängt der Schalldruck stark von  $ka$  ab. Für einige Werte von  $ka$  und  $r$  kann der Schalldruck gegen Null gehen. Für Distanzen  $r > 6a$  ist der



# ARTA - APPLICATION NOTE

## No 4: Ermittlung des Freifeld-Frequenzgangs

Schalldruck weitgehend unabhängig von  $ka$  und ab hier messen wir den Fernfeldfrequenzgang bei halbkugelförmiger Abstrahlung ( $p_{2\pi}$ ):

$$|p_{2\pi}(r)| = \frac{\rho_0 \omega a^2 \pi v}{2\pi r}, \text{ Fernfeldfrequenzgang bei halbkugelförmiger Abstrahlung } (r > 6a)$$

In der Nähe der Membran ( $r \ll a$ ) ergibt sich der Nahfeldfrequenzgang  $p_N$ : zu

$$|p_N| = \rho_0 \omega a v \frac{\sin(ka/2)}{ka/2}, \text{ (Nahfeldfrequenzgang auf Achse)}$$

Der Nahfeldfrequenzgang hat Einbrüche bei Frequenzen von  $ka/2 = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, \dots$   
z.B. bei  $f_n = (2n+1) c/4a$ .

In unserem Beispiel hat der Lautsprecher einen Membranradius von  $a = 3.2$  cm. Demnach sollten die Einbrüche im Frequenzgang bei 2687 Hz, 8062 Hz und 13437 Hz auftreten, also fast wie im Bild 3 zu sehen.

Das Verhältnis des Schalldrucks im Fernfeld im Abstand  $r$  zum Schalldruck im Nahfeld ist:

$$\left| \frac{p_{2\pi}(r)}{p_N} \right| = \frac{a}{2r} \frac{ka/2}{\sin(ka/2)}$$

Bei sehr tiefen Frequenzen ( $ka \ll 1$ ) ist  $\sin(ka/2) \cong ka/2$ . Daher kann eine vereinfachte Gleichung genutzt werden:

$$\left| \frac{p_{2\pi}(r)}{p_{NF}} \right| = \frac{a}{2r}$$

Diese Gleichung ist sehr wichtig, denn sie wird genutzt, um den Übergang vom gemessenen Nahfeldfrequenzgang zum Fernfeldfrequenzgang bei halbkugelförmiger Abstrahlung herzustellen. Der Fehler bei Anwendung dieser Gleichung ist unterhalb 200 Hz und für normale Membrandurchmesser relativ klein.

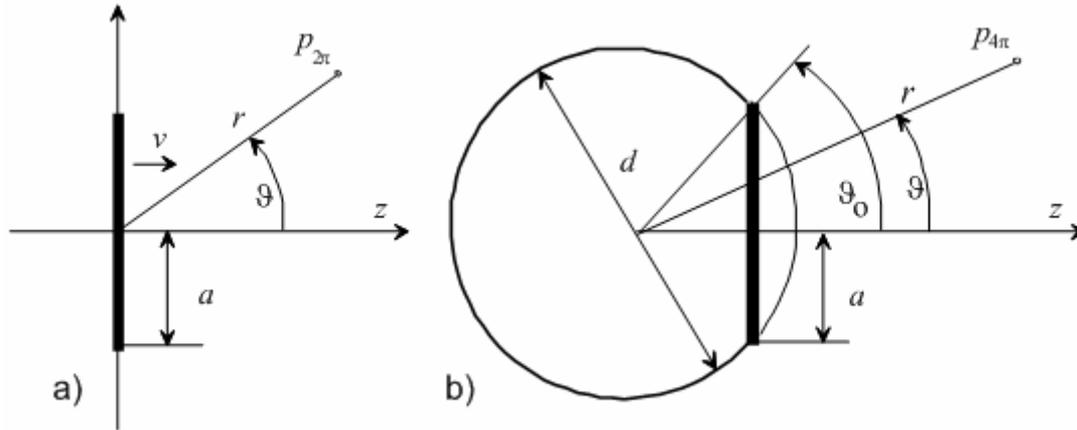
Die Prozedur zur Ermittlung des Fernfeldfrequenzgangs bei halbkugelförmiger Abstrahlung ist wie folgt:

1. Platziere das Messmikrofon einige mm vor dem Zentrum der Membrane / Staubschutzkappe und messe den Nahfeldfrequenzgang.
2. Skaliere die Impulsantwort mit dem Faktor  $a/2r$  um den Frequenzgang bei halbkugelförmiger Abstrahlung im Abstand  $r$  zu ermitteln. (ARTA Impulse Response Fenster - Menü Befehl 'Edit->Scale')
3. Speichere die Impulsantwort mit 'Save as' unter einem entsprechenden Namen.

