

# ARTA , STEPS , LIMP

## Ein kleines Kompendium für die Programme der ARTA-Familie

### **Basismaterial ARTA-Handbücher**

Dr. Heinrich Weber, deutsche Bearbeitung und Ergänzungen

Dr. Ivo Mateljan, englische Originalhandbücher

Version 2.20D, Mai 2009

# Änderungen Version 2.0D

Kapitel	Hinweis zu Änderungen / Ergänzungen
2.	Redaktionelle Änderungen
3.	Modifikation der Stückliste
3.1	Ergänzung der Anpassungsberechnung
5.	Ergänzung um einen Hinweis
5.4.2	NEU: Kalibrierung von Mikrofonen unterhalb 500 Hz
5.5	NEU: Überprüfung des Messverstärkers
6.	Ergänzung, Modifikation
6.1	NEU: Messung der Nachhallzeit
7.1	Anpassung an ARTA Version 1.1.1
8.	NEU
8.1.1	NEU: Grafische Darstellung
8.1.2	NEU: Overlays
11.	NEU: Spezifikationen
11.1	NEU: Ermittlung von Xmax
12.	Ergänzung der Literatur
13.	NEU: Annex mit nützlichen Tools

# Änderungen Version 2.1D – ARTA 1.4

Kapitel	Hinweis zu Änderungen / Ergänzungen
1.	NEU: <a href="#">Erste Schritte mit ARTA</a> .
3.	Modifikation: <a href="#">Kalibrierung bei einkanaliger Messung</a>
4.	Ergänzung: <a href="#">Qualitätsbeurteilung von Soundkarten</a>
5.	Ergänzung: <a href="#">Grundsätzliches zur Kalibrierung der Messkette</a>
6.1	Ergänzung: <a href="#">Signal/Störabstand</a>
7.1	NEU: <a href="#">eine schnelle Methode zur Ermittlung von Verzerrungen (Farina)</a>
6.1.2	Ergänzung: <a href="#">Wie sehen Impulsantworten aus</a>
6.3	NEU: <a href="#">Short Cut jetzt auch für Marker</a>
7.2	NEU: <a href="#">Schallpegelmessung (ARTA 1.4)</a>
6.3	Ergänzung: <a href="#">Beachtenswertes beim Messaufbau für akustische Messungen</a>
7.3	NEU: <a href="#">Detektieren von Resonanzen</a>
7.3	NEU: <a href="#">Overlay Impulsantwort (ARTA 1.4)</a>
7.3	Ergänzung: <a href="#">Erweiterung CSD auf 2048 FFT</a>
10.2.1	Ergänzung: <a href="#">genaue Widerstandsmessung mit Billigmultimeter</a>
10.4	Ergänzung: <a href="#">Hinweis auf die Qualität von Messkabeln und -klemmen</a>
	NEU: Spannungs- oder leistungsbezogene Messungen
AN07	NEU: Messung von XLin
	NEU: Grid in Spektrogramm
	NEU: Dual Gate
	NEU: <a href="#">Delay Finder in FR2</a>

# Änderungen Version 2.2D – ARTA 1.5

Kapitel	Hinweis zu Änderungen / Ergänzungen
3	Modifikation: <a href="#">ARTA Messbox</a>
6.2.2	NEU: <a href="#">Automatische Ermittlung raumakustischer Parameter</a>
6.4.2	Ergänzung: <a href="#">Zusammenfügen von Reflexkanal und Membran im Nahfeld</a>
6.6	NEU: <a href="#">Umgang mit Targets</a>
6.6	NEU: <a href="#">Delay zur Phasen Anpassung</a>
7.4	NEU: <a href="#">Wav-Files mit Arta-Generator erzeugen</a>
8.4	NEU: <a href="#">ARTA effektiver nutzen</a>
14	NEU: Formelsammlung
15	NEU: <a href="#">Index</a>
	NEU: Octave SPL and Noise Rating
	NEU: Third Octave SPL and Noise Rating

## Inhalt

<b>0.</b>	<b>Vorwort .....</b>	<b>6</b>
<b>1.</b>	<b>Erste Schritte mit ARTA .....</b>	<b>6</b>
1.1	Voraussetzungen für die Nutzung und Installation .....	6
1.2	ARTA für Eilige .....	7
<b>2.</b>	<b>Messaufbau, prinzipielle Möglichkeiten .....</b>	<b>12</b>
<b>3.</b>	<b>Die ARTA-MessBox .....</b>	<b>14</b>
3.1	Zweikanalige kalibrierte Messungen mit der ARTA-MessBox .....	16
3.2	Einkanalige kalibrierte Messungen .....	19
<b>4.</b>	<b>Testen der Soundkarte .....</b>	<b>20</b>
<b>5.</b>	<b>Kalibrierung der Messkette .....</b>	<b>29</b>
5.1	Kalibrierung der Soundkarte .....	30
5.1.1	Kalibrierung der Ausgangskanäle .....	31
5.1.2	Kalibrierung der Eingangskanäle .....	32
5.2	Pegelkalibrierung des Mikrofons .....	33
5.2.1	Eingabe der Empfindlichkeiten aus der Spezifikation .....	33
5.2.2	Berechnung der Empfindlichkeit aus einer Nahfeldmessung .....	34
5.2.3	Hochtöner als Kalibrator .....	38
5.3	Kompensierung von Frequenzgangfehlern des Mikrofons .....	42
5.3.1	Kalibrierung mittels eines hochwertigen Referenzmikrofons > 200 Hz .....	44
5.3.2	Kalibrierung unterhalb 500 Hz in einer Druckkammer .....	46
5.4	Prüfung des Messverstärkers .....	50
<b>6.</b>	<b>Messen mit ARTA .....</b>	<b>55</b>
6.0	Allgemeines .....	55
6.0.1	Messleitungen .....	56
6.0.2	Der Signal/Störabstand der Messkette .....	57
6.0.3	Mittelungen .....	59
6.1	Impulsantworten – Theorie und Praxis .....	60
6.2	Messen, aber wo? .....	63
6.2.0	Messen unter Wohnraumbedingungen .....	68
6.2.1	Ermittlung der Nachhallzeit – Kenngrößen des Raumes .....	79
6.2.2	Die automatisierte Auswertung der Nachhallzeit .....	85
6.3	Messaufbau für akustische Messungen an Lautsprechern .....	87
6.4	Skalieren und Fügen von Nah- und Fernfeldmessungen .....	96
6.4.1	Closed Box .....	96
6.4.2	Bassreflexbox .....	102
6.5	Load and Sum .....	107
6.6	Arbeiten mit Targets .....	110
<b>7.</b>	<b>Sondermessungen und Beispiele .....</b>	<b>118</b>
7.1	Messen von harmonischen Verzerrungen mit Gleitsinus .....	118
7.2	Schallpegelmessung mit ARTA .....	121
7.3	Detektieren von Resonanzen .....	126
7.4	Wav-Files zur externen Signalanregung mit ARTA erzeugen .....	132

<b>8.</b>	<b>Umgang mit Messdaten, Datenfiles, Shortcuts etc.</b>	<b>133</b>
8.1	Grafische Darstellungen in ARTA	133
8.1.1	Ausgabe und Formatierung von Diagrammen	133
8.1.2	Handhabung von Overlays	135
8.2	Bearbeiten von Messdaten und Datenfiles	137
8.3	Scale und Scale Level	139
8.4	Keyboard Shortcuts – ARTA effektiver Nutzen	140
<b>9.</b>	<b>Messen mit STEPS</b>	<b>141</b>
9.1	Grundeinstellung von STEPS	141
9.2	Frequenzgang- und Verzerrungsmessungen mit STEPS	143
9.3	Spannungs- oder leistungsbezogene Messung mit STEPS	145
<b>10.</b>	<b>Messen mit LIMP</b>	<b>146</b>
10.1	Grundeinstellung von LIMP	146
10.2	Ermittlung der TSP	148
10.2.1	Volumenmethode	148
10.2.2	Massemethode	152
10.2.3	Anmerkungen zu TSP-Messungen	154
10.2.4	Messung des Gleichstromwiderstandes mit einem Billig-Multimeter	155
10.3	RLC-Messung mit LIMP	156
10.4	Die Genauigkeit der Impedanzmessung	158
<b>11.</b>	<b>Empfehlungen für Lautsprecherspezifikationen</b>	<b>159</b>
11.1	Ermittlung der Auslenkung $X_{MAX}$	160
<b>12.</b>	<b>ARTA Application Notes</b>	<b>164</b>
<b>13.</b>	<b>Literatur</b>	<b>164</b>
<b>14.</b>	<b>Kleine Formelsammlung</b>	<b>166</b>
<b>15.</b>	<b>Index</b>	<b>167</b>

## 0. Vorwort

Das vorliegende Kompendium soll Erstanwendern die Nutzung der ARTA-Programmfamilie nahe bringen. Es beschränkt sich im Wesentlichen auf Lautsprechermessungen. Das Kompendium ist weder eine Übersetzung noch ein Ersatz für das englischsprachige Originalhandbuch. Es wird empfohlen, auch die Originalhandbücher zu Rate zu ziehen.

Es ist vorgesehen, das Kompendium im Laufe der Zeit ständig zu ergänzen. Eine zusätzliche Informationsquelle stellt die ARTA-Homepage dar. Dort werden für den Anwender aktuelle Information und Application-Notes bereitgestellt. Anregungen seitens der Nutzer bzgl. Themen und Programmiererweiterungen sind jederzeit willkommen.

Zurzeit ist es nicht vorgesehen, die Menüführung der ARTA-Familie zwei- oder gar mehrsprachig anzubieten. Aus diesem Grunde werden im vorliegenden Kompendium die englischsprachigen Begriffe verwendet, um den Bezug zu den jeweiligen Feldern und Masken zu behalten.

Die Programme der ARTA-Familie umfassen derzeit ARTA, STEPS und LIMP. Der Anwendungsbereich kann kurz wie folgt beschrieben werden:



**ARTA** – Messung der Impulsantwort, Übertragungsfunktion und Real Time Analysator



**STEPS** – Übertragungsfunktion, Verzerrungsmessungen



**LIMP** – Impedanzmessungen an Lautsprechern und Bestimmung der TSP

*Anmerkung: Einige der hier vorgestellten Methoden sind ausschließlich für den DIY-Bereich geeignet. Sie sind ein Zugeständnis an die eingeschränkte Verfügbarkeit hochwertiger Normale.*

## 1. Erste Schritte mit ARTA

### 1.1 Voraussetzungen für die Nutzung und Installation

Die Nutzung der Programme der ARTA-Familie setzt voraus, dass die folgenden Bedingungen erfüllt sein müssen:

Betriebssystem: Windows 98 /ME / 2000 / XP / VISTA  
 Prozessor: Pentium, 400 MHz oder höher, Speicher 128k  
 Soundkarte: voll duplexfähig

Bislang wurden folgende Soundkarten erfolgreich eingesetzt:

Terratec EWX 24/96,  
 TASCAM US-122 - USB audio,  
 Digigram VxPocket 440 – eine PCMCIA Karte,  
 Echo Layla 24,  
 M-Audio Audiophile 2496, USB Transit, Delta 44,  
 RME, YAMAHA GO46, GO44 und DAL Professional Audio Soundkarten,  
 Ego-Sys U24 USB und Waveterminal,  
 Soundblaster Live 24 und Extigy-USB (nur mit 48kHz),  
 Turtle Beach Pinnacle und Fuji Karten,

Mit Einschränkungen können folgende Soundkarten genutzt werden:

Soundblaster MP3+ USB (Anmerkung: Bitte installieren Sie nicht den SB-Treiber, nutzen sie den Windows XP Default Treiber),

Soundkarten und On-Board-Audio mit AC97 Codecs (Probleme mit Rauschen im FTT Mode).

Weitere aktuelle Informationen über erfolgreich eingesetzte Soundkarten finden Sie auf der Homepage von ARTA: <http://www.fesb.hr/~mateljjan/arta/index.htm>

Die **Installation der Programme** ist sehr einfach. Kopieren Sie die Dateien in ein Verzeichnis und entpacken Sie sie anschließend. Das ist alles! Alle erforderlichen Einträge in die Registry werden nach dem ersten Programmstart automatisch gesichert.

## 1.2 ARTA für Eilige

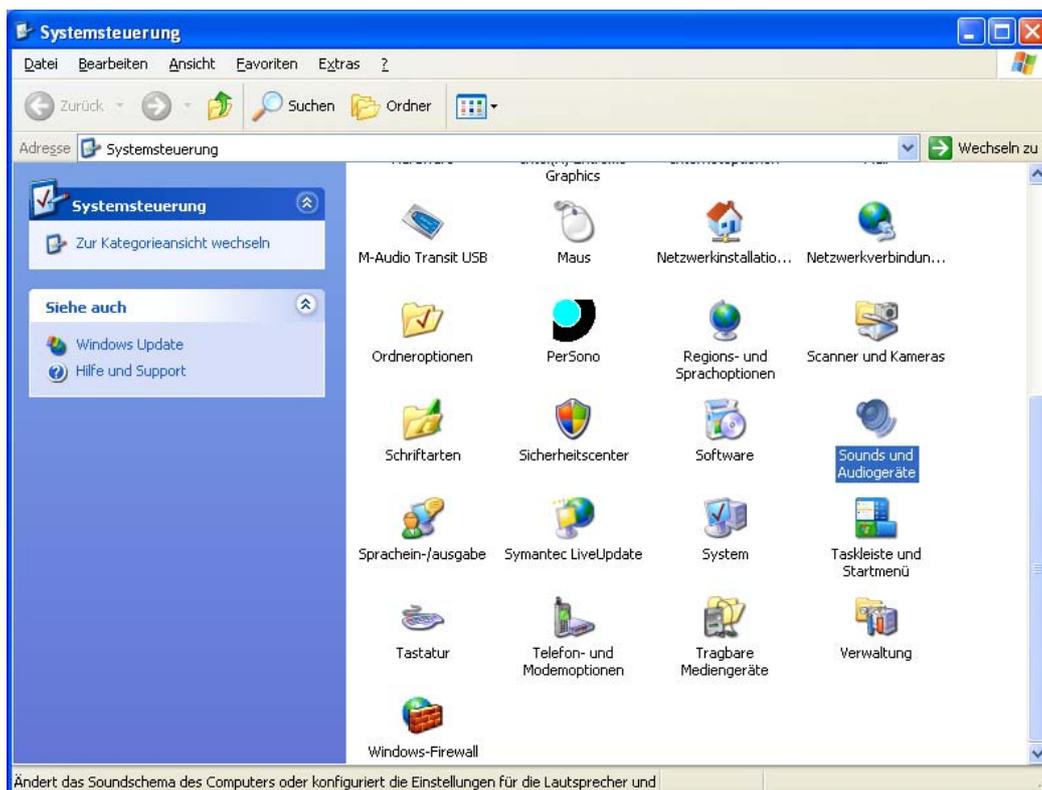
Es ist durchaus zu verstehen, dass es nach der Installation eines Programms sofort ans Eingemachte – in diesem Fall ans Messen – gehen soll, aber geben Sie sich und ARTA eine Chance und bearbeiten zunächst diesen Abschnitt. In aller Kürze werden die Punkte angesprochen, die zur Inbetriebnahme eines Messsystems mit ARTA bzw. für eine einkanalige Frequenzgangmessung (s. Bild 2.1) oder eine Impedanzmessung (s. Bild 2.4a oder Bild 2.4b) zu beachten sind. Weitergehende Erläuterungen finden Sie in den jeweils angegebenen Kapiteln.

### Soundkarte

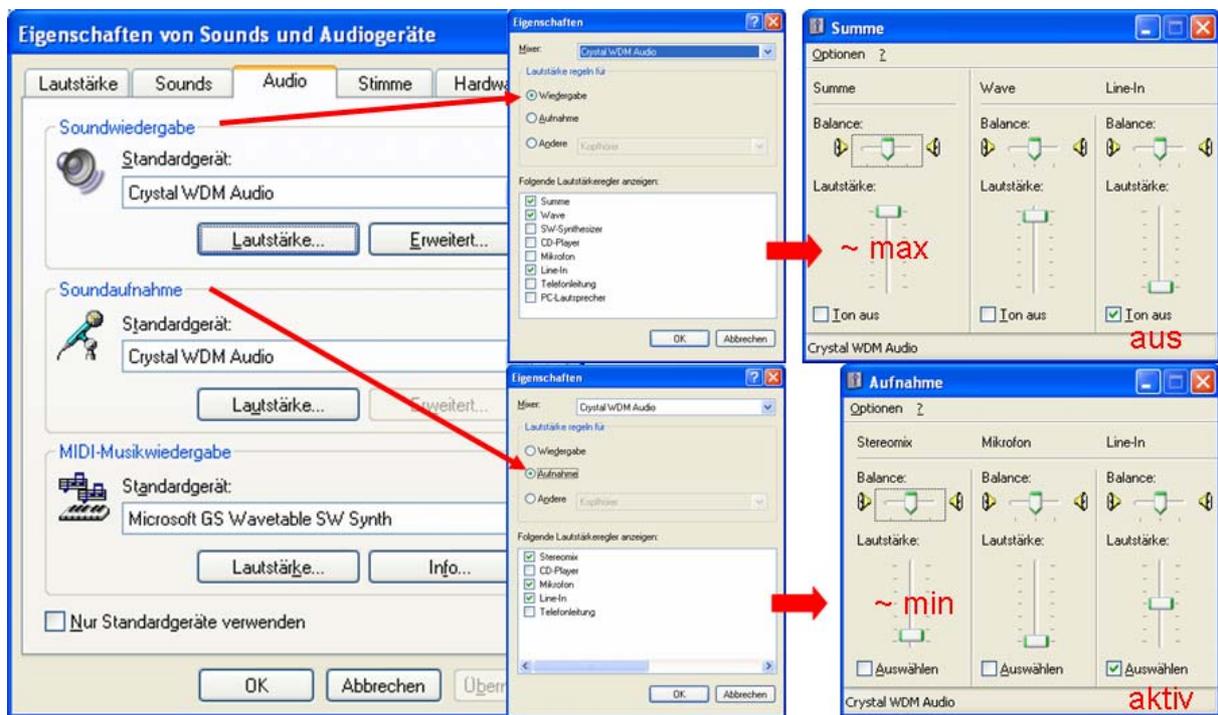
Bevor Sie starten, prüfen Sie bitte auf der ARTA-Homepage (Adresse s. oben), ob es zu Ihrer Soundkarte weiterführende Informationen zur Installation oder gar Einschränkungen gibt.

### Soundmixer einstellen

Der häufigste Fehler, der beim Schnellstart gemacht wird, ist die Übersteuerung der Soundkarte. Gehen Sie daher zunächst ins Menü Systemsteuerung und öffnen Sounds und Audiogeräte.



Nehmen Sie nun am Soundmixer die unten am Beispiel einer Onboard-Soundkarte gezeigten Einstellungen der Aufnahme- und Ausgabekanäle vor.