### **3. Ermittlung des Freifeld-Frequenzgangs bei halbkugel- ( $2\pi$ ) und kugelförmiger Abstrahlung ( $4\pi$ )**

Für übliche Anwendungen ist es realistischer, Lautsprecher im Gehäuse und für Rundumstrahlung ( $4\pi$ ) zu betrachten. Um einen Einblick zu erhalten, wie ein kleines Gehäuse akustische Wellen beugt,

vergleichen wir den Frequenzgang eines Lautsprechers auf einer unendlichen Schallwand ( $p_{2\pi}$ ) mit dem Frequenzgang eines Lautsprechers in einem Kugelgehäuse ( $p_{4\pi}$ ).



**Bild 5:** a) Lautsprecher mit Radius a in unendlicher Schallwand.  
b) Lautsprecher mit Radius a in Kugelgehäuse mit Durchmesser d.

Folgende Gleichung gibt uns eine analytische Lösung für ein kugelförmiges Gehäuse für das Verhältnis des Schalldrucks von kugelförmiger ( $p_{4\pi}$ ) zu halbkugelförmiger Abstrahlung ( $p_{2\pi}$ ).

$$\frac{p_{4\pi}}{p_{2\pi}} = \frac{e^{-jkd/2}}{\left(\frac{kd}{2} \sin \vartheta_0\right)^2} \sum_{n=0}^{\infty} C_n \frac{e^{j(\delta_n + n\pi/2)}}{B_n(ka)}$$

$C_n$  ist das Legendre Polynom,  $B_n$  and  $\delta_n$  sind Amplitude und Phase der sphärischen Bessel Funktion. Diese Lösung ist gültig für Strahlung auf Achse ( $\vartheta=0$ ).

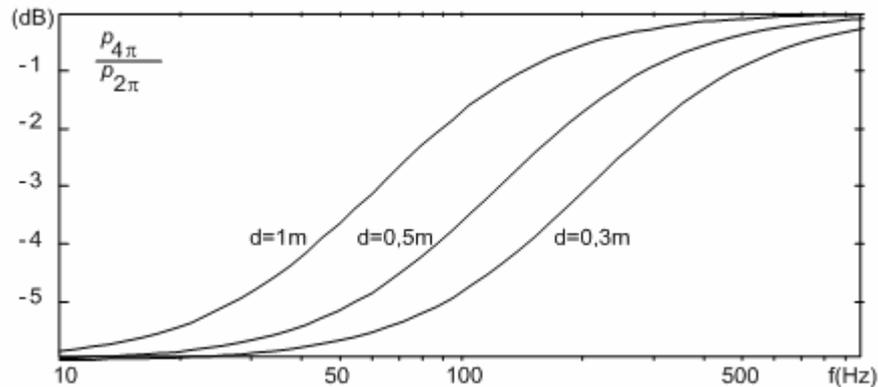
Da die Lösung dieser Gleichung recht aufwändig ist, verwenden wir eine Näherungslösung. Von praktischem Interesse sind die Fälle, in denen die Membran 1/40 bis 1/10 der Kugeloberfläche einnimmt (z.B. für Winkel  $\vartheta_0$  von  $5^\circ$  bis  $20^\circ$ ).

Für diese Fälle kann der Frequenzgang auf Achse ( $\vartheta=0$ ) des flachen Lautsprechers in der Kugelbox mit einem Fehler  $< 0.5\text{dB}$  durch folgende Gleichung angenähert werden:

$$\frac{p_{4\pi}}{p_{2\pi}} = \frac{1 + jf/f_0}{2 + jf/f_0}$$

mit  $f_0 = 42.70 / d$  für eine Kugelbox mit dem Durchmesser  $d$  oder  
mit  $f_0 = 34.16 / d$  für eine rechteckige Box der Breite  $d$ .

Diese Gleichung definiert einen "Baffle Step Equalizer" wie in Bild 6 gezeigt.



**Bild 6:** Frequenzgang eines “Baffle Step Equalizers” für drei unterschiedliche Kugelboxen mit Durchmessern von 0,3 m, 0,5 m and 1,0 m.

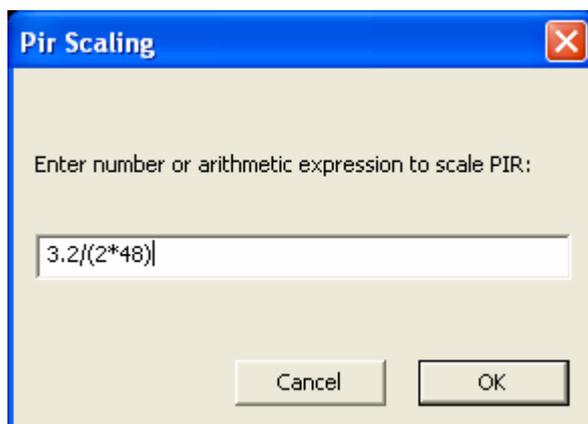
Bild 6 zeigt, dass bei sehr tiefen Frequenzen der Frequenzgang für kugelförmige Abstrahlung 6 dB unterhalb der für halbkugelförmige Abstrahlung liegt.

*Anmerkung:* ARTA und STEPS benutzen obige Gleichung für die Abschätzung des Baffle Steps für Kugel- und Rechteckgehäuse. Einige CAD und Simulationsprogramme nutzen ein geometrisches Model für die Abschätzung der Beugung bei tiefen Frequenzen. Solche Modelle geben teilweise größerer Fehler als das hier gezeigte einfache Modell.

#### 4. Ermittlung des Freifeld-Frequenzganges bei tiefen Frequenzen

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung des Frequenzganges für tiefe Frequenzen ist wie folgt:

1. Messe den Nahfeldfrequenzgang und ermittle den Frequenzgang für halbkugelförmige Abstrahlung wie im vorangegangenen Kapitel erläutert.



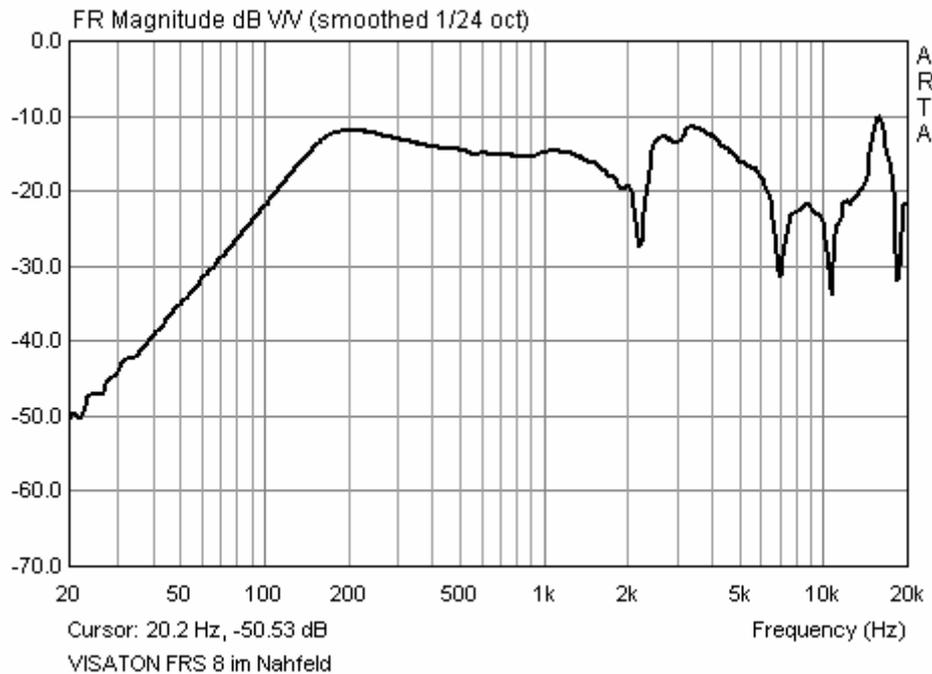
Für den hier verwendeten Beispiellautsprecher mit dem Radius von 3.2 cm skalieren wir den Frequenzgang für halbkugelförmige Abstrahlung im Nahfeld zum Fernfeldfrequenzgang in 48 cm Abstand durch 'Edit->Scale' und der Eingabe des Skalierungsfaktors  $a/2r$  in die Dialogbox 'Pir Scaling'.

2. Ausführen des Kommandos 'Analysis->Smoothed Frequency response'. Setzen des geglätteten Frequenzganges als Overlay durch das Kommando 'Overlay->Set as overlay'. Folgendes Bild sollte erscheinen:

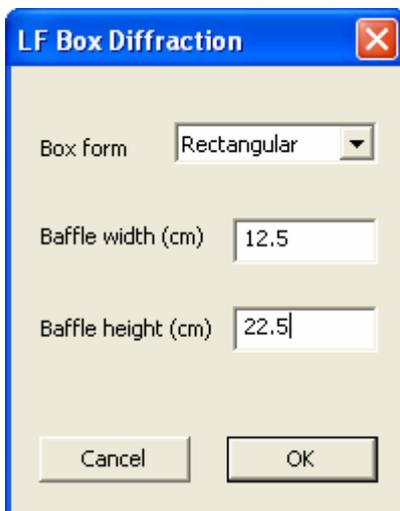


# ARTA - APPLICATION NOTE

## No 4: Ermittlung des Freifeld-Frequenzgangs



**Bild 7:** Nahfeldfrequenzgang auf 48 cm skaliert



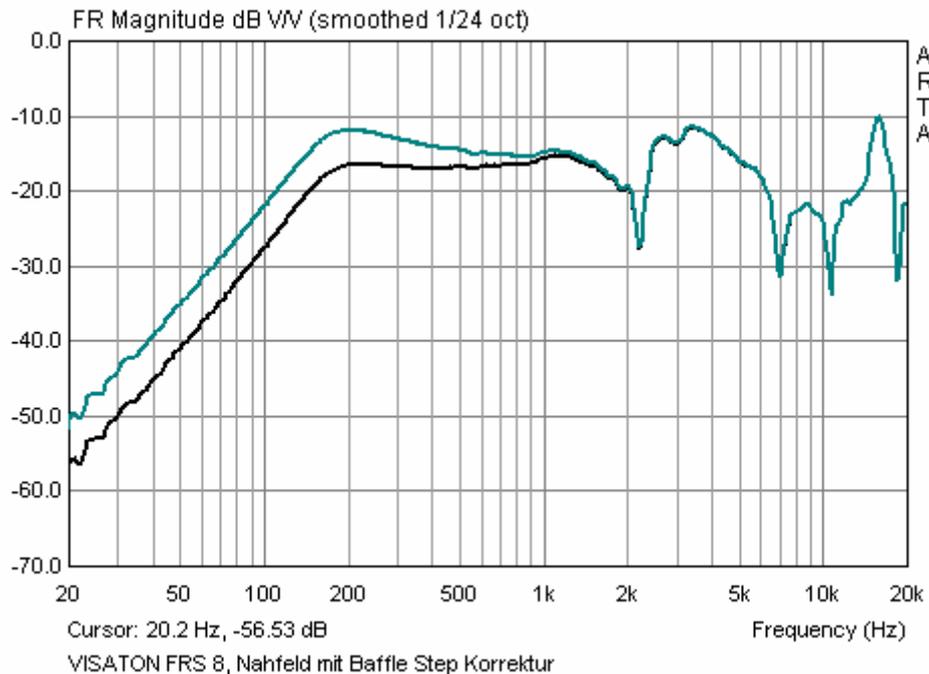
3. Ausführen des Kommandos '**Edit → LF box diffraction**', um die links gezeigte Dialogbox zu bekommen:

Hier sind die Form (quadratisch, rechteckig, kugelförmig) und die Abmessungen der Box einzugeben.

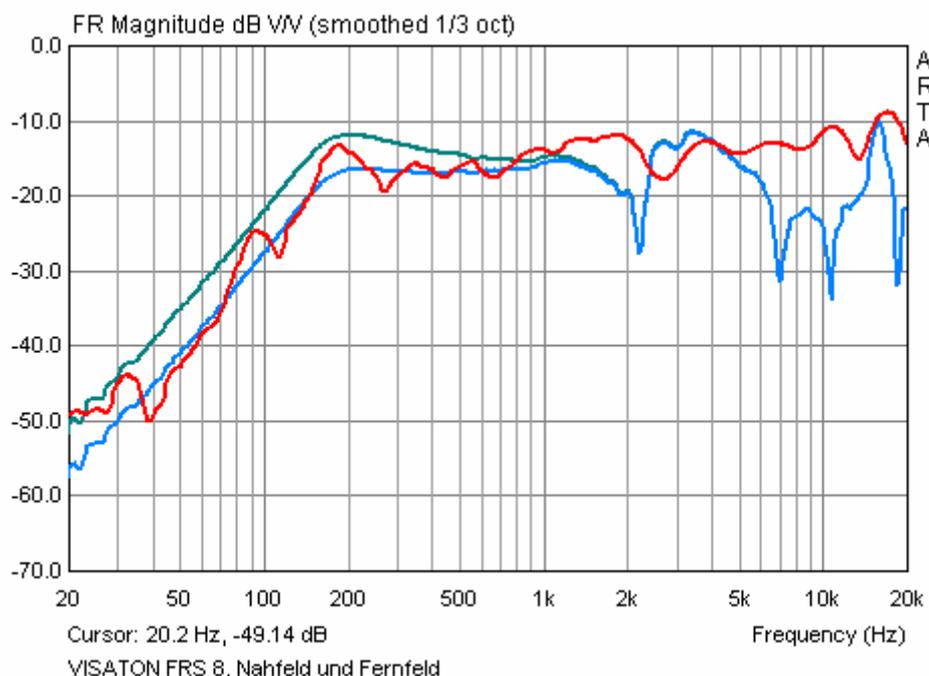
Nach Betätigung von OK sollte Bild 8 erscheinen.