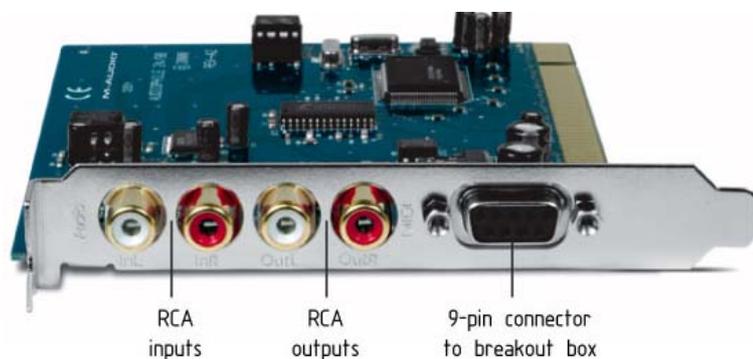


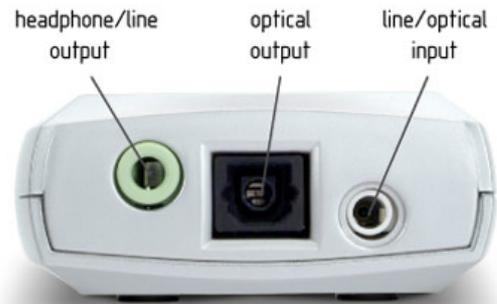
- Aktivieren Sie Line-In im Aufnahme-Mixer.
- Setzen Sie die Lautstärke im Aufnahme-Mixer nahezu auf Minimal.
- Deaktivieren Sie Line-In im Ausgabe-Mixer.
- Setzen Sie die Lautstärke im Ausgabe-Mixer auf nahezu Maximum.

### Loopback-Messung

Jetzt sind wir fast bereit für die erste Messung mit ARTA. Schauen Sie sich aber zunächst Bild 2.5 an und verbinden Eingänge und Ausgänge Ihrer Soundkarte entsprechend mit einem passenden Loopback-Kabel.

Je nach vorhandener Soundkarte benötigen Sie eines der unten gezeigten Kabel.





Jetzt geht es mit einem kleinen Ausflug ins [Kapitel 4](#) weiter. Dort wird die Pegelanpassung der Ein- und Ausgabekanäle der Soundkarte beschrieben. Ferner erhalten Sie über die dort beschriebenen Prozeduren erste Hinweise über die Qualität Ihrer Soundkarte.

So weit so gut, aber die Loopback-Messung dient lediglich der Einstellung des Mixers und dem Test der Soundkarte. Vermutlich wollen Sie aber den Frequenzgang Ihrer Lautsprecher messen. Was dazu noch fehlt ist ein Messmikrofon.

Sofern Ihre Soundkarte die Versorgungsspannung für die Mikrofonkapsel liefert, können Sie mit einem einfachen Selbstbau-Elektret-Mikrofon arbeiten. Bitte prüfen Sie also zunächst im Handbuch der Soundkarte, ob ein Hinweis zur Versorgungsspannung zu finden ist (s. nachfolgende Beispiele).

#### M-Audio Transit

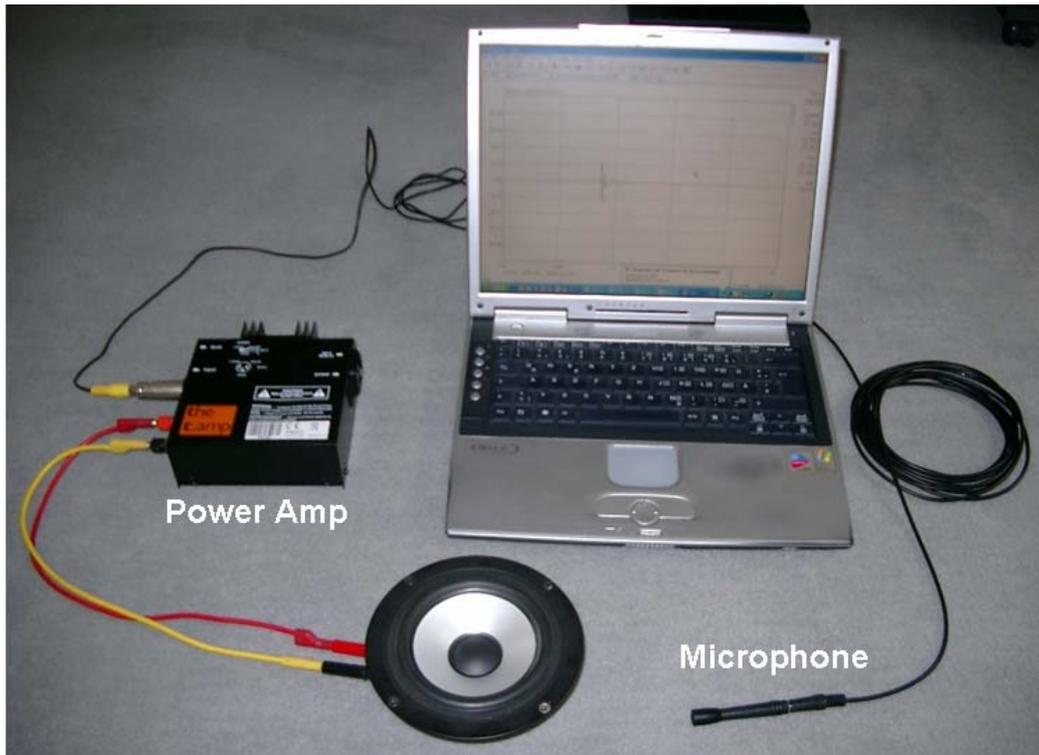
**Mic/Line-Eingang (optisch/analog)** – An diesen wahlweise optisch/analoge Anschluss kann ein analoges Eingangssignal (3,5 mm Stereo-Mini-Klinke) oder ein optisch-digitales Eingangssignal adressiert werden. Für die Übertragung optisch-digitaler Audio-Signale verwenden Sie bitte den mitgelieferten Mini-Adapter. Die Erkennung des jeweiligen Eingangssignals erfolgt automatisch. Der analoge Eingang kann ebenso als Mikrofonanschluss genutzt werden und liefert die für den direkten Anschluss von Elektret-Kondensatormikrofonen erforderliche Vorspannung.

#### EMU Tracker Pre

##### Stereo Mic Input

This 1/8" mini-phone jack is designed to accept a stereo, electret condenser microphone. The jack supplies +5VDC phantom power. Mono microphones can also be connected and will use input 1L. **Note:** The Stereo Mic jack takes precedence over the Hi-Z/Mic/Line inputs. Inserting a 1/8" plug disables the other inputs.

Der Aufbau eines Messmikrofons ist denkbar einfach. Im **ARTA Hardware & Tools Handbuch** finden Sie Details zum Nachbau.

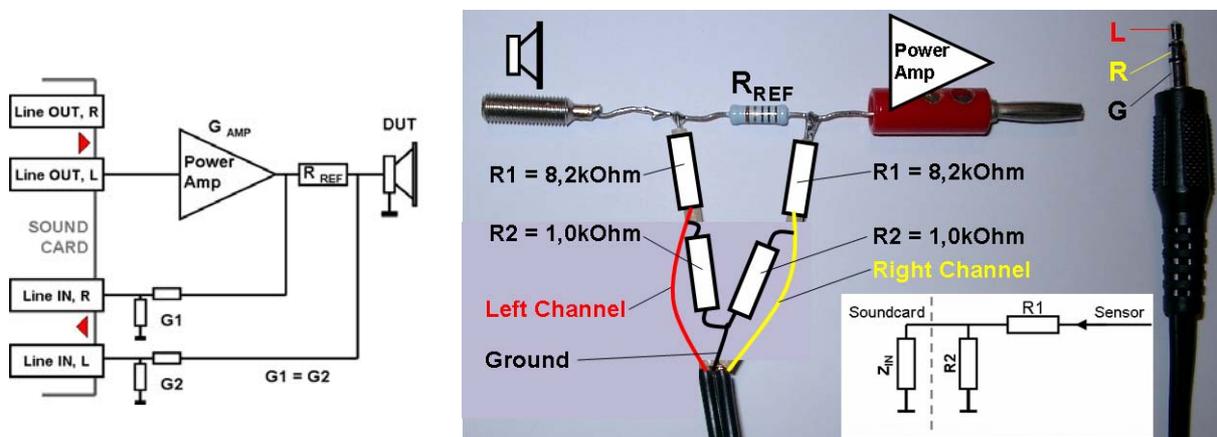


Mit der Minimalausstattung für akustische Messungen (Rechner mit Onboard-Soundkarte, Leistungsverstärker, Messmikrofon) und den oben geschilderten Grundeinstellungen können Sie nun die ersten Messungen durchführen.

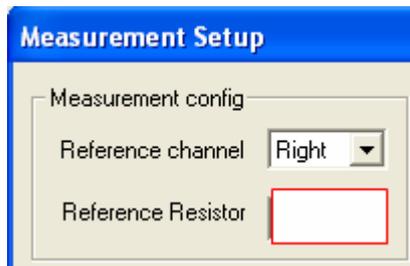
### Einfacher Messaufbau zur Impedanzmessung mit LIMP

Sofern Sie eine Soundkarte mit Kopfhörerausgang haben, nutzen Sie den Messaufbau gemäß Bild 2.4b. Zur Messung benötigen Sie lediglich einen 100 Ohm Referenzwiderstand und ein wenig geschirmtes Kabel.

Sollte Ihre Karte keinen Kopfhörerausgang haben, so können Sie folgenden Messaufbau verwenden. Je nach Eingangsbuchse der Soundkarte (Klinke oder Chinch) nehmen Sie am Besten ein fertiges Kabel und schneiden das nicht benötigte Ende ab. Ferner benötigen Sie einen Bananenstecker, eine Buchse, einen 27 Ohm (5 Watt) Referenzwiderstand sowie jeweils zwei 8,2 kOhm und 1,0 kOhm  $\frac{1}{4}$  Watt Widerstände. Die Anleitung zum praktischen Aufbau kann dem folgenden Bild entnommen werden.



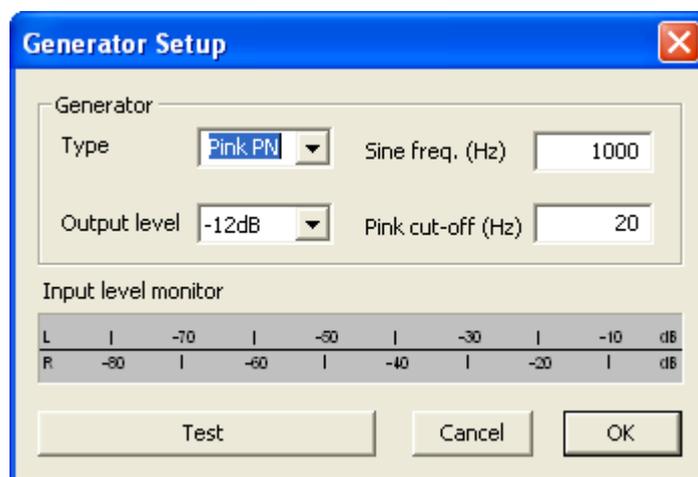
Jetzt sind vor der Messung lediglich noch - unabhängig vom Messaufbau - drei Einstellungen vorzunehmen:



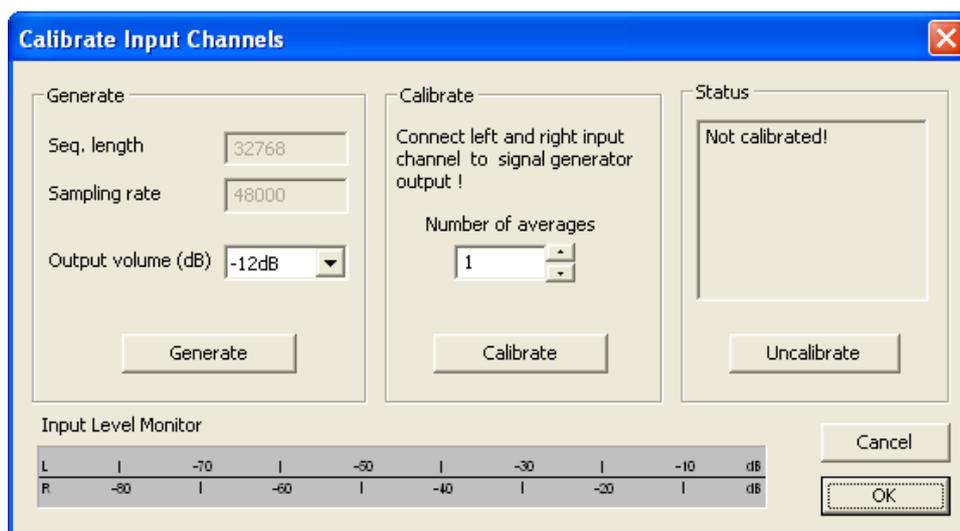
Definieren Sie im Menü „Measurement Setup“ im Bereich „Measurement Config“ den Referenzkanal (rechts) und den Referenzwiderstand (z.B. 27 Ohm).

**Anmerkung:** Der gewählte Referenzwiderstand sollte im Bereich zwischen 10 Ohm und 47 Ohm liegen und genau bekannt sein.

Stellen Sie vor der Messung im Menü „Generator Setup“ den Ausgangspegel so ein, dass die Eingangskanäle nicht übersteuert werden.



Jetzt kalibrieren Sie das System im Menü „Calibrate Input Channels“. Verbinden Sie dazu den linken und den rechten Eingangskanal der Soundkarte mit dem Ausgang des Signalgenerators (Line Out), führen die Kalibrierung mit „Calibrate“ durch und verlassen das Menü über „OK“.



Weitere Informationen zur Messung von Impedanzgängen und TSP finden Sie im [Kapitel 10](#).

## 2. Messaufbau, prinzipielle Möglichkeiten

Im Originalhandbuch und im vorliegenden Kompendium wird auf folgende Messaufbauten Bezug genommen:

1. Einkanal Messaufbau
2. Semi-Zweikanal Messaufbau
3. Zweikanal Messaufbau
4. Messaufbau für Impedanzmessung
5. Messschleife (Loop back) für Soundkartentest
6. Prüfspitze (Probe)

In den folgenden Abbildungen werden alle aufgeführten Messanordnungen schematisch dargestellt. ARTA nutzt den linken Line-Ausgang der Soundkarte zur Ausgabe des Prüfsignals und den linken Line-Eingang für die Erfassung des DUT-Signals (Device Under Test). Der rechte Line-Eingang wird als Referenzkanal benutzt.

### Akustische Messungen

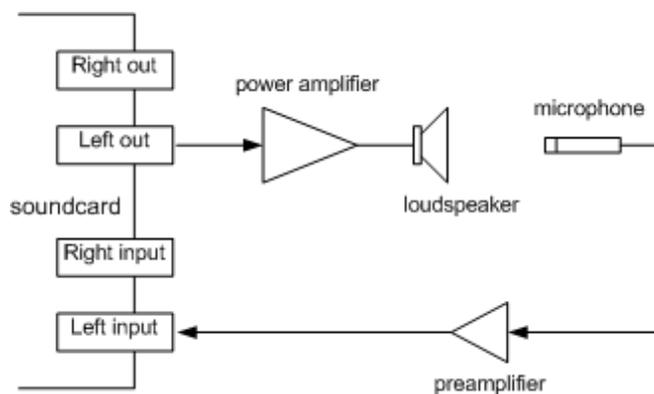


Bild 2.1: Einkanaliger Messaufbau

Bei der Einkanalmessung wird ausschließlich das Signal des DUT (hier Mikrofonsignal über Mikrofonvorverstärker) erfasst. Die Fehler der Soundkarte und des Leistungsverstärker sind im Messergebnis enthalten, sie werden nicht kompensiert.

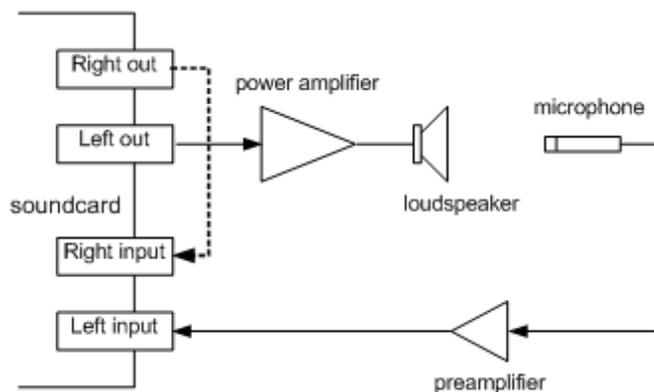


Bild 2.2: Semi-Zweikanal-Messaufbau

Bei der Semi-Zweikanalmessung wird der rechte Line-Ausgang als ‚Semi-Referenz‘ genutzt (Fehler der Soundkarte werden kompensiert).

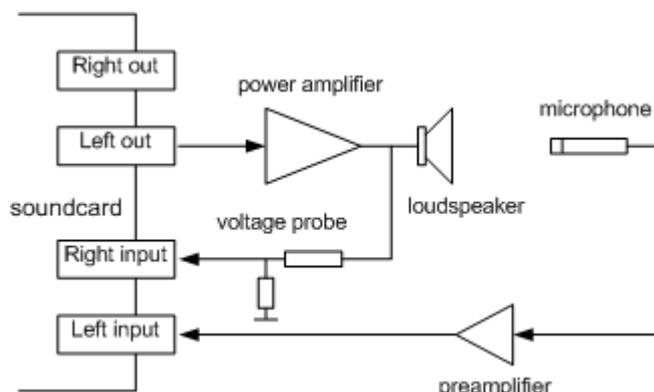


Bild 2.3: Zweikanal-Messaufbau

Im Zweikanal-Messaufbau wird das Referenzsignal am Ausgang des Leistungsverstärkers abgegriffen (Fehler von Soundkarte und Leistungsverstärker werden kompensiert).

Siehe auch ARTA-Messbox in Kapitel 3.

## Impedanzmessungen

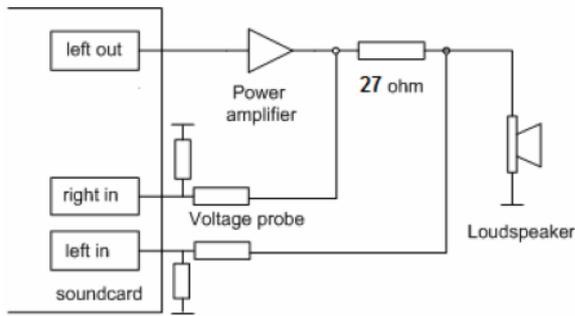


Bild 2.4a: Impedanzmessung mit Leistungsverstärker.

Siehe auch ARTA-Messbox in Kapitel 3.

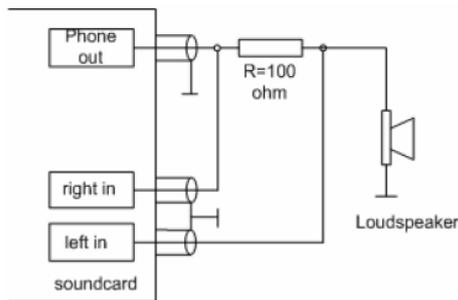


Bild 2.4b: Impedanzmessung am Kopfhörer-Ausgang der Soundkarte

Anm.: Kopfhörerausgänge von Soundkarten sind in der Regel nicht für den Betrieb niederohmiger Lasten ausgelegt!

## Test und Kalibrierung

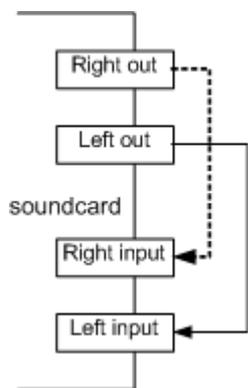


Bild 2.5: Messschleife für Soundkartentests

In der Messschleife (Loopback) werden jeweils die Line-Ausgänge mit den Line-Eingängen verbunden. Die Messschleife wird zum Testen der Soundkarte genutzt. Siehe hierzu auch Kapitel 4.