4. Speichere diese Kurve als Overlay.

5. Kehre zum Impuls-Fenster zurück und lade die Impulsantwort des bei 48 cm gemessenen Lautsprechers. Setze den Cursor und führe das Kommando '**Analyze->Smoothed frequency response**' aus. Letztendlich sollte Bild 9 erscheinen:



**Bild 8:** Nahfeldfrequenzgang auf 48 cm skaliert (blaugrün) und mit Baffle Step Equalizer korrigiert (schwarz)



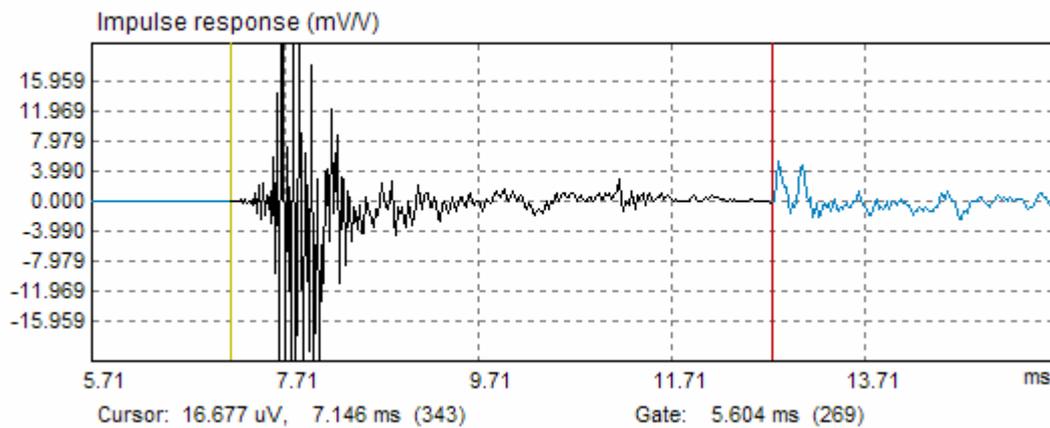
**Bild 8:** Nahfeldfrequenzgang auf 48 cm skaliert (blaugrün), mit Baffle Step Equalizer korrigiert (hellblau) und Fernfeldfrequenzgang (rot) in 48 cm

Wir sehen, dass der bei 48 cm gemessene Frequenzgang (rot) aufgrund von Raumresonanzen eine starke Welligkeit aufweist, aber grundsätzlich recht gut mit dem korrigierten Nahfeldfrequenzgang übereinstimmt (hellblau).

### 5. Ermittlung des Gesamt-Freifeldfrequenzganges

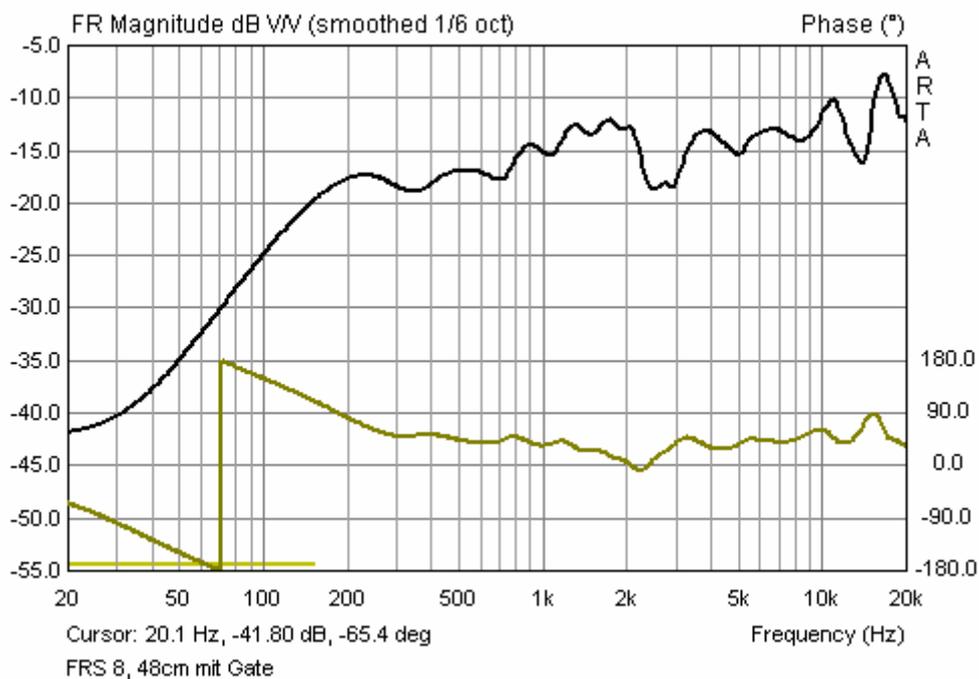
Eine recht gute Annäherung des Freifeldfrequenzganges im gesamten interessierenden Frequenzband erhalten wir durch die Kombination des Nahfeldfrequenzganges bei tiefen Frequenzen mit dem "gefensterten" Quasi-Freifeldfrequenzgang.

Wir beginnen mit der Betrachtung der Impulsantwort wie in Bild 9 gezeigt. Wie bereits ausgeführt, erhalten wir den Quasi-Freifeldfrequenzgang, wenn wir ab der ersten Reflektion den Rest ausblenden. Das Gate wird mit dem Cursor (gelbe Linie) und dem Marker (rote Linie) gesetzt.



**Bild 9:** Impulsantwort in 48 cm mit Gate von 5,604 ms

Nach Ausführung des Kommandos 'Analysis->Smoothed frequency response' erhalten wir Bild 10.



**Bild 10:** gefensterter Quasi-Freifeldfrequenzgang

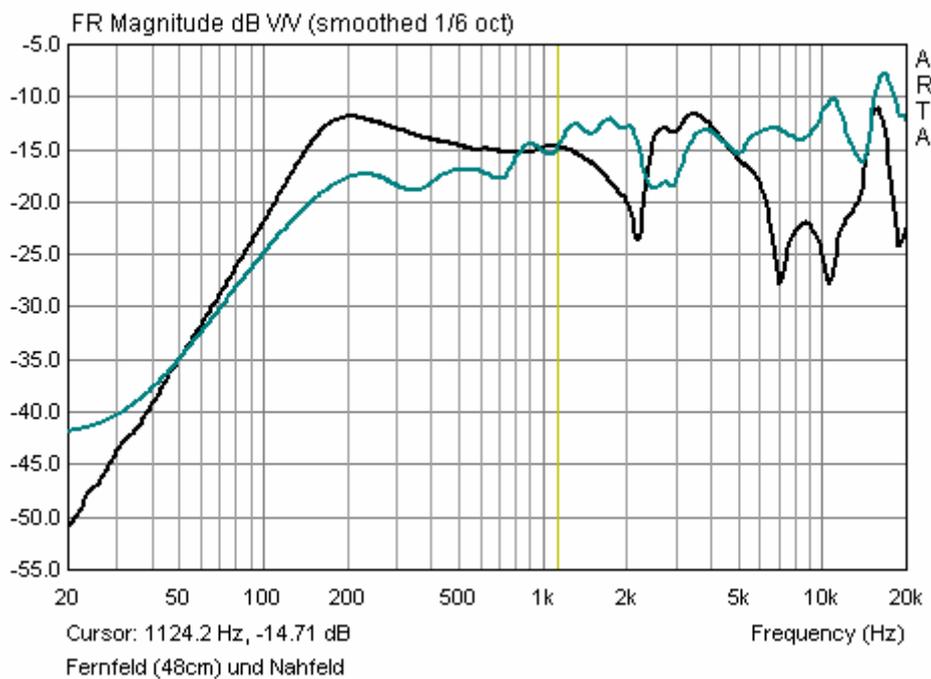


# ARTA - APPLICATION NOTE

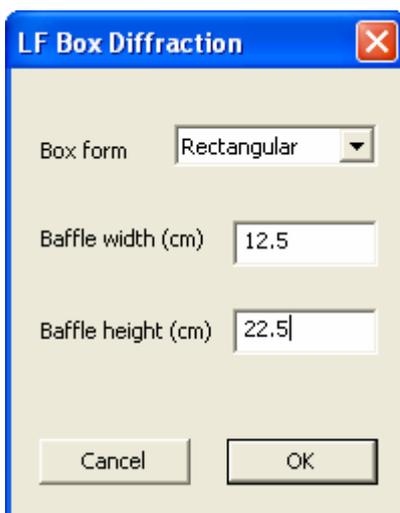
## No 4: Ermittlung des Freifeld-Frequenzgangs

Wir sichern diese Kurve als Overlay. Die gelbe Linie am unteren Rand des Bildes zeigt an, oberhalb welcher Frequenz die Messung beim gewählten Fenster von 5,604 ms Gültigkeit hat. ( $1/\text{Gate} = 1000/5.604 = 178.4 \text{ Hz}$ )

Nun laden wir den Nahfeldfrequenzgang, skalieren ihn mit dem Faktor  $a/2r = 3.2 / (2 \cdot 48)$  und erhalten Bild 11.