## Schutz der Soundkarte

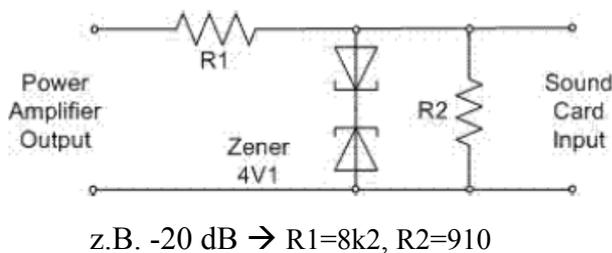


Bild 2.6: Messfühler (Probe)

Um den Eingang der Soundkarte vor zu großen Spannungen zu schützen, wird empfohlen, einen Spannungsteiler zu benutzen. Der links gezeigte Messfühler hat eine Abschwächung von 20dB, sofern die Soundkarte einen Eingangswiderstand von 10 kOhm hat. Dieser Schutz ist in der ARTA-MessBox bereits realisiert.

Für Anfänger auf dem Gebiet der Messtechnik wird empfohlen, die ARTA-MessBox aus Kapitel 3 zu verwenden.

### 3. Die ARTA-MessBox

Zur Vereinfachung von Messungen mit ARTA, LIMP und STEPS empfiehlt sich der Aufbau der ARTA-MessBox. Sie ist sowohl für Impedanzmessungen als auch für zweikanalige Frequenzgangmessungen ausgelegt und nimmt dem Anwender das umständliche Umstecken von Messleitungen ab.

Bei Messungen mit der ARTA-Messbox ist die Masse von Input und Output der Soundkarte nicht verbunden und somit gibt es bei kalibrierten Messungen keine Probleme mit Masseschleifen. Zum Aufbau siehe Bild 3.1 bis Bild 3.3 sowie [I] oder im ARTA Hardware & Tools Manual [22].



Bild 3.1: Die fertige ARTA-Messbox (links konventionell, rechts Platinenlösung)

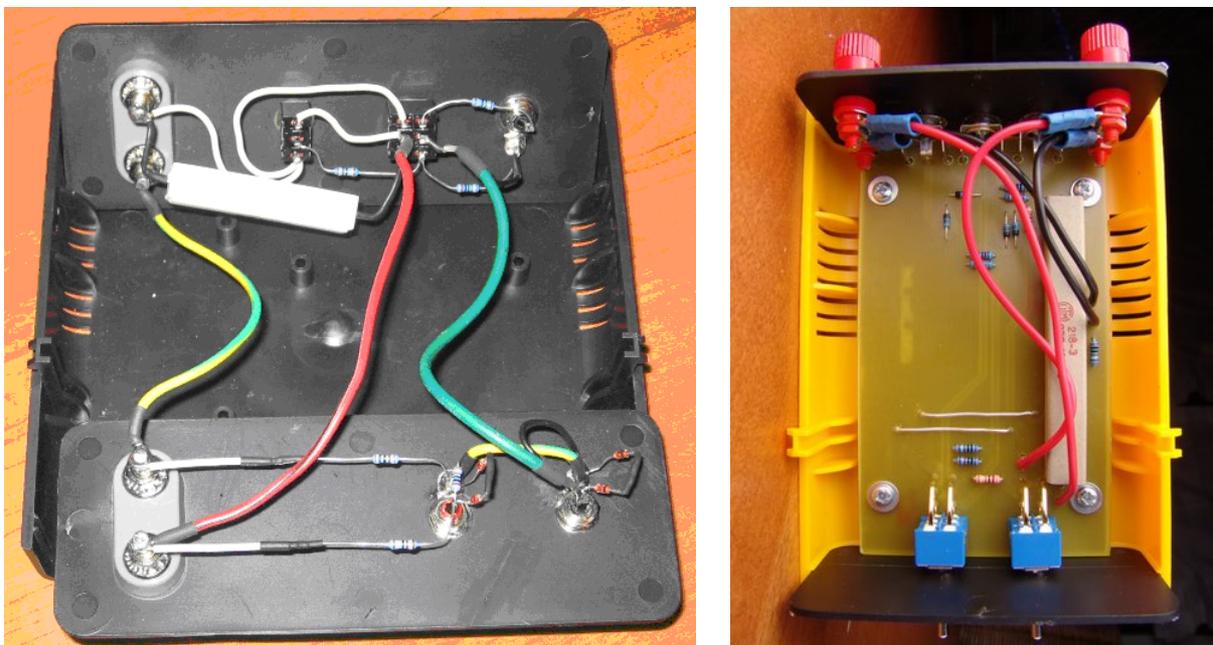
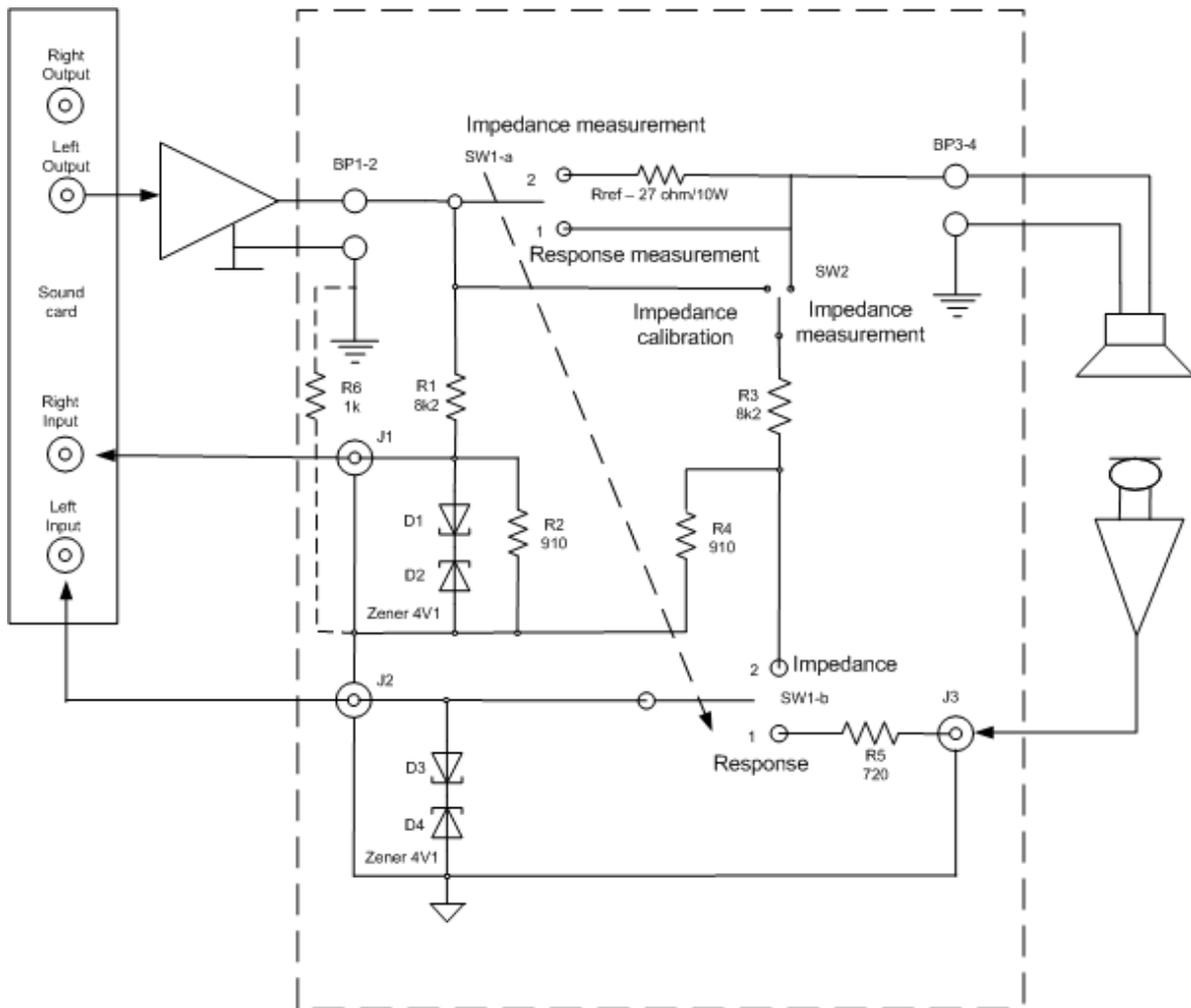


Bild 3.2: Das Innenleben der ARTA-Messbox (links konventionell, rechts Platinenlösung)



**Anm. 1** Die Masse des Leistungsverstärkers und der Soundkarte können optional durch einen 1k Widerstand getrennt werden (R6).

**Anm. 2** Achtung, verwenden Sie keinen Brückenverstärker mit virtueller Masse!

**Sicherheit** Die Eingänge der Soundkarte sind durch die Zenerdioden geschützt. Der Leistungsverstärker ist geschützt, wie vom Hersteller angegeben. Achten Sie darauf, dass die vom Hersteller angegebene nominelle Impedanz nicht unterschritten wird.

Bild 3.3: Schaltplan der ARTA-Messbox

**Anmerkung:** Bei einkanaligen akustischen Messungen ist die Messbox eigentlich nicht erforderlich. Wenn sie jedoch genutzt wird, sollte zumindest der Mikrofoneingang kalibriert werden.

### 3.1 Zweikanalige kalibrierte Messungen mit der ARTA-MessBox

Für eine kalibrierte Messung des Frequenzganges mit ARTA und STEPS im Zweikanalmode sollten die Verstärkungswerte für beide Eingangskanäle eingegeben werden (**Ext. preamp gain**). Es ist im Programm definiert, dass der rechte Eingangskanal der Soundkarte als Referenzkanal und der linke Kanal als Messkanal benutzt wird.

Die ARTA-MessBox ist so ausgelegt, dass sie für die meisten Anwendungsfälle geeignet sein sollte. Sofern eine Anpassung der ARTA-MessBox an die eigenen Bedürfnisse gewünscht ist, ist ein wenig Rechenarbeit erforderlich.

Im Folgenden wird sowohl die Anpassung als auch die Berechnung der „**Ext. Pream Gain**“-Werte für das „**Audio Devices Setup**“ beispielhaft mit der Standardbestückung der MessBox beschrieben.

#### Anpassung der MessBox an den Leistungsverstärker (Line IN, rechts)

Die Widerstände R1, R2 bilden zusammen mit der Eingangsimpedanz  $Z_{IN}$  der Soundkarte einen Spannungsteiler  $k$ , der durch

$$k = (R2 \parallel Z_{IN}) / (R1 + R2 \parallel Z_{IN}) \quad \text{mit } (R2 \parallel Z_{IN}) = R2 * Z_{IN} / (R2 + Z_{IN})$$

beschrieben wird. Das heißt, die maximale Spannung, die vom Leistungsverstärker zum rechten Line-In-Kanal der Soundkarte abgegeben werden kann, ist gleich

$$U_{MAX} = S \text{ [Volt RMS]} / k \quad \text{mit } S = \text{Eingangsempfindlichkeit der Soundkarte}$$

Dann ist die maximale Leistung, die bei der Messung genutzt werden kann, gleich

$$P_{MAX} = (S \text{ [Volt RMS]} / k)^2 / Z_{Speaker}$$

Mit den in der MessBox gewählten Werten für  $R1 = 8k2$ ,  $R2 = 910$  sowie einem üblichen Werte für  $Z_{IN} = 10k$  und einer Eingangsempfindlichkeit der Soundkarte = 1V berechnen wir für die Verstärkung des rechten Eingangskanals (**Ext. right preamp gain**, siehe Bild 3.4) folgenden Eingabewert

$$\text{Rechter Kanal} = (R2 \parallel Z_{in}) / (R1 + R2 \parallel Z_{in}) = (910 \parallel 10k) / (8k2 + (910 \parallel 10k)) = \mathbf{0.0923}$$

bei  $P_{MAX} = 29W$  für 4 Ohm oder  $P_{MAX} = 14.5W$  für 8 Ohm nominale Lautsprecherimpedanz.

Wenn Ihr Verstärker diese Leistung nicht abgeben kann oder wenn mit höherer Leistung gemessen werden soll, kann oder muss der Spannungsteiler entsprechend angepasst werden. Ist Ihr Verstärker z.B. mit einer Ausgangsleistung von 56 Watt an 8 Ohm angegeben und Sie wollen die volle Leistung nutzen, sind folgende Modifikationen der ARTA-MessBox erforderlich:

$$k = S \text{ [Volt RMS]} / \sqrt{P_{MAX} * Z_{Speaker}} = 1V / \sqrt{56W * 8 \text{ Ohm}} = 0,0472$$

mit  $R2 = 910$  und  $Z_{IN} = 10K$  ergibt sich R1 zu

$$R1 = (R2 \parallel Z_{IN}) / k - (R2 \parallel Z_{IN}) = 834,1 / 0,0472 - 834,1 = 16837 \text{ Ohm.}$$

**Anmerkung:** Die Empfindlichkeit der Soundkarte ist im Kalibrierungsmenü in  $mV_{PEAK}$  angegeben. Die Anpassungsberechnung für die Messbox erfordert  $V_{RMS} = V_{Peak} * 0,707$ .

### Anpassung der MessBox an den Mikrofonvorverstärker (Line IN, links)

Für die Berechnung der Verstärkung des linken Eingangskanals (**Ext. left preamp gain**, siehe Bild 3.4) benötigen Sie die Daten Ihres Mikrofonvorverstärkers.

Im hier gezeigten Beispiel werden die Werte des Mikrofonvorverstärkers MPA 102 von Monacor verwendet (s. Bild 3.5):

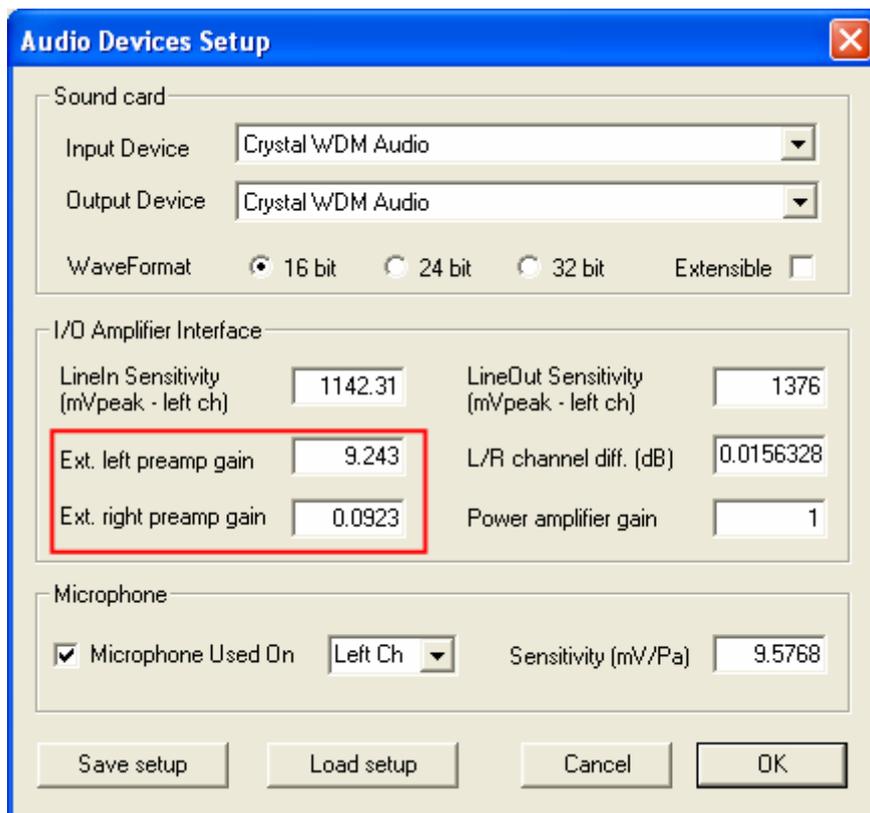
$V_{\text{MicPreAmp}} = 10$  (20dB), Ausgangsimpedanz des Mikrofonvorverstärkers  $Z_{\text{OUT}} = 100$ ,  
 $R5 = 719$ ,  $Z_{\text{IN}} = 10000$

$$\text{Linker Kanal} = V_{\text{MicPreAmp}} * Z_{\text{IN}} / (Z_{\text{OUT}} + R5 + Z_{\text{IN}}) = 10 * 10000 / 10819 = \mathbf{9.243}$$

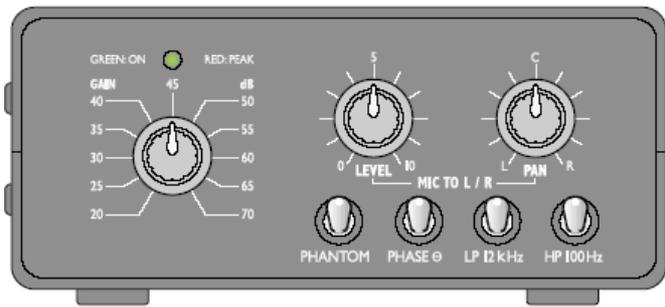
Der Wert von R5 berechnet sich wie folgt:

$$R5 = R1 || R2 - Z_{\text{OUT}} = 819 - 100 = 719$$

Diese Beziehung leitet sich daraus ab, dass beide Eingangskanäle mit gleicher Quellimpedanz betrieben werden sollen.



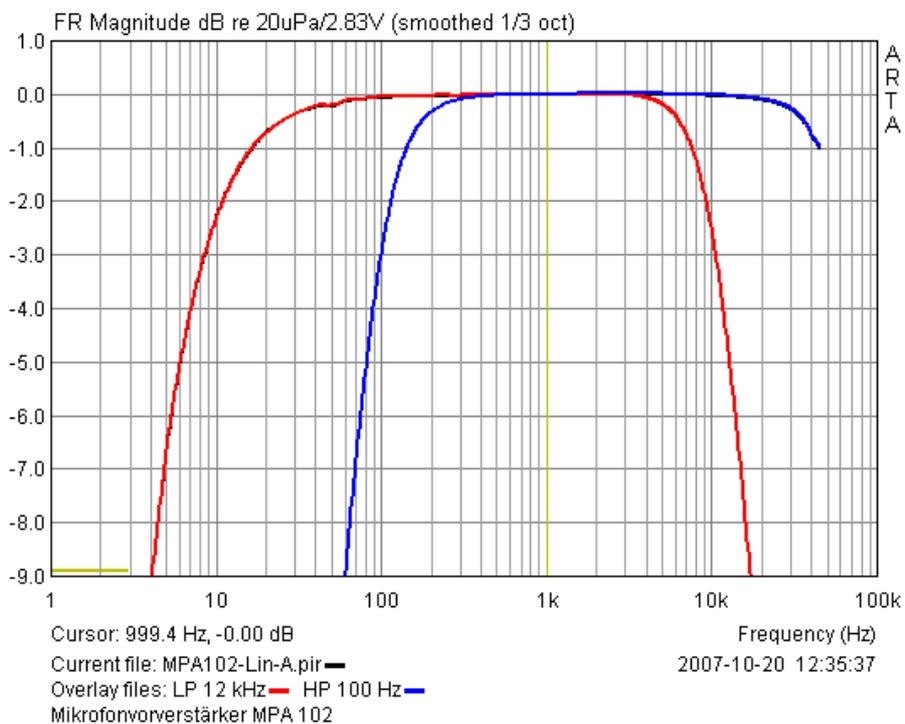
**Bild 3.4:** Menü 'Audio Devices Setup' für ARTA and STEPS



$$V_{\text{MicPreAmp}} = 10^{(x \text{ dB} / 20)}$$

20 dB = 10  
 40 dB = 100  
 60 dB = 1000

- Frequenzbereich: ..... 20–20 000 Hz
- Verstärkung
  - MIC INPUT: ..... 20–70 dB, schaltbar
  - STEREO LINE: ..... 0 dB
- Eingangsempfindlichkeit
  - für 1 V am Ausgang: .... 0,16–100 mV, schaltbar
- Eingangsimpedanz
  - MIC INPUT: ..... 2,2 kΩ
  - STEREO LINE: ..... 10 kΩ
- Phantomspannung: ..... +24 V
- Ausgänge
  - PREAMP OUT: ..... 1 V/12 V max., 100 Ω
  - STEREO LINE: ..... 1 V/6 V max., 100 Ω
- Hochpassfilter: ..... 100 Hz/-3 dB, 12 dB/Okt.
- Tiefpassfilter: ..... 12 kHz/-3 dB, 12 dB/Okt.
- Störabstand
  - Mic: ..... > 66 dB
  - Line: ..... 80 dB
- Stromversorgung: ..... 15 V~ über beiliegenden Steckertrafo (230 V~/50 Hz/10 VA) oder vier 9-V-Blockbatterien

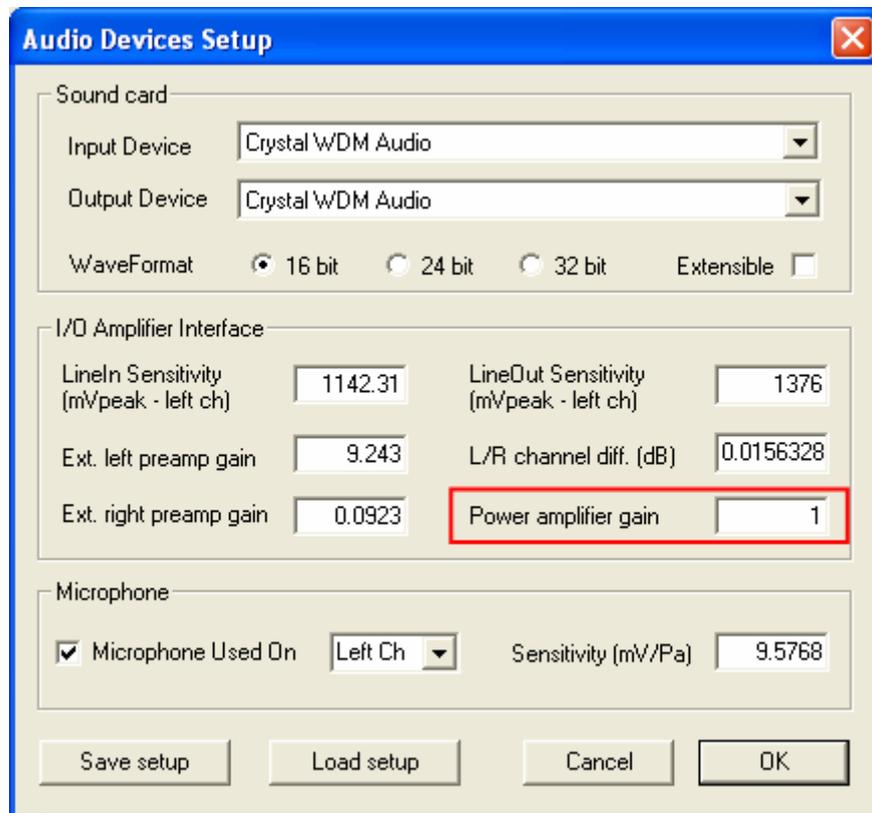


**Bild 3.5:** Mikrofonvorverstärker MPA 102 (Monacor)

*Anmerkung:* Hier scheint die Spezifikation für das Tiefpassfilter nicht richtig zu sein, es sollte 10,5 kHz heißen.

### 3.2 Einkanalige kalibrierte Messungen

Wenn Sie im Einkanalmode kalibrierte Messungen durchführen wollen, müssen Sie zusätzlich die Verstärkung des Leistungsverstärkers eingeben (Power Amplifier Gain).

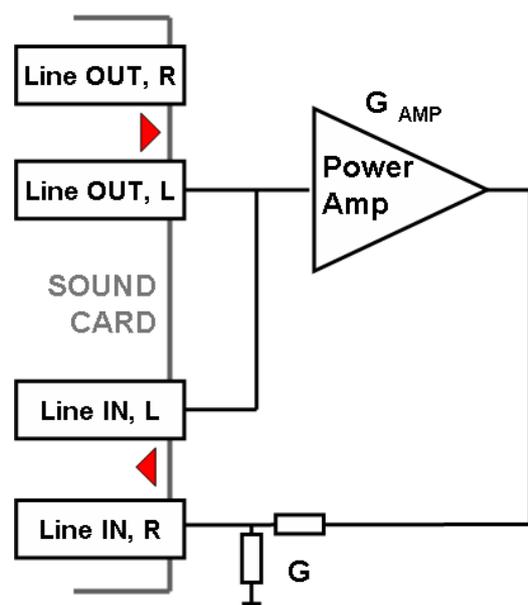


**Bild 3.6:** Menü 'Audio Devices Setup' für ARTA and STEPS

Zur Messung des Verstärkungsfaktors folgen Sie entweder der Beschreibung in [Kapitel 5.6](#) oder nutzen die folgende Prozedur im Zweikanalmode FR2:

1. Verbinden Sie den linken Eingangskanal mit dem gewählten Ausgangskanal der Soundkarte.
2. Verbinden Sie den rechten Eingangskanal über einen Spannungsteiler G mit dem Ausgang des Leistungsverstärkers. Zur Bemessung des Spannungsteilers s. z.B. Bild 2.6.
3. Geben Sie den Absolutwert des Spannungsteilers G als "Ext. right preamp gain" ein (siehe Bild 3.6).
4. Setzen Sie den ARTA Signal Generator auf "Periodic Noise". Zum Schutz der Soundkarte senken Sie den Ausgangspegel auf ca. -10dB.
5. Starten Sie die Messung im FR2 mode und notieren den Wert der Amplitude bei 1kHz. Dieser Messwert entspricht der Verstärkung des Leistungsverstärkers in dB. Der für den Eintrag im Menü „Audio Devices Setup“ erforderliche Absolutwert berechnet sich wie folgt:

$$Power\ amplifier\ gain = 10^{(FR\ Pegel @ 1kHz) / 20}$$



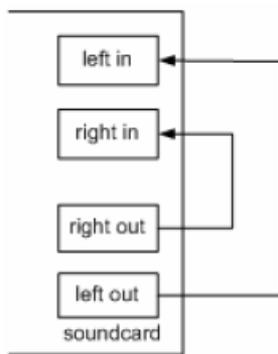
## 4. Testen der Soundkarte

Der einfachste Weg, etwas über die Qualität der eigenen Soundkarte zu erfahren, ist die Nutzung des



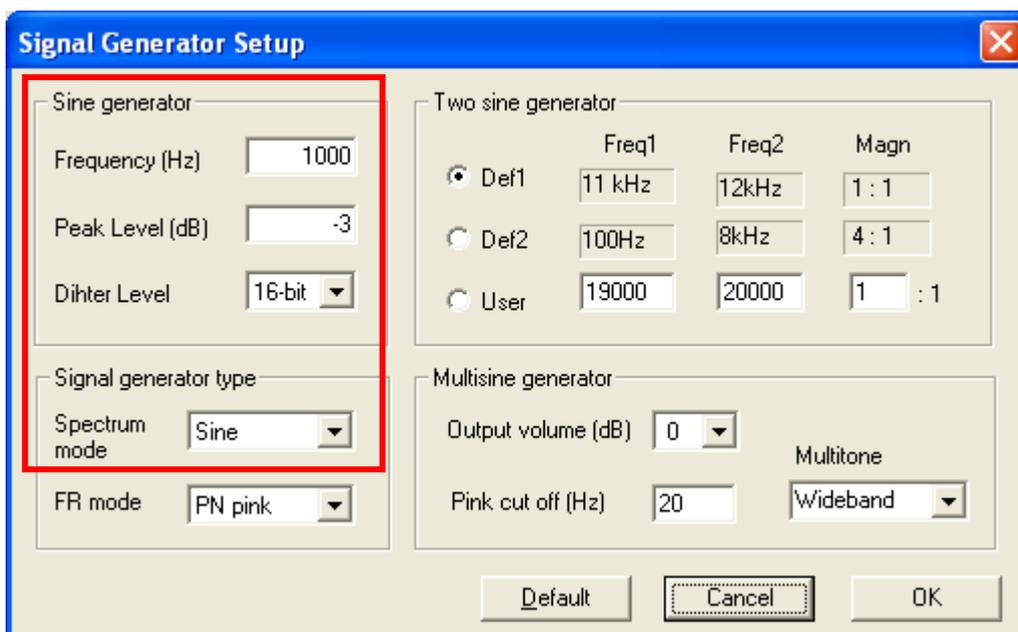
„**Spektrum-Analyzer Mode**“ in ARTA. Sie gelangen in diesen Modus durch Anklicken des **S<sub>PA</sub>** Symbols in der oben gezeigten Werkzeugleiste. Für den Test selbst sind die folgenden Arbeitsschritte erforderlich:

Verbinden Sie die Line Eingänge der Soundkarte jeweils mit den Signalausgängen (siehe nächstes Bild).



*Loopback Kabel z.B. Pollin Audio Verbindungskabel Stereo, 3,5 mm Klinkestecker auf 3,5 mm Klinkestecker. Länge 0,3 m. Best.Nr. 560 824*

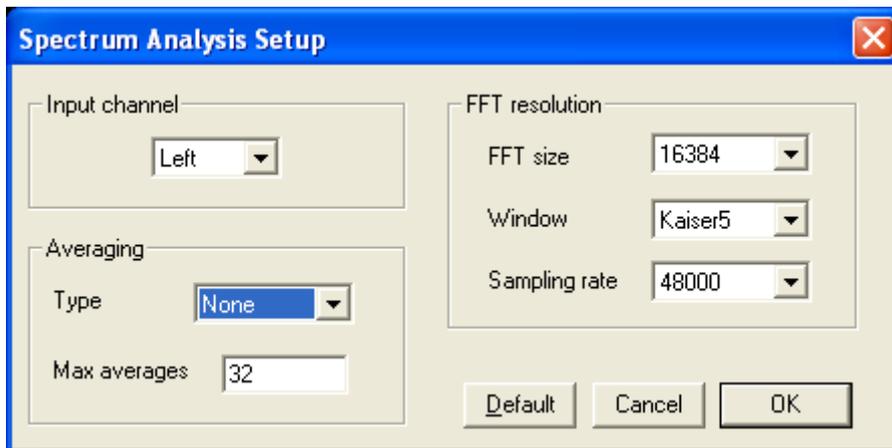
Öffnen Sie das Menü **Signal Generator Setup** oder nutzen Sie das Symbol  in der Werkzeugleiste von ARTA. Zunächst interessiert uns nur der rot umrandete Teil der Maske. Stellen Sie die darin gezeigten Werte ein:



Gehen Sie nun in die Werkzeugleiste und wählen dort die unten gezeigten Werte:

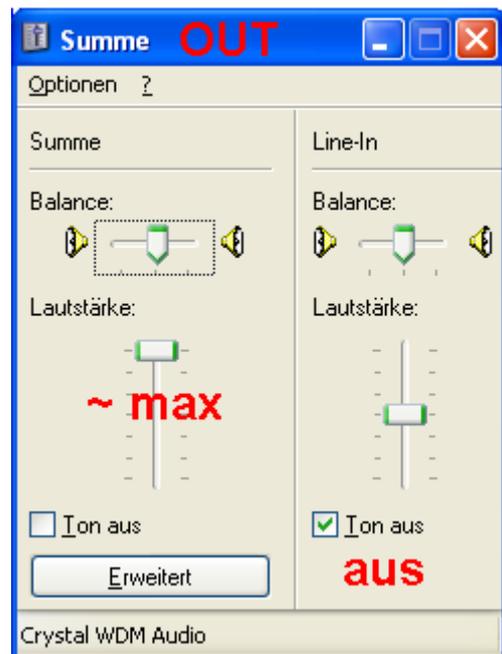
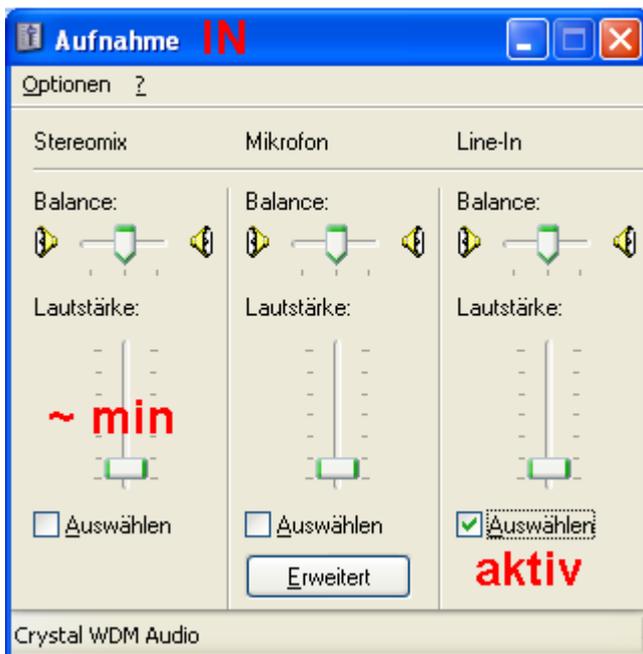


Die Parameter können Sie auch über das Menü 'Spectrum Analysis Setup' einstellen. Sie gelangen in dieses Menü über **Setup → Measurement**.

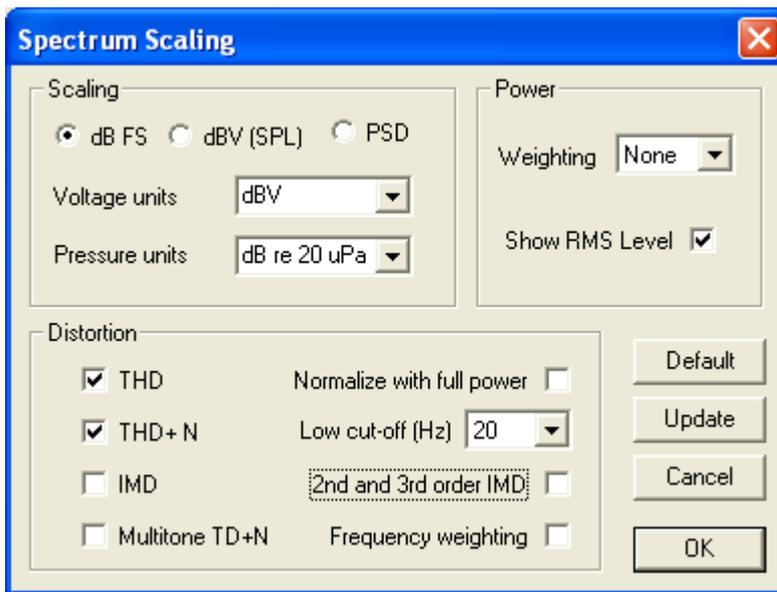


Wählen Sie als Eingangskanal (**Input channel**) → Left.

Bevor Sie fortfahren, überzeugen Sie sich bitte nochmals von der richtigen Einstellung Ihres Sound Mixers:



1. Aktivieren Sie Line-In des Aufnahmемixers.
2. Setzen Sie die Lautstärke des Aufnahmемixers nahezu auf Minimal.
3. Deaktivieren Sie Line-In im Ausgabe Mixer.
4. Setzen Sie die Lautstärke des Ausgabемixers auf nahezu Maximum.

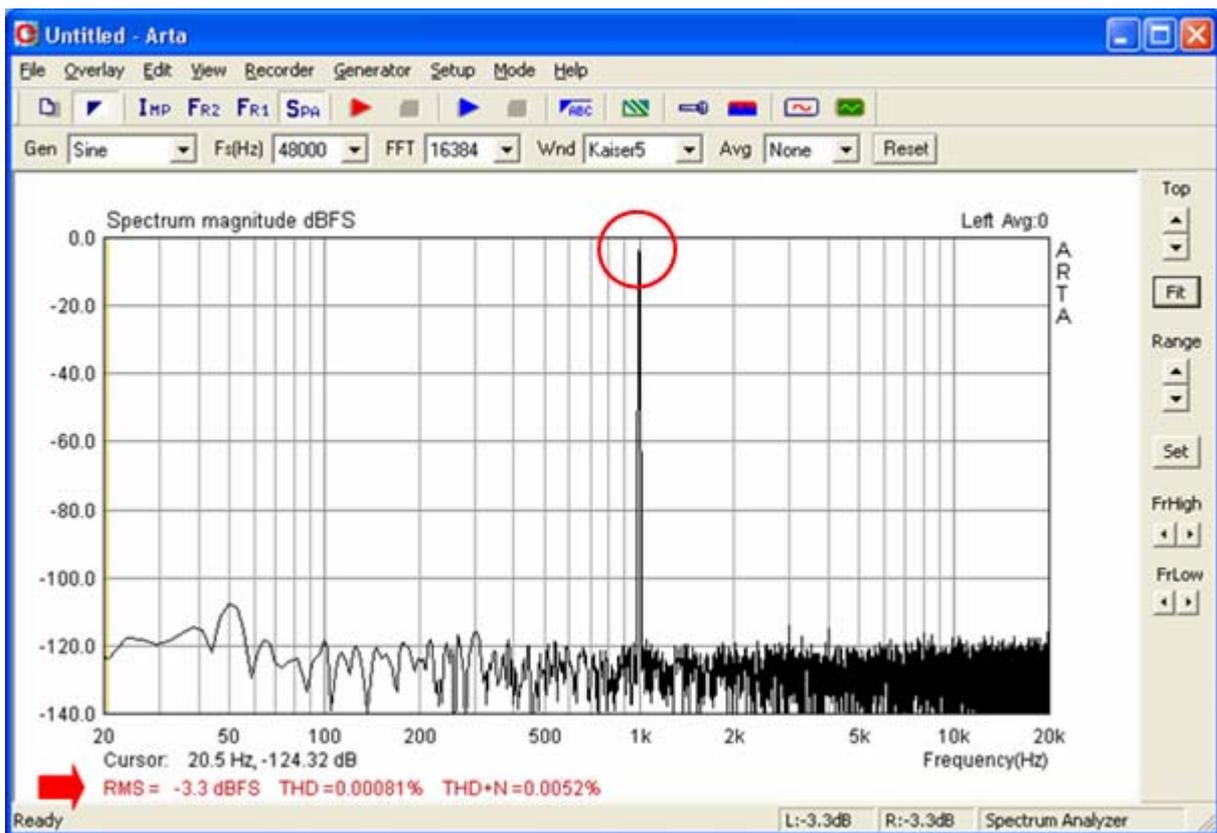


Im Menü „**Spectrum Scaling**“ sind nun die links gezeigten Einstellungen vorzunehmen.



Starten Sie die Messung im **SPA**-Mode durch Drücken des Record-Symbole  oder durch Drücken von **Run** im Menü „**Recorder**“. Es sollte sich ein Ergebnis einstellen, wie im folgenden Bild gezeigt.

Sollte der Signalpegel zu gering sein, so erhöhen Sie langsam die Lautstärke des Line-In Aufnahme-Mixers, bis der Peak bei 1 kHz einen Pegel von ca. -3dBFS hat (siehe Angabe des RMS-Wertes unterhalb des Diagramms).



Am unteren Rand des Diagramms wird der Wert für Frequenz und Amplitude angezeigt, an dem der Cursor steht. Ferner der RMS sowie THD und THD+N. Der Cursor selbst wird als dünne Linie angezeigt und kann durch die linke Maustaste oder durch die Pfeiltasten Links oder Rechts bewegt werden.

**Anmerkung:** Während der Messung können Sie in der Kontrollleiste die Parameter Art der Mittlung, Zurücksetzen des Mittlungszählers, Samplefrequenz, Art des Anregungssignals und die FFT-Länge

verändern.

Um aufzuzeigen, in welchem Bereich sich gängige Soundkarten bewegen, sind im Folgenden drei unterschiedliche Ergebnisse dargestellt.

<p>Spectrum magnitude dBFS Left Avg:0          ARTA          Cursor: 41.0 Hz, -126.01 dB          RMS = -1.4 dBFS THD = 0.0021% THD+N = 0.0069%</p>	<p>M-Audio Transit          THD + N = 0,0069%</p>
<p>Spectrum magnitude dBFS Left Avg:0          ARTA          Cursor: 20.5 Hz, -85.83 dB          RMS = -8.9 dBFS THD = 0.0312% THD+N = 0.1845%</p>	<p>Realtek AC97 Audio          THD + N = 0,1845%</p>
<p>Spectrum magnitude dBFS Left Avg:0          ARTA          Cursor: 20.5 Hz, -99.97 dB          RMS = -3.2 dBFS THD = 0.0272% THD+N = 0.0858%</p>	<p>Onboard Karte Intel          THD + N = 0,0858%</p>

Wie sind die Ergebnisse zu interpretieren? Was können wir bezüglich der Verwendbarkeit der eigenen Soundkarte daraus ableiten? Als Richtwert für die Einschätzung Ihrer Soundkarte mögen die nächsten zwei Angaben dienen:

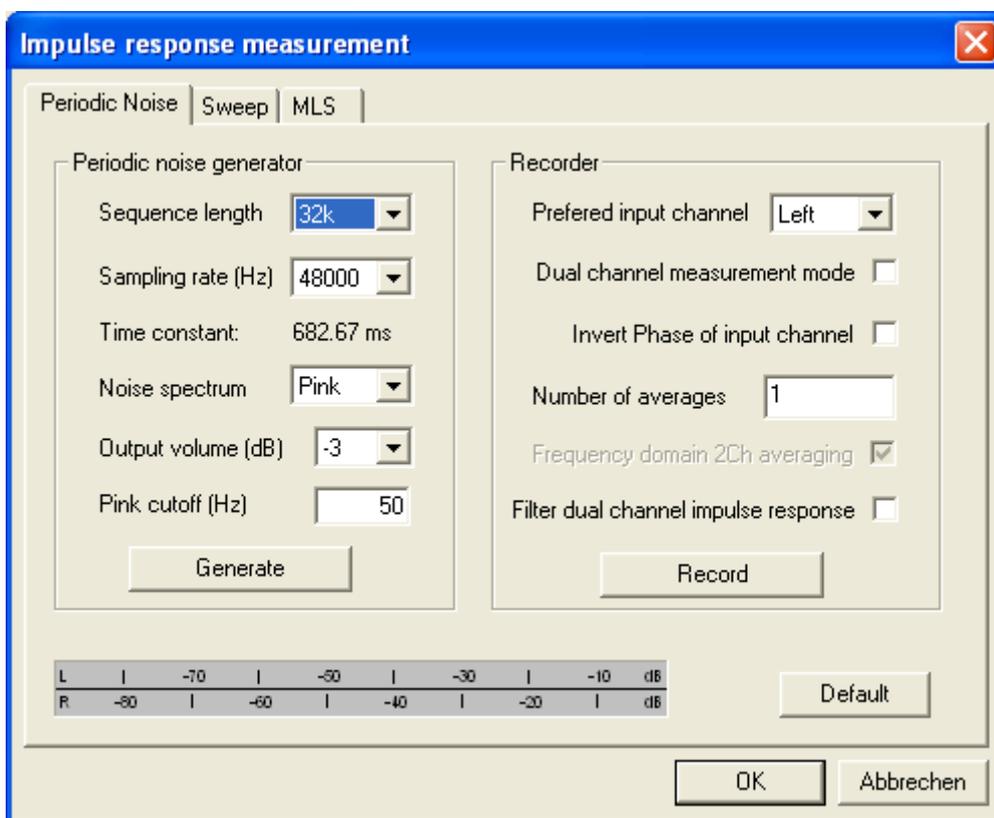
**Wenn THD+N kleiner als 0.1% ist, dann haben Sie eine verwendbare Soundkarte.**

**Wenn THD+N kleiner als 0.01% ist, dann haben Sie eine gute Soundkarte.**

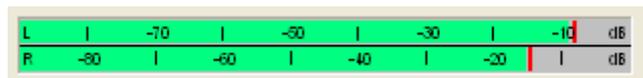
Um zu überprüfen, wie der Frequenzgang Ihrer Soundkarte aussieht, wechseln Sie in den



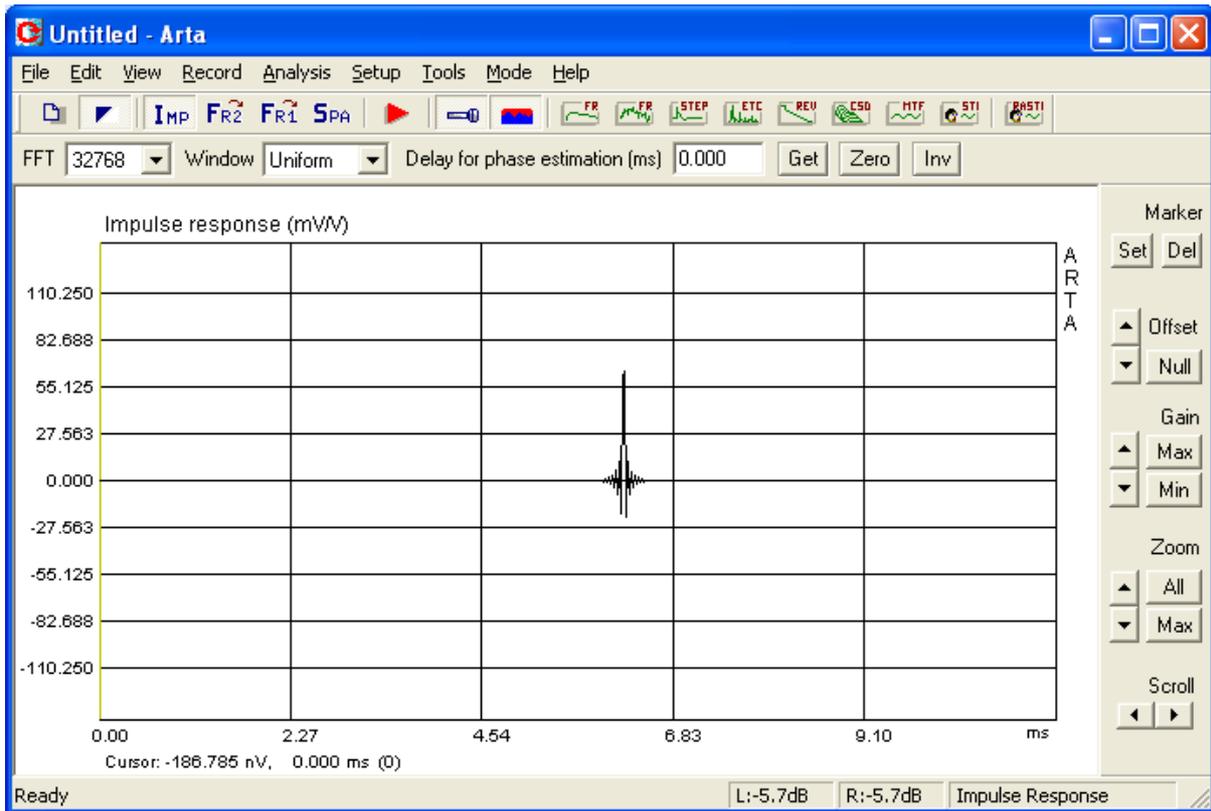
Messmodus **I<sub>MP</sub>**. Verwenden Sie die Einkanalmessung (Checkbox ‚Dual Channel measurement mode‘ leer).



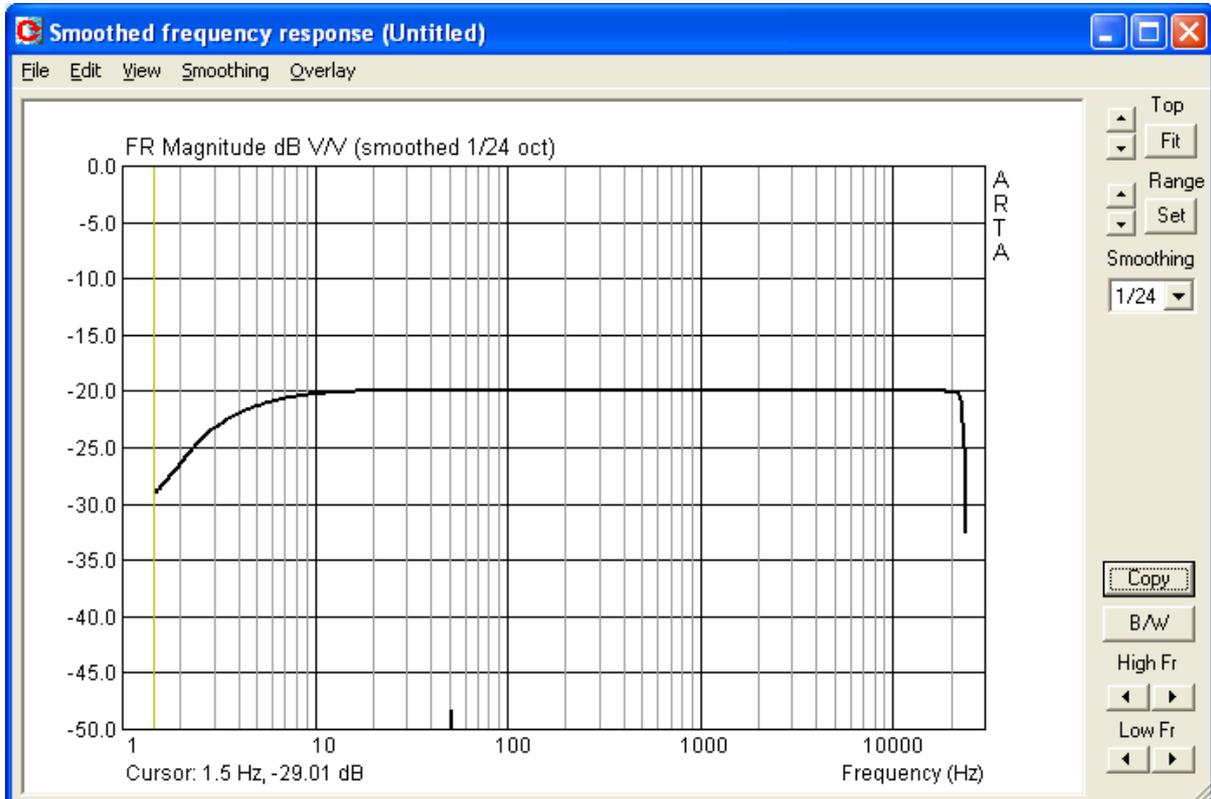
Prüfen Sie durch Drücken von ‚**Generate**‘ ob der Line-In der Soundkarte übersteuert ist. Die Aussteuerung der Karte wird durch das Peak-Levelmeter angezeigt. Sofern Sie eine



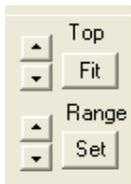
rote oder gelbe Anzeige haben, reduzieren Sie ‚**Output Volume**‘ solange, bis alles im grünen Bereich ist. Drücken Sie nun ‚Record‘ und warten, bis die Messung fertig ist (das Peak-Levelmeter zeigt keinen Ausschlag mehr). Drücken Sie „OK“ und Sie sollten in etwa folgendes Bild sehen.



Drücken Sie nun  und es erscheint der Frequenzgang Ihrer Soundkarte

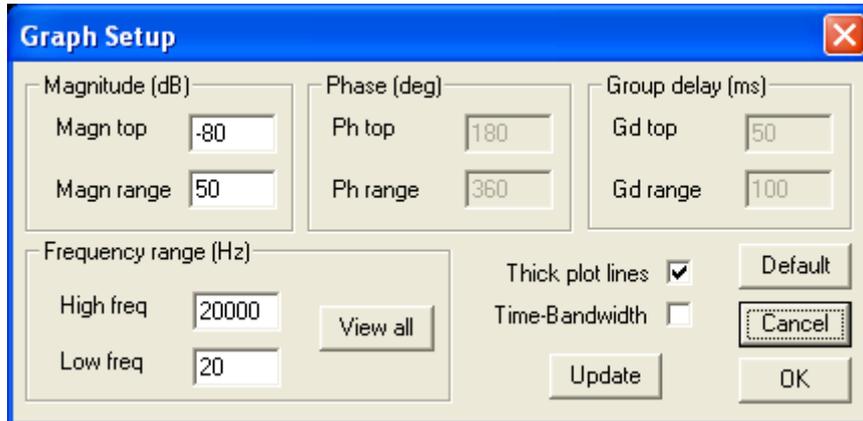


Wenn Ihre Soundkarte von guter Qualität ist, sollten Sie eine gerade Linie sehen. Achten Sie

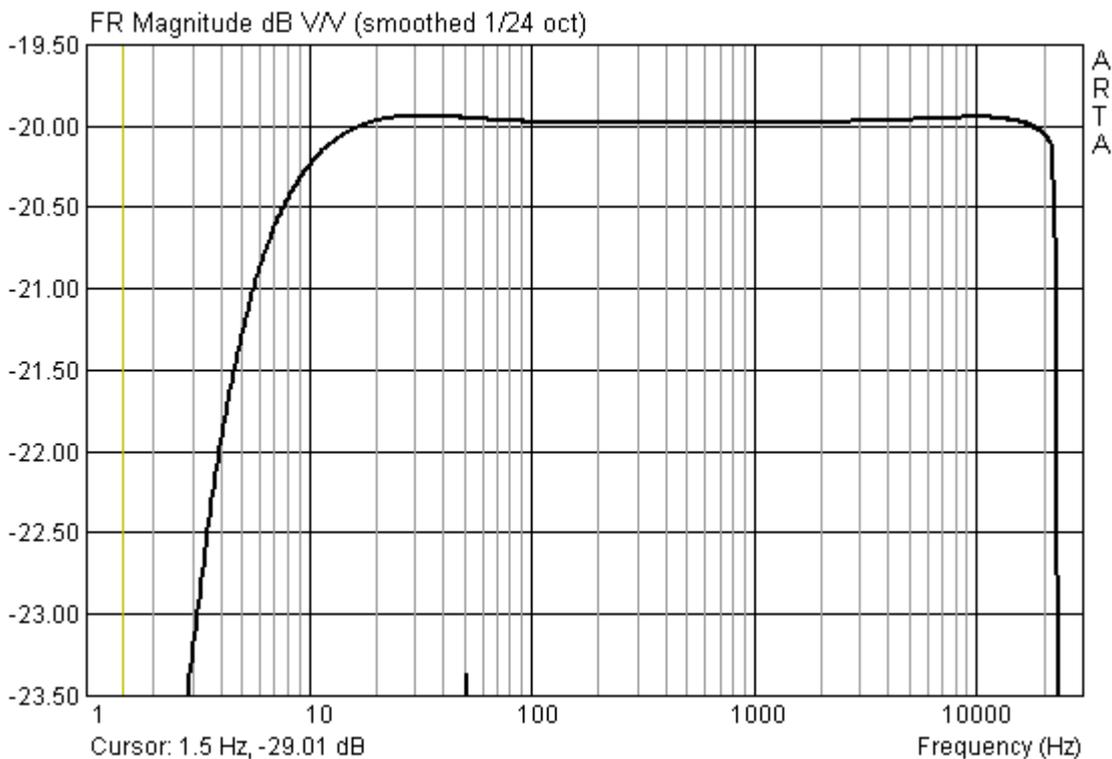


jedoch auf die Auflösung Ihres Messdiagramms. Sie können die Einstellungen des Diagramms ändern, indem Sie durch ‚Fit‘ automatisch die obere Grenze Ihres Y-Achse finden oder durch die beiden Pfeile links daneben manuell Ihre Einstellung suchen. Der Messbereich kann durch die beiden Pfeiltasten links neben ‚Range‘ in gleicher Weise eingestellt werden.

Eine weitere Möglichkeit haben Sie über ‚Set‘. Wenn Sie ‚Set‘ drücken, erscheint folgendes Menü:



Im Menü ‚Graph Setup‘ können Sie alle wesentlichen Parameter für die Grafik einstellen. Kommen wir zurück zum Frequenzgang der Soundkarte. In stark gespreizter Darstellung der Y-Achse (2dB) sehen wir mehr Details vom Frequenzgang. Wir haben eine Schwankungsbreite von ca. +/- 0,1 dB für die gemessene M-Audio Transit USB-Soundkarte.

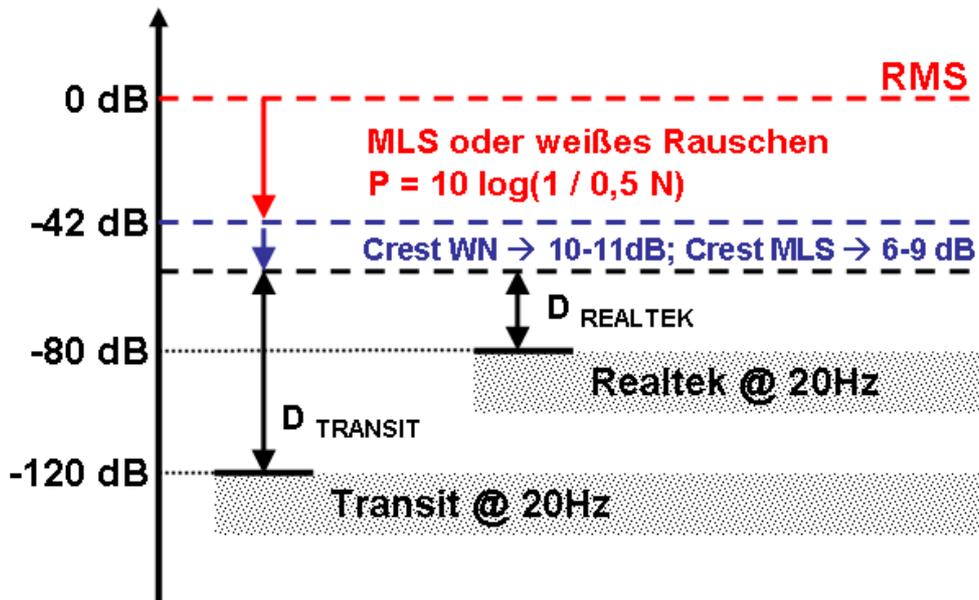


Im folgenden Bild sehen sie die Frequenzgänge der bereits oben erwähnten Soundkarten.

	<p>M-Audio Transit Line-In +/- 0,1 dB (20Hz bis 20kHz)</p>
	<p>Realtek AC97 Audio Mikrofoneingang +/- 2,5 dB (20Hz bis 20kHz)</p>
	<p>Onboard Karte Intel Mikrofoneingang +/- 6,5 dB (20Hz bis 20kHz)</p>

Für Messzwecke sollte eine Soundkarte eine untere Grenzfrequenz (-3 dB) von mindestens 10 Hz oder besser 5 Hz haben. Die Welligkeit (Ripple) des Frequenzganges sollte im Bereich von 20Hz – 20000 Hz nicht mehr als 0,5 dB betragen.

Zur Qualitätsbeurteilung von Soundkarten ist ferner deren Eigenrauschen bedeutsam, das gilt insbesondere für Messungen mit Rauschsignalen.



Zur Verdeutlichung der Auswirkung eines hohen Rauschpegels folgendes Beispiel:

Von den weiter oben gezeigten Soundkarten weist die Realtek einen Rauschpegel von ca. -80 dBFS bei 20 Hz auf, die M-Audio Transit ca. -120 dBFS.

Angenommen wir regen unseren Lautsprecher mit MLS oder weißem Rauschen an und wählen eine FFT-Sequenz von  $N=32768$  Werten. Diese Sequenz hat  $N/2 = 16384$  spektrale Komponenten mit einer Leistung von  $P=10 \cdot \log(1/16384) = -42$  dB unter RMS Level.

Weiterhin zu berücksichtigen sind die Crest-Faktoren der Anregungssignale von ca. 10-11 dB bei weißem Rauschen und ca. 6-9 dB bei MLS.

**Anmerkung:** Der Crest-Faktor beschreibt das Verhältnis zwischen Spitzenwert und Effektivwert einer elektrischen Wechselgröße.

Somit liegt der Anregungspegel je nach Signal zwischen 48 dB und 53 dB, also grob 50 dB unter dem Vollbereichslevel.

Damit verbleibt ein Dynamikbereich von

$$D = - \text{Anregungspegel} - \text{Grundrauschen (dB)}.$$

Bezogen auf die oben genannten Karten bedeutet das

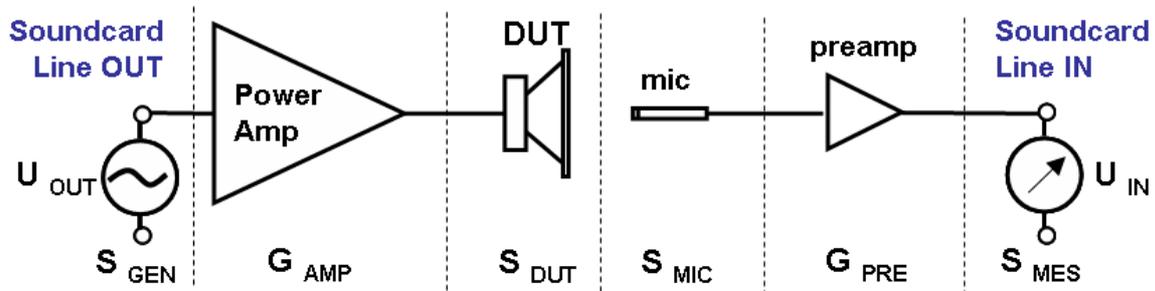
M-Audio Transit	$D = -50 - 120 = 70$ dB
Realtek	$D = -50 - 80 = 30$ dB

Daraus ist abzuleiten, dass Soundkarten mit einem Grundrauschen von -80 dB für die Messung mit Rauschanregung praktisch unbrauchbar sind.

Derartige Karten sind für die Messung mit ‚Sinus-Anregung‘ aber durchaus noch verwendbar (siehe Kapitel STEPS).

## 5. Kalibrierung der Messkette

Unter Verzicht auf absolute Werte kann eine Messkette unkalibriert betrieben werden, jedoch nicht ohne die Einzelkomponenten aneinander anzupassen. Sowohl ein Messsignal, das den Eingang der Soundkarte übersteuert, als auch eines, das kaum wahrgenommen wird, ist einem zuverlässigen Messergebnis nicht zuträglich.



Daher gilt es vor dem Aufbau einer Messkette die Einzelkomponenten zu analysieren und ggf. durch Verstärker oder Spannungsteiler so aufeinander abzustimmen, dass weder eine Über- noch eine Untersteuerung in einem Teil der Messkette auftreten können.

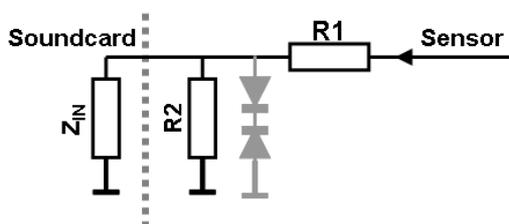
Zur Einstimmung hier ein erstes Beispiel. Die Messaufgabe ist als Bestimmung des SPL für Konuslautsprecher im Nahfeld definiert. Hierfür soll die Messkette so aufgebaut werden, dass bei 130 dB keine Übersteuerung des Einganges der Soundkarte auftritt. Bekannt sind folgende Werte:

Maximale Eingangsspannung der Soundkarte  $U_{IN\ MAX} = 0,9988\ V\ RMS$  (Bestimmung siehe unten)  
 Verstärkung Mikrofonvorverstärker  $G_{PRE} = 20\ dB = 10$   
 Empfindlichkeit  $S_{MIC} = 1\ mV@94\ dB$  bei 1 kHz

Bei 130 dB – was 26 dB Differenz zu 94 dB entspricht - ergibt sich eine Ausgangsspannung am Mikrofon von  $10^{(26/20)} = 63,1 * 11 = 694\ mV\ RMS$ , welche durch den Mikrofonvorverstärker nochmals um den Faktor 10 verstärkt wird.

$$G_{IN} = U_{IN\ MAX} / U_{OUT\ SENSOR\ MAX} = 0,9988 / (10 * 0,694) = 0,1439 = -16,84\ dB$$

Es ist also ein Spannungsteiler mit ca. 16 bis 17 dB Abschwächung erforderlich.



$$R_x = (Z_{IN} * R_2) / (Z_{IN} + R_2) \quad [1]$$

$$G = R_x / (R_1 + R_x) \quad [2]$$

$$R_1 = (R_x / G) - R_x \quad [3]$$

Bei einer Eingangsimpedanz der Soundkarte von  $Z_{IN} = 10\ k\Omega$  und einem gewählten Wert für  $R_2 = 1\ k\Omega$  berechnet sich  $R_1$  mit [1] und [3] wie folgt:

$$R_x = (10000 * 1000) / (10000 + 1000) = 909,09\ \Omega$$

$$R_1 = (R_x / G) - R_x = (909,09 / 0,1439) - 909,09 = 5408,42\ \Omega \rightarrow 5,6\ k\Omega$$

$$G_{IN} = 909,09 / (5600 + 909,09) = 0,1397 = -17,01\ dB$$

Die komplette Anpassung der Messkette wird im Folgenden Schritt für Schritt beschrieben.

## 5.1 Kalibrierung der Soundkarte

Über das Menü **Setup** → **Calibrate devices** wird der Dialog **'Soundcard and Microphone Calibration'** geöffnet. Folgendes Bild zeigt die voreingestellten Defaultwerte.

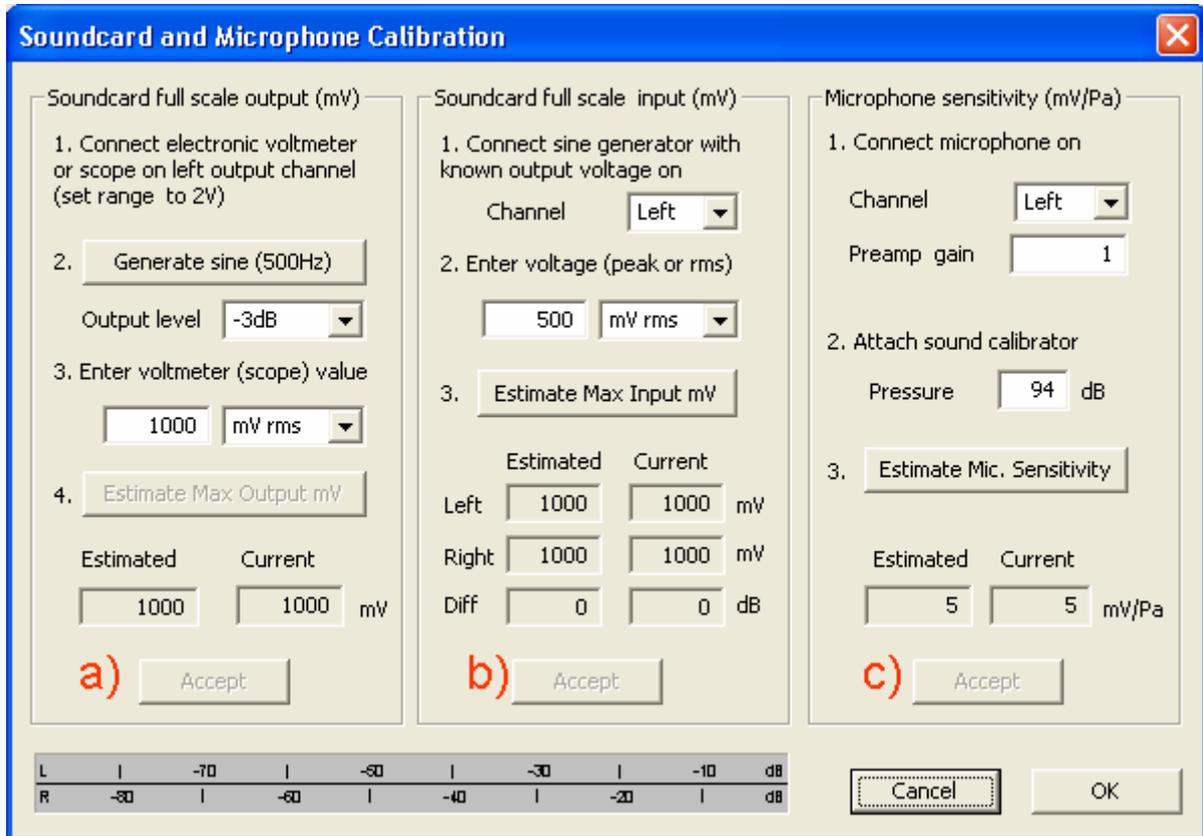


Bild 5.1: Kalibrierungsmenü

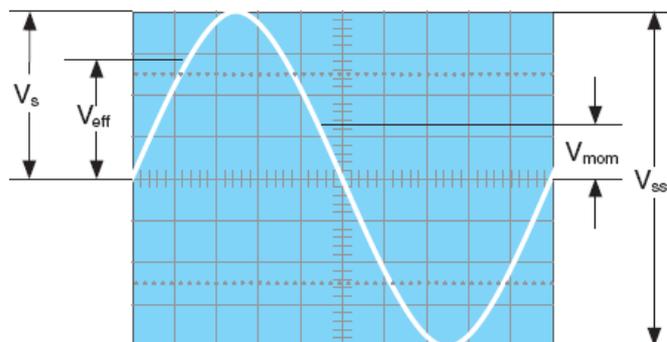
Das Kalibrierungsmenü ist in drei Abschnitte unterteilt.

- (a) Soundkarte, linker Kanal, Output,
- (b) Soundkarte, linker und rechter Kanal, Input
- (c) Mikrophon Pegelkalibrierung.

**Anmerkung:**

Soundcard full scale In- und Output sind im Menü **'Soundcard and Microphone Calibration'** in mV Peak angegeben.

Für die Anpassungsberechnung bei der ARTA-MessBox verwenden Sie bitte mV  
 $RMS = mV\ Peak * 0,707$  (s. Abschnitt 3.1)



$$V_S = V_{Peak}$$

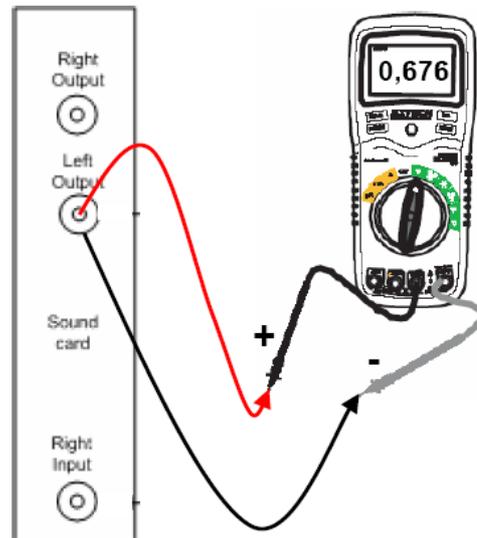
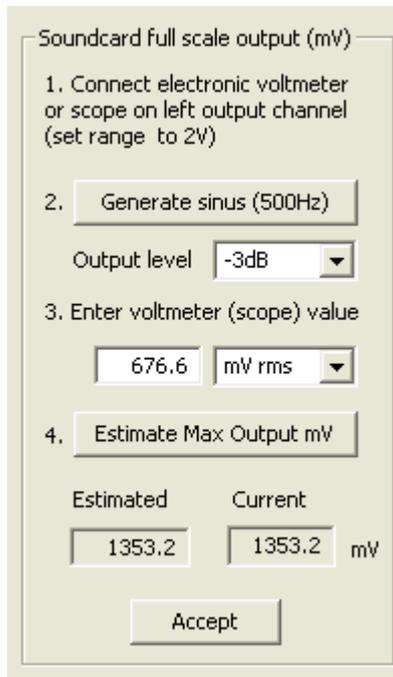
$$V_{eff} = V_{RMS} = 0,707 * V_S$$

$$V_{SS} = V_{Peak\ Peak}$$

$$V_{mom} = \text{Momentanwert}$$

### 5.1.1 Kalibrierung der Ausgangskanäle

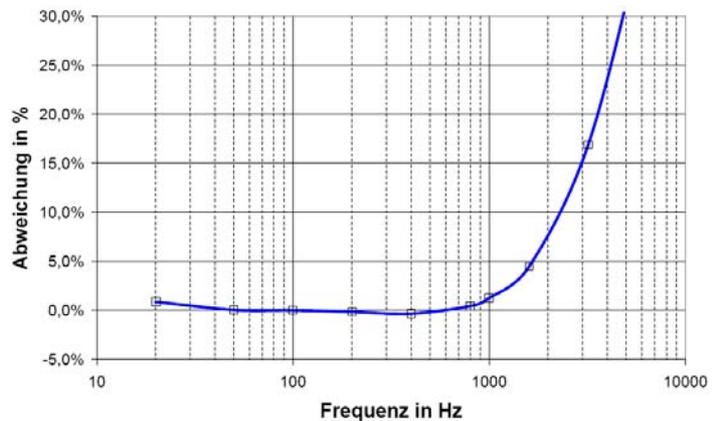
Für die Kalibrierung der Ausgangskanäle der Soundkarte arbeiten Sie bitte die folgende Prozedur ab:



- 1) Verbinden Sie ein geeignetes Voltmeter mit dem linken Line-Ausgang der Soundkarte.

Geeignet ist jedes NF-Voltmeter oder Digital-Voltmeter, das auch bei 500 Hz noch genau misst, oder ein Oszilloskop.

Nebenstehendes Bild zeigt die Abweichungen eines qualitativ durchschnittlichen DMM in Abhängigkeit von der Frequenz.



- 2) Drücken Sie '**Generate sinus (500Hz)**'. ARTA erzeugt ein Sinussignal mit frei wählbarer Amplitude (Output Level), wobei empfohlen wird, die Grundeinstellung (-3dB) beizubehalten..
- 3) Geben Sie den am Voltmeter / Oszilloskop abgelesenen Wert ein. Das Ergebnis kann in Vs (Oszilloskop) oder in mV RMS eingeben werden (Voltmeter).
- 4) Drücken Sie '**Estimate Max Output mV**'
- 5) Der ermittelte Wert für Max Output wird im Feld '**Estimated**' angezeigt..
- 6) Wenn das angezeigte Ergebnis plausibel erscheint, drücken Sie '**Accept**', und der ermittelte Wert wird als aktueller Wert für '**LineOut Sensitivity**' übernommen.

### 5.1.2 Kalibrierung der Eingangskanäle

Für die Kalibrierung der Eingangskanäle können Sie einen externen Signalgenerator oder den Ausgangskanal der Soundkarte als Generator nutzen.

Wenn Sie wie im hier gezeigten Beispiel die Soundkarte nutzen, gehen Sie wie folgt vor:

Soundcard full scale input (mV)

1. Connect sine generator with known output voltage on

Channel

2. Enter voltage (peak or rms)

3.

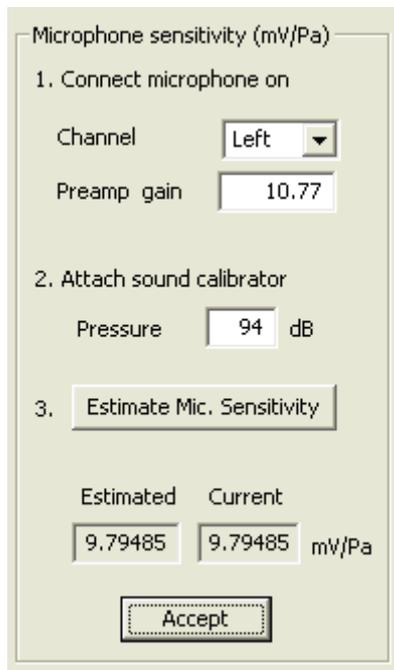
	Estimated	Current	
Left	<input type="text" value="1123.3"/>	<input type="text" value="1123.3"/>	mV
Right	<input type="text" value="1123.7"/>	<input type="text" value="1123.7"/>	mV
Diff	<input type="text" value="-0.0032"/>	<input type="text" value="-0.0032"/>	dB

1. Setzen Sie die Lautstärke des linken und des rechten Line-In Kanals auf Maximum (s. oben)
2. Verbinden Sie den linken Line-Out-Kanal mit dem linken Line-In-Kanal.
3. Drücken Sie '**Generate sine (500Hz)**'.
4. Geben Sie den Wert der Generatorspannung ein (in diesem Beispiel 676 mV, s. oben)
5. Drücken Sie '**Estimate Max Input mV**' und beobachten Sie den Eingangspegel an der Peakanzeige im unteren Teil der Maske (s. Bild 5.1). Wenn der Eingangskanal übersteuert ist, reduzieren Sie den Eingangspegel (s. Abschnitt 4).
6. Wenn der Wert plausibel erscheint, drücken Sie '**Accept**', und der ermittelte Wert wird als aktueller Wert für '**Line In Sensitivity**' übernommen.
7. Wiederholen Sie 1-6 für den rechten Line-In-Kanal.

**Anmerkung:** Diese Prozedur wird empfohlen, da sie garantiert, dass Sie die Karte im 'Loopback Modus' ohne Übersteuerung verwenden können. Wenn Sie die Eingangskanäle mit maximaler Eingangslautstärke kalibrieren, dann muss für viele Soundkarten der Pegel des Ausgangskanals um 1-2 dB reduziert werden.

## 5.2 Pegelkalibrierung des Mikrofons

Um das Mikrofon zu kalibrieren, benötigen Sie einen Pegelkalibrator. Die Prozedur ist wie folgt:



1. Verbinden Sie den Mikrofon-Vorverstärker mit Line-In der Soundkarte (linker Kanal).
2. Geben Sie die Verstärkung des Vorverstärkers (preamp gain) und den SPL-Wert des Kalibrators (Pressure) ein.
3. Setzen Sie den Kalibrator auf das Mikrofon



4. Drücken Sie 'Estimate mic sensitivity'.
5. Wenn die Messung plausibel erscheint, drücken Sie 'Accept'.

**Anmerkung:** Wenn der Verstärkungsfaktor des Vorverstärkers unbekannt ist, können Sie einen Hilfswert setzen. Dieser Wert muss jedoch ebenfalls als Verstärkungsfaktor im Menü 'Audio Devices Setup' verwendet werden (s. z.B. Bild 5.3c).

Wenn Sie keinen Pegelkalibrator besitzen, können Sie eines der folgenden Verfahren anwenden:

- a) Eingabe der Empfindlichkeiten aus der Spezifikation
- b) Berechnung aus den TSP und einer Nahfeldmessung
- c) Hochtöner als „Referenz“

Diese Methoden ersetzen keinen Pegelkalibrator, sind jedoch für den DIY-Bereich in vielen Fällen hinreichend.

### 5.2.1 Eingabe der Empfindlichkeiten aus der Spezifikation

Sofern Sie über einen Mikrofonvorverstärker und ein Mikrofon mit zugehörigen Datenblättern verfügen, geben Sie die entsprechenden Daten ein.

Im Folgenden finden Sie einige Daten für gängige Mikrofone und Mikrofonkapseln und Mikrofonvorverstärker. Daten zur ARTA MessBox finden Sie in Abschnitt 3.

Typ	Empfindlichkeit	Grenzschalldruck	Hersteller
MCE 2000	6 mV/Pa/1kHz	< 110 dB	Elektret-Mikrofonkapsel, Panasonic
KE 4-211-2	10 mV/Pa/1kHz	< 125 dB	Elektret-Mikrofonkapsel, Sennheiser
MB 550	6 mV/Pa/1kHz	126 dB	Messmikrofon, MBHO
ECM 8000	6,0 mV/Pa/1kHz	-	Messmikrofon, Behringer
ECM-40	5,6 mV/Pa/1kHz	120 dB	Messmikrofon, Monacor
MM1	15 mV/Pa/1kHz	128 dB	Messmikrofon, Beyerdynamic
MK 221	50 mV/Pa/1kHz	146 dB	Messmikrofon, Microtech Gefell

Typ	Verstärkung	Hersteller
MPA-102	20dB bis 70dB	Monacor

Anmerkung: . Das ARTA-Kalibrierungsmenü erwartet die Angabe der Verstärkung in absoluten Werten. Sie berechnet sich zu  $V_{Abs} = 10^{(dB\text{-Wert} / 20)}$ .

### 5.2.2 Berechnung der Empfindlichkeit aus einer Nahfeldmessung

Was tun, wenn kein Kalibrator verfügbar ist und die Empfindlichkeit von Mikrofon und Mikrofonvorverstärker ebenfalls unbekannt ist? Wenden Sie folgendes Verfahren an und Sie erhalten zumindest eine angenäherte Pegelkalibrierung.

Nehmen Sie einen Tief- oder Tiefmitteltöner, messen dessen TSP und bauen ihn in ein geschlossenes Gehäuse bekannten Volumens ein. Mit den ermittelten Daten gehen Sie in ein Simulationsprogramm und berechnen den Frequenzgang im Halbraum (2 Pi).

Das folgende Bild zeigt ein Simulationsbeispiel für einen 16 cm Tiefmitteltöner für eine Eingangsspannung von 2,83 V.

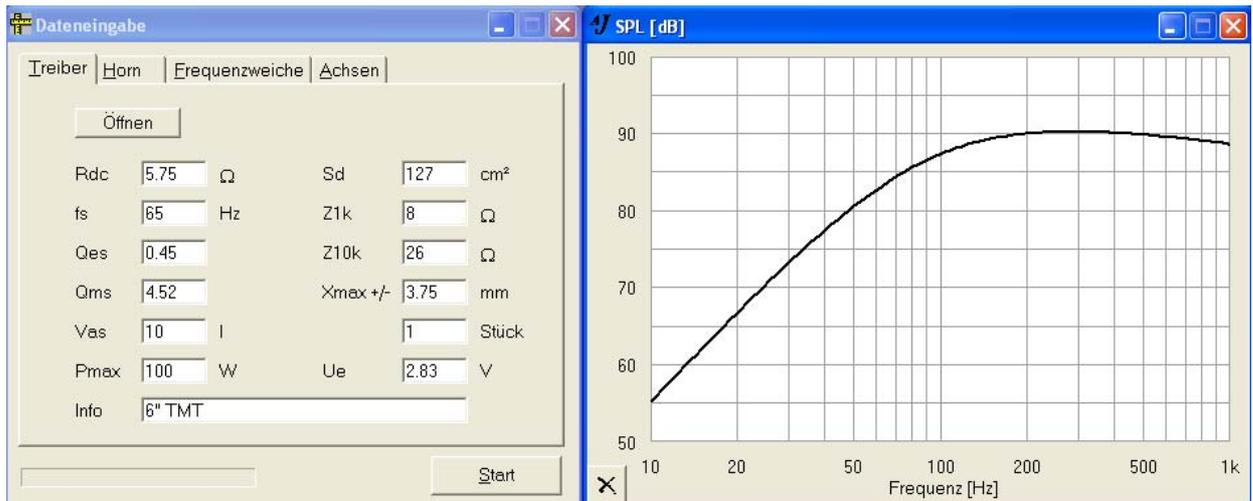


Bild 5.2: Simulation eines 6“-TMT mit AJ-Horn (Halbraum, 2,83 V)

Der simulierte Frequenzgang soll uns als Zielfunktion zum Abgleich unseres Mikrofons dienen. Da wir dieses Beispiel mit STEPS behandeln, sollten Sie bevor Sie mit der Kalibrierung starten, vorab einen Blick in Kapitel 9 werfen.

Für die Kalibrierung gehen Sie zunächst in das Menü ‚**Measurement Setup**‘, in STEPS und stellen als ‚**Generator Level**‘ 0 dB re FS ein und pegeln die Ausgangsspannung Ihres Leistungsverstärkers mit einem geeigneten Multimeter auf 2,83 V RMS ein.

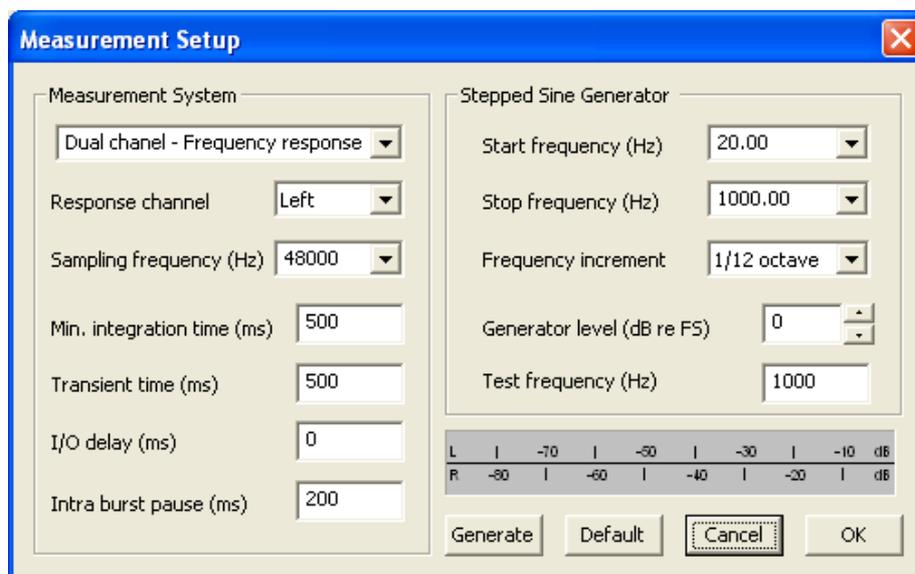


Bild 5.3a: Measurement Setup Menü in STEPS

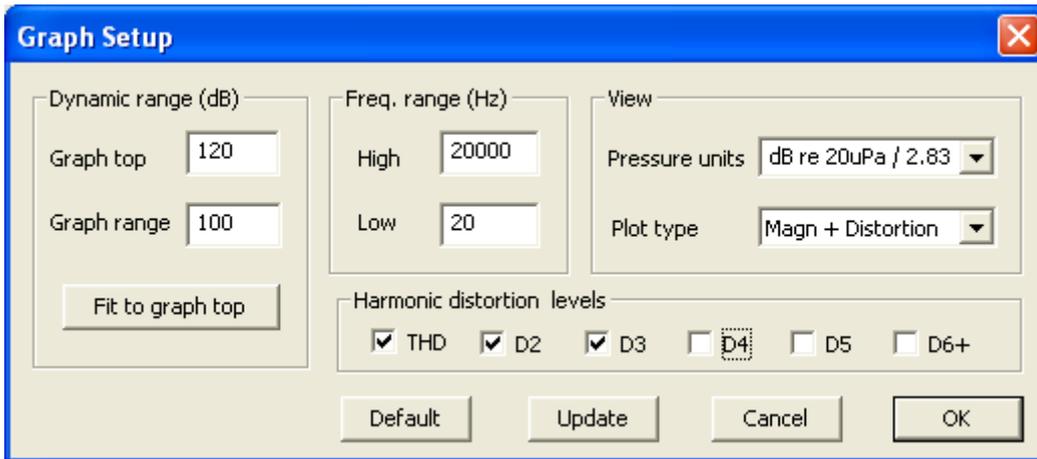
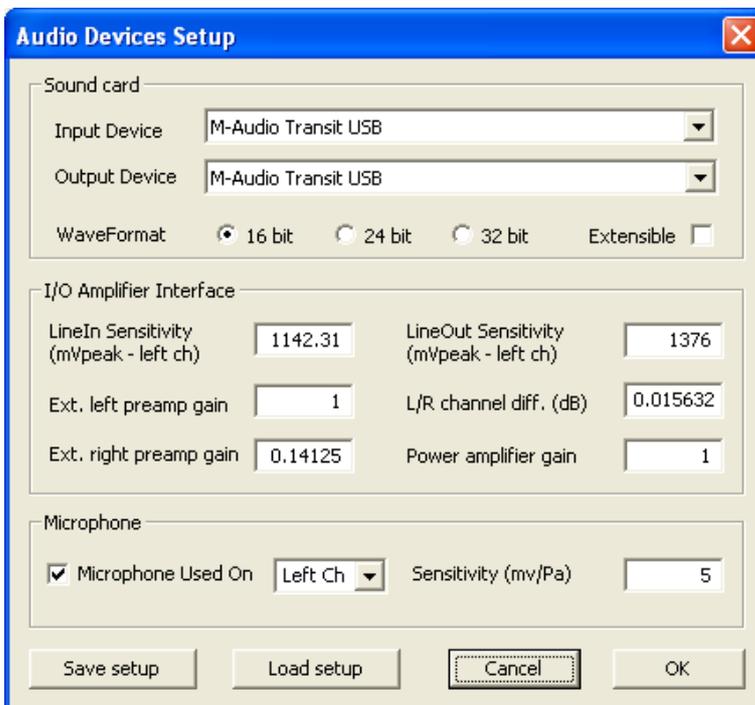


Bild 5.3b: Graph Setup in STEPS

Bevor wir die Messung durchführen, sind jedoch noch einige Einstellungen und Prüfungen im Menü ‚**Measurement Setup**‘ vorzunehmen:

- Messart auf ‚**Dual channel – Frequency Response**‘ einstellen (Bild 5.3a)
- Pressure units auf ‚**dB re 20uPa/2.83V**‘ einstellen (Bild 5.3b)
- Start- und Stoppfrequenz festlegen ( $f_{\max} = 10950 / D[\text{cm}] = 10950/12,7 = 862 \text{ Hz} \rightarrow 1000 \text{ Hz}$ )
- Bitte beachten Sie, dass der Grenzschalldruck der meisten Mikrofone / Mikrofonkapseln im DIY-Bereich ca. 120 dB beträgt.
- Achtung, falls der ‚**Generator Level**‘ nicht 0 dB beträgt, weil Sie mit kleinerer Spannung als 2,83 Volt messen wollen, ist dies ebenfalls mit umgekehrten Vorzeichen bei der Pegelkorrektur zu berücksichtigen.



Da wir keine Angaben über den Mikrofonvorverstärker und das Mikrofon haben, wählen wir jetzt willkürlich Werte und geben sie im Menü ‚**Audio Devices Setup**‘ ein:

Verstärkung MVV  
 → Ext. left preamp gain = 1

Empfindlichkeit Mikrofon  
 → Sensitivity (mV/Pa) = 5

Bild 5.3c: Audio Devices Setup



Jetzt führen wir eine zweikanalige Nahfeldmessung mit STEPS durch und korrigieren den Pegel auf einen Meter Messabstand.

$$\begin{aligned} P_{FF} &= P_{NF} + 20 \log(a/2d) \\ &= P_{NF} + 20 \log((12,7/2)/200) \\ &= P_{NF} - 29,97 \text{ dB} \end{aligned}$$

d = Messabstand, a = Radius der Membran

Der im Nahfeld gemessene Pegel  $P_{NF}$  ist also um -29,97 dB zu korrigieren, um auf den Fernfeldpegel  $P_{FF}$  in einem Meter Abstand zu kommen.

Bild 5.4 zeigt die bereits mittels ‚Edit → Scale Level‘ um 29,97 dB korrigierte Nahfeldmessung.

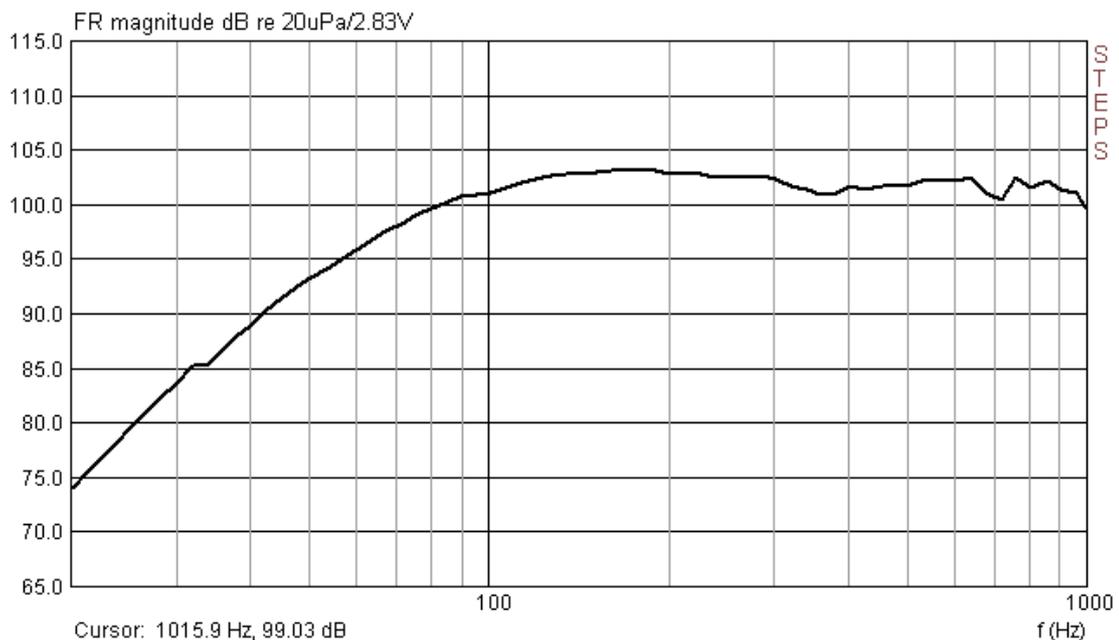


Bild 5.4: Auf einen Meter korrigierte Nahfeldmessung (unkalibriert)

Um einen grafischen Vergleich vornehmen zu können, wurden die Messdaten aus STEPS exportiert und mit den Werten aus der Simulation zusammengeführt (Bild 5.5). Mit einem Offset von ca. 12 dB bis 13 dB ergibt sich zwischen 50 Hz und 1000 Hz eine recht gute Übereinstimmung.

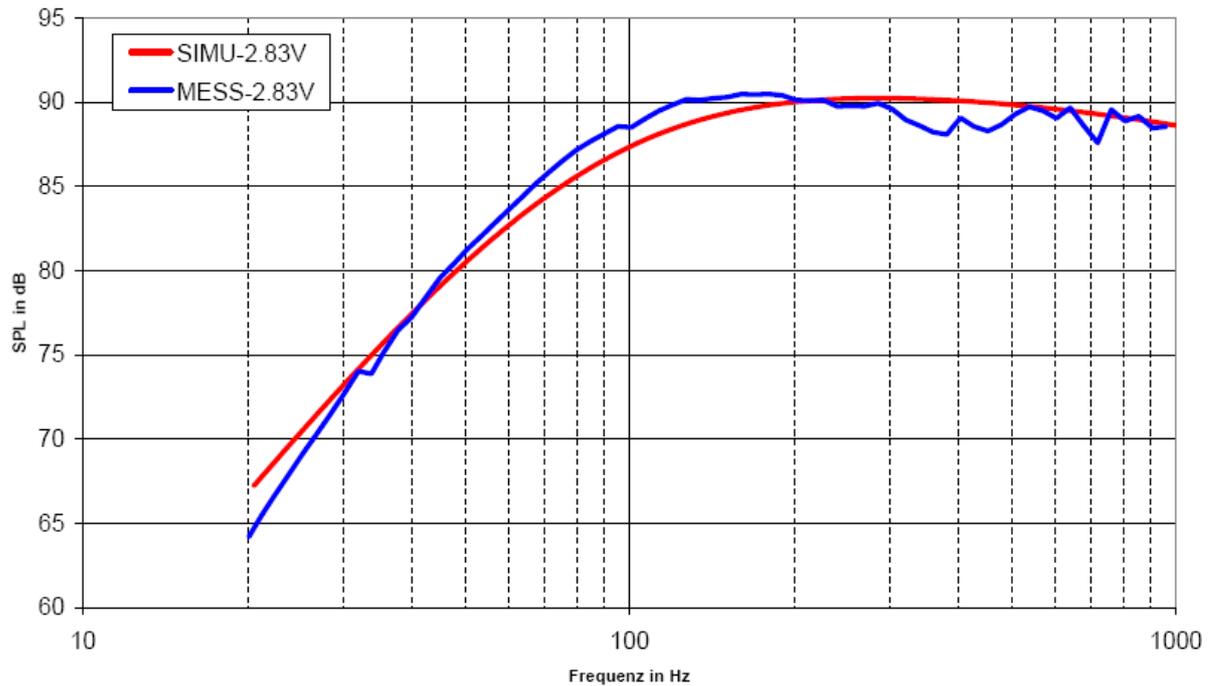


Bild 5.5: Vergleich Messung (blau) und Simulation (rot)

Jetzt wählen wir in Bild 5.4 einige Frequenzen, lesen den Pegel ab und berechnen:

Ext. left preamp gain =  $10^{-(SPL_{\text{Simu}} - SPL_{\text{Mess}}) / 20}$  x angenommene Ext. left preamp gain

KE 4-211-2	50 Hz	100 Hz	200 Hz
Simulation	80,58	87,28	90,02
STEP 2 Channel	93,31	101,00	102,77
Differenz = $-(SPL_{\text{Simu}} - SPL_{\text{Mess}})$	12,73	13,72	12,75
$10^{(Differenz/20)}$	4,3301	4,8529	4,3401
angenommene Verstärkung	1	1	1
einzustellende Verstärkung	4,3301	4,8529	4,3401

Aus unseren Berechnungen ergibt sich im Mittel eine einzustellende Verstärkung (Ext. left preamp gain) von 4,5077 mit einer Standardabweichung von 0,2990.

Mit Eingabe des Mittelwertes +/- der einfachen Standardabweichung in das Feld ‚Ext. left preamp gain‘ (siehe Bild 5.3c) und erneuter Messung erhalten wir eine Pegelabweichung von ca. +/- 1,5 dB.

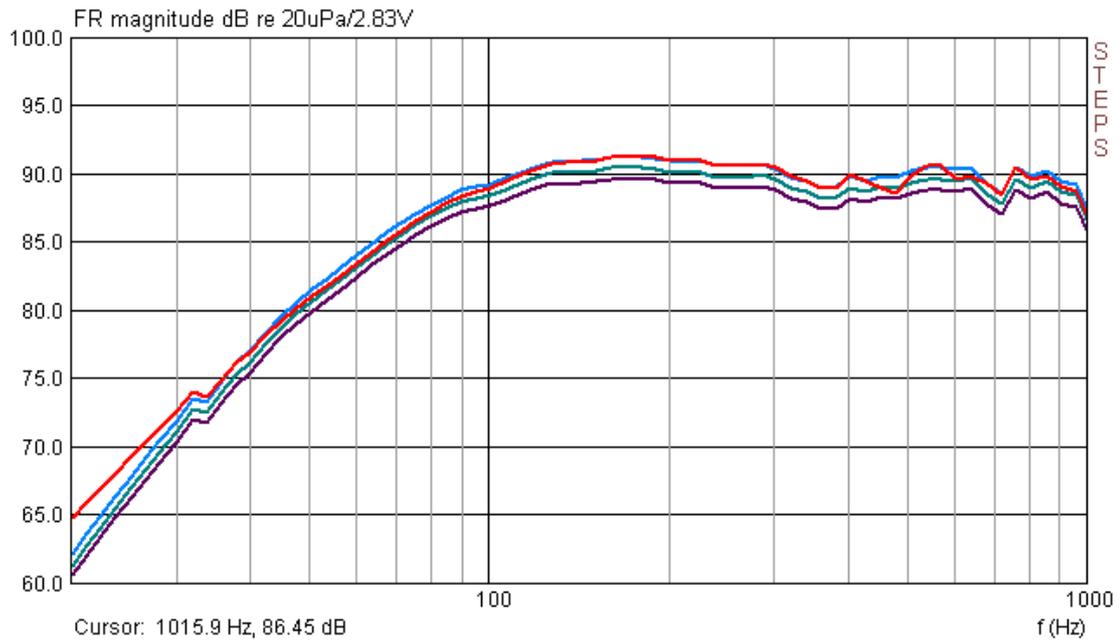


Bild 5.6: Kalibrierte Messung (rot) und „Hilfskalibrierung“ +/- einfache Standardabweichung

Abschließend wurde noch eine pegelkalibrierte Messung mit einem MB 550 durchgeführt (rote Linie). Im Vergleich zur Mikrofonkapsel von Sennheiser (KE 4-211-2) in Kombination mit einem DIY-Mikrofonvorverstärker sind die Abweichungen recht gering.

### 5.2.3 Hochtöner als Kalibrator

Das folgende „Kalibrierungsverfahren“ setzt auf die Zuverlässigkeit von Herstellerangaben. Benötigt werden ein Hochtöner sowie das zugehörige Datenblatt. Verwenden Sie nur Produkte seriöser Hersteller, denn Fantasiedaten sind hier völlig fehl am Platz.

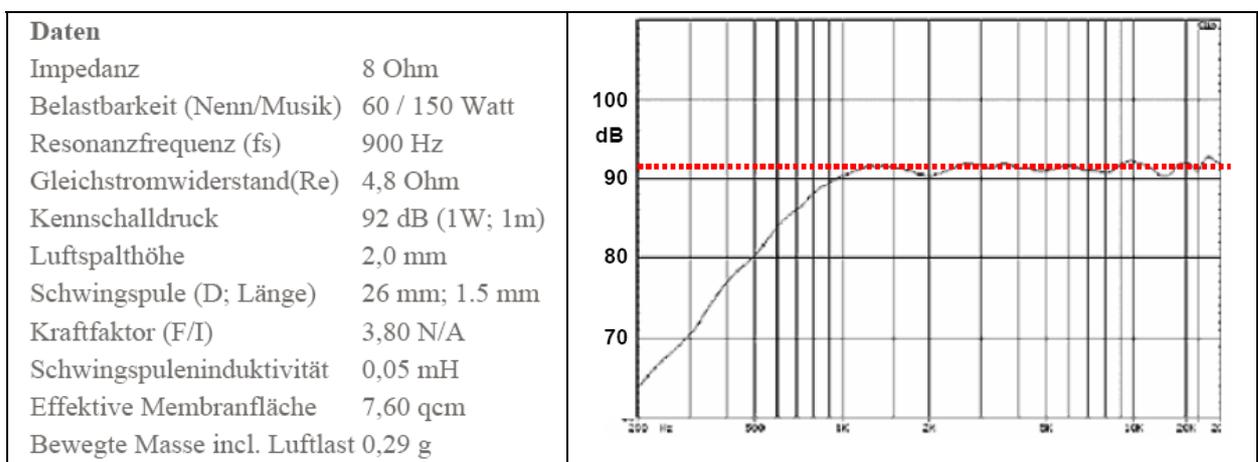


Bild 5.7: Datenblatt eines bekannten Hochtöners

Die Vorgehensweise bei der Kalibrierungsprozedur ist wie folgt:

- 1) Messen der Impulsantwort des Hochtöners mit ca. 20 cm bis 40 cm Messabstand in einer kleinen Schallwand (siehe auch Anmerkung 1).

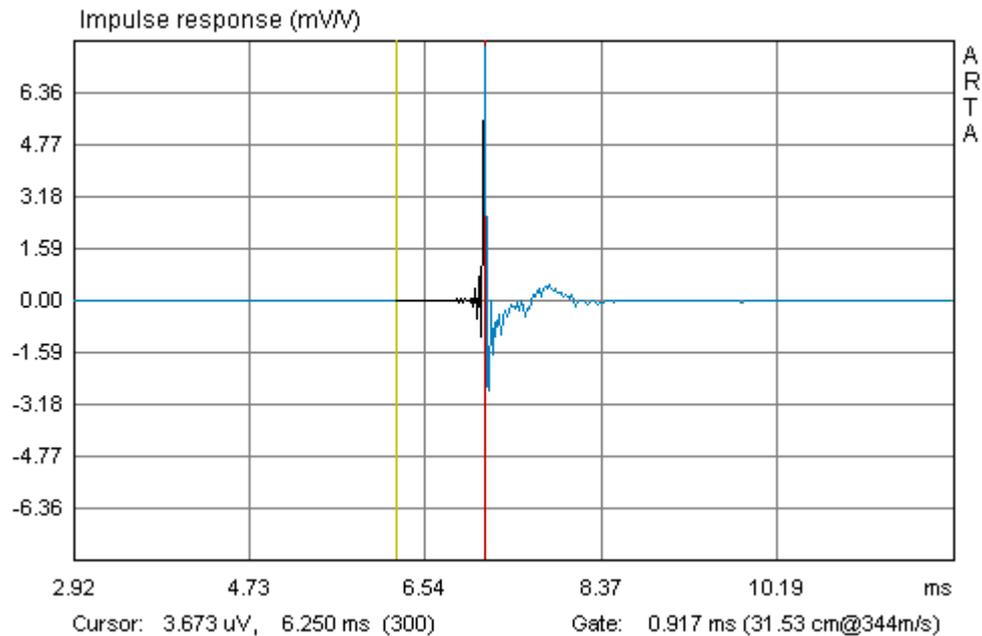
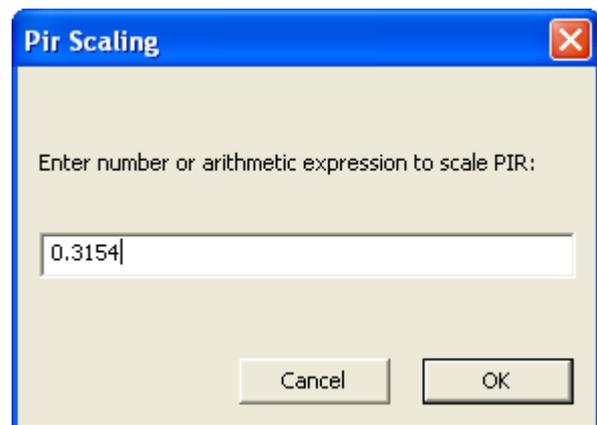


Bild 5.8: Impulsantwort des Hochtöners mit Gate zur Laufzeitermittlung

- 2) Pegel der Messung auf 1 m Messabstand korrigieren

Dazu benötigen wir zunächst den tatsächlichen Messabstand. Der ist auf zwei Wegen zu ermitteln:

- Setzen Sie ein Gate: Cursor (gelbe Linie) auf Sample 300 setzen, Marker (rote Linie) auf die erste Impulsspitze setzen. Das Ergebnis wird direkt in der Fußzeile in ms angezeigt und ergibt durch Multiplikation mit 0,344 direkt den Messabstand.  
 $d = 0,917 * 0,344 = 0,3154$  m



- Oder Sie berechnen die Messdistanz d wie folgt:

$$\begin{aligned}
 d &= c * (\text{Peaklage} - 300) / \text{Samplerate} \\
 &= 344 * (344 - 300) / 48 \text{ kHz} \\
 &= 0,3154 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Korrigieren Sie den Pegel wie oben in Maske ‚Pir Scaling‘ gezeigt auf einen Meter Messabstand.

**Anmerkung:** Ab Release 1.2 wird der Messabstand nach Aktivierung von „Gate Time“ im Menüpunkt „View“ direkt unter der Grafik angezeigt



3) Setzen Sie im Menü ‚Overlay‘  
 → ‚Generate Overlay Filterresponse‘  
 ein Target, das in etwa den Frequenzgang  
 aus der in Bild 5.7 gezeigten  
 Spezifikation abbildet.

Dafür stehen diverse Filterfunktionen  
 erster bis sechster Ordnung zur  
 Verfügung (s. rechts). Filtertyp,  
 Empfindlichkeit sowie Eckfrequenz sind  
 frei bestimmbar.

Bild 5.9 zeigt den gemessenen und auf  
 einen Meter korrigierten Frequenzgang  
 zusammen mit der Targetfunktion (12 dB  
 Butterworth,  $f_c = 900$  Hz).

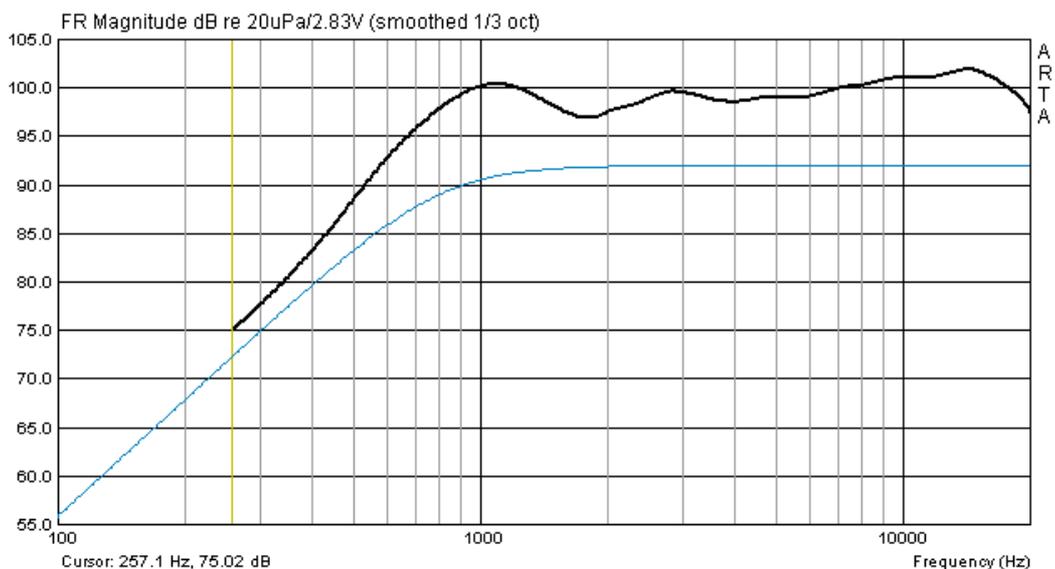
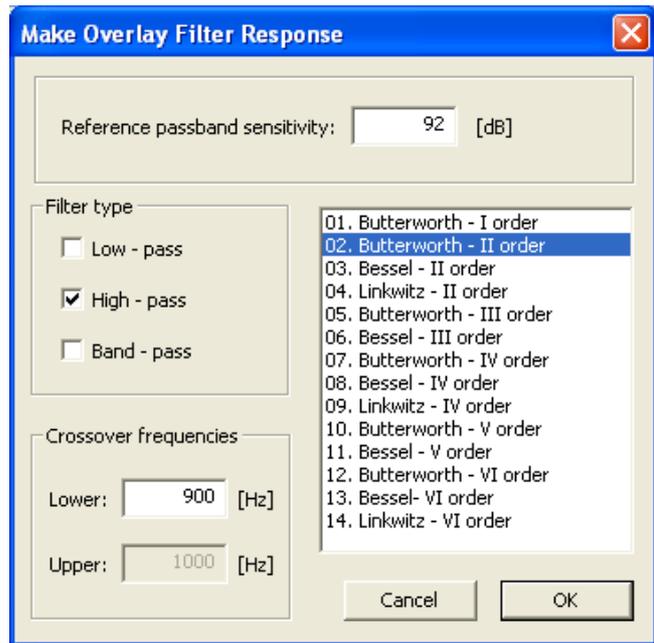


Bild 5.9: Gemessener Frequenzgang und Target

4) Korrekturfaktor berechnen

Aus dem Frequenzgang können wir durch Setzen des Cursors für Frequenzen, die mindestens eine Oktave über der Resonanzfrequenz liegen, die entsprechenden Pegelwerte ablesen. Analog zum vorangegangenen Beispiel werden nun die Korrekturfaktoren berechnet.

KE 4-211-2	3000 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6000 Hz	7000 Hz
Simulation	92,00	92,00	92,00	92,00	92,00
ARTA	104,49	102,94	102,99	103,08	103,51
Differenz = -(SPL Simu - SPL Mess)	12,49	10,94	10,99	11,08	11,51
$10^{(Differenz/20)}$	4,2121	3,5237	3,5441	3,5810	3,7627
angenommene Verstärkung	1	1	1	1	1
einzustellende Verstärkung	4,2121	3,5237	3,5441	3,5810	3,7627

Damit ergibt sich ein mittlerer Korrekturwert von 3,7247 mit einer Standardabweichung von 0,2884.

**Anmerkung 1:** Bedenken Sie bei dieser Methode, dass sowohl Form und Größe der Schallwand, als auch der Einbauort des Hochtöners in der Schallwand Einfluss auf den Frequenzgang hat. Die Auswirkungen der Einbaubedingungen können z.B. mit EDGE recht zutreffend simuliert werden (s. Bild 5.10).

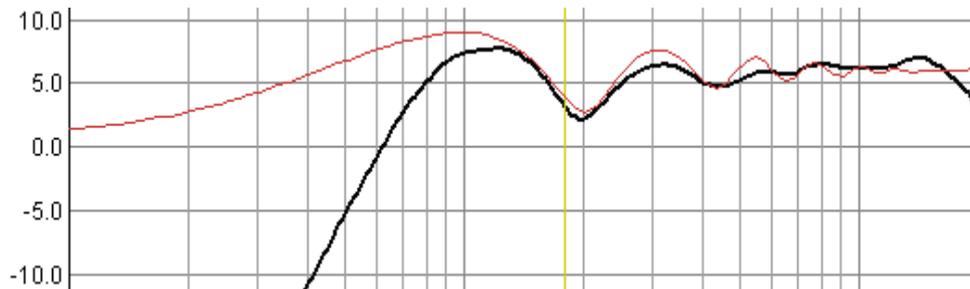


Bild 5.10: Simulierter Einfluss (rot) einer 25x25cm Schallwand in 30cm Abstand.

*Idealerweise wählen Sie die Größe der Schallwand so, dass deren Einfluss im Frequenzbereich der Kalibrierung möglichst gering ist (siehe auch IEC-Schallwand in Abschnitt 11).*

### 5.3 Kompensierung von Frequenzgangfehlern des Mikrofons

Grundsätzlich wird die Verwendung eines guten Messmikrofons mit linearem Frequenzgang empfohlen. Geeignete Exemplare, die noch für den DIY-Bereich erschwinglich sind, finden Sie im Abschnitt 5.3. Achten Sie beim Kauf des Mikrofons oder der Mikrofonkapsel auch darauf, dass es neben einem glatten Frequenzgang auch Kugelcharakteristik aufweist.

ARTA und STEPS bieten die Möglichkeit, den Frequenzgang Ihres Mikrofons zu korrigieren. Es sei jedoch betont, dass diese Korrektur sich ausschließlich auf eine Messachse beschränkt (in der Regel 0 Grad). Frequenzgangfehler außerhalb dieser Messachse werden bei der Korrektur nicht berücksichtigt.

Im Menü ‚**Frequency response compensation**‘ sind alle erforderlichen Schritte zur Korrektur des Mikrofons enthalten. Gehen Sie wie folgt vor:

**a) Laden Sie die Korrekturdatei .MIC mit ‚Load‘ (siehe Bild 5.11).**

Bei der Kompensationsdatei handelt es sich um eine normale ASCII-Datei, die von **.txt** in **.mic** umbenannt wurde. Der Aufbau der Datei muss wie folgt sein:

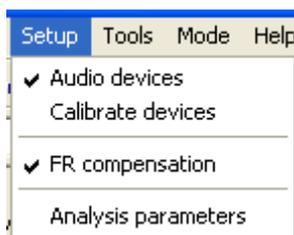
Frequency(Hz)	Magnitude(dB)
17.527	0.99
17.714	0.95
17.902	0.91
18.093	0.87
18.286	0.83

Sie können also z.B. die Werte aus dem Frequenzschrieb Ihres Mikrofons ablesen und in eine ASCII-Datei ohne Formatierung eingeben. Achten Sie darauf, dass das Komma als Punkt eingegeben wird, ansonsten erhalten Sie eine Fehlermeldung.

Nach dem Laden der Datei wird der Frequenzgang des Mikrofons wie im obigen Beispiel angezeigt. Es ist wichtig, dass Sie den Frequenzgang eingeben und nicht bereits die Korrekturwerte (gespiegelter Frequenzgang) des Mikrofons.

Wenn Sie nur wenige Messwerte (Stützpunkte) zur Verfügung hatten, erzeugt ARTA die Zwischenwerte automatisch durch einen kubischen Spline. Beachten