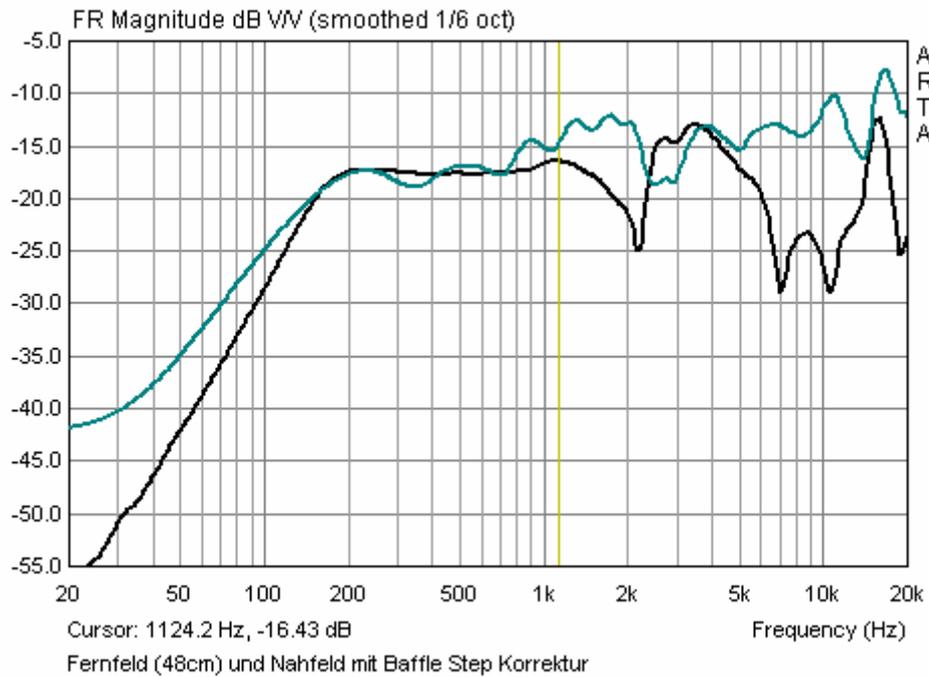
**Bild 11:** gefensterter Quasi-Freifeldfrequenzgang (grünblau) und Nahfeldfrequenzgang (schwarz)



Jetzt wenden wir die Baffle Step Korrektur mit dem Kommando '**Edit->LF box diffraction**' an.

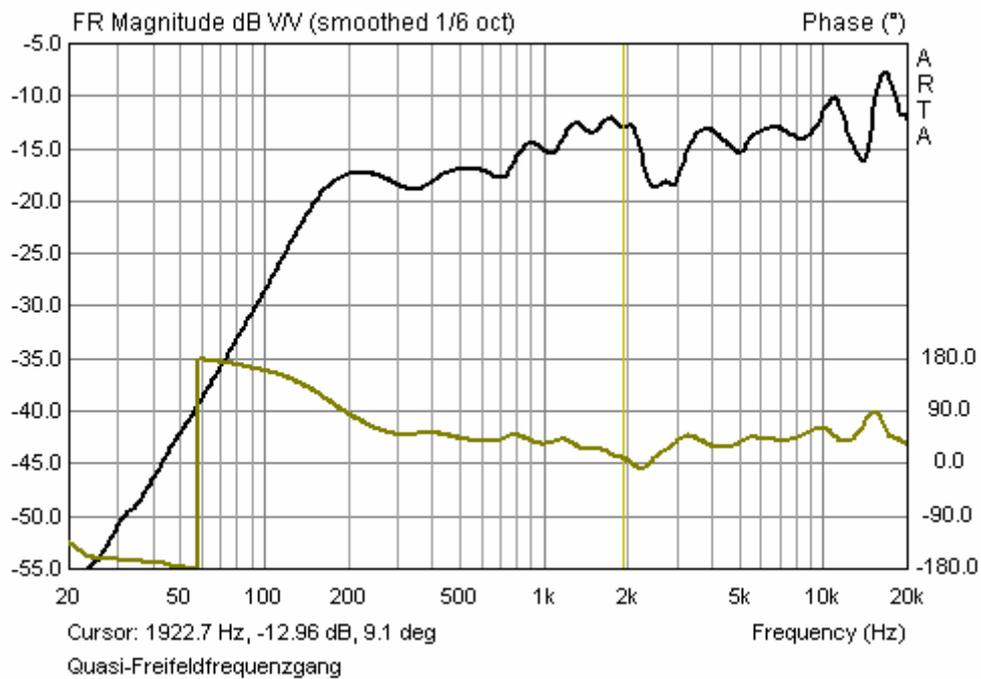
In der erscheinenden Dialogbox geben wir die Daten des verwendeten Lautsprechergehäuses an.

Nach Durchführung der Korrektur sollten Nahfeldfrequenzgang und der gefensterter Frequenzgang recht dicht zusammen liegen.



**Bild 12:** gefensterter Quasi-Freifeldfrequenzgang (grünblau) und Nahfeldfrequenzgang (schwarz) mit Baffle Step Korrektur

In unserem Beispiel haben beide Kurven bei 234 Hz in etwa den gleichen Wert und können dort zusammengefügt werden.



**Bild 13:** Gesamter Quasi-Freifeldfrequenzgang



Dazu sind zwei Kommandos auszuführen:

- 1) **Edit -> Merge overlay above cursor**
- 2) **Edit -> Delete all overlays**

Und wir erhalten abschließend den angenäherten Freifeldfrequenzgang des Lautsprechers im gesamten interessierenden Frequenzband.

***Anmerkung:** Häufig ist zur idealen Anpassung der Kurven eine zusätzliche Skalierung von 1-2 dB erforderlich. Dabei ist zu beachten, dass immer der Nahfeldfrequenzgang an den Fernfeldfrequenzgang angepasst wird.*

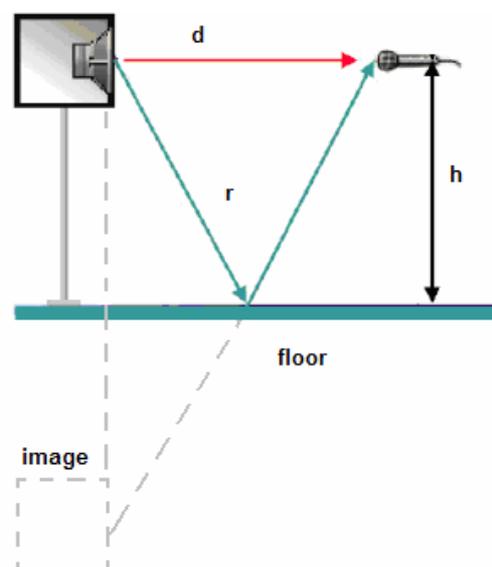
Wir können diese Daten nun zur weiteren Verwendung in Simulationsprogrammen über '**File->Export ASCII**' als ASCII-Datei sichern.

## 6. Zusammenfassung

Für die Abschätzung des Freifeldfrequenzganges eines Lautsprechers aus Messungen in normalen Wohnräumen, werden die folgenden Daten benötigt:

- 1) effektiver Membranradius  $a$  (Membranradius plus  $1/3 - 1/2$  der Sickenbreite)
- 2) Nahfeldfrequenzgang mit einem Messabstand  $d < a/20$
- 3) Gefensterter Fernfeldfrequenzgang mit einem Messabstand  $d > 6a$

Die beste Abschätzung erhalten wir, wenn die gefensterterte Impulsantwort frei von Reflektionen ist. Es wird empfohlen, dass das Messfenster 5ms oder mehr betragen sollte (was mit einer unteren Frequenzgrenze von ca. 200 Hz korrespondiert). Praktisch bedeutet dies, dass ein korrekter Messaufbau einen Abstand  $h$  von der nächsten reflektierenden Wand oder dem Boden haben muss, sodass die Zeitverzögerung der ersten Reflektion gegenüber dem Direktschall größer als 5ms ist.



**Bild 14:** Messaufbau zur Ermittlung des Frequenzgangs



Bild 14 illustriert die Methode zur Ermittlung der Laufzeitunterschiede. In diesem Beispiel nehmen wir an, dass der Boden die nächste reflektierende Fläche ist.

Aus dem Laufweg des Direktschalls  $d$  und der Messhöhe  $h$  können wir den Laufweg der ersten Reflektion  $r$  berechnen.

$$r = 2\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + h^2}$$

und das Delay  $\Delta t$  der ersten Reflektion

$$\Delta t = \frac{r - d}{c} = \frac{2\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + h^2} - d}{c}$$

Nun können wir die Bedingungen für die Messhöhe über dem Boden durch folgende Gleichung formulieren

$$h = \sqrt{\left(\frac{d + c\Delta t}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Für das oben gezeigte Beispiel - mit einem Messabstand von  $d=48\text{cm}$  und einer Mindestvorgabe für das Delay von  $5\text{ ms}$  - erhalten wir für  $h = 1.08\text{ m}$ . Das heisst, wir müssen Lautsprecher und Mikrofon  $1.08\text{m}$  über dem Boden und frei von allen anderen reflektierenden Flächen halten, um ein Delay gegenüber der ersten Reflektion von mehr als  $5\text{ms}$  zu erhalten.

## 7. Literatur

Mateljan I., Models for the Estimation of the Loudspeaker In-Room Response, *Int. Journal for Engineering Modeling*, vol. 6., No.1-4, 1993, ISSN 1330-1365

Kinsler, Frey, Coppens, Sanders: *Fundamental of Acoustics*, J. Wiley, New York, 2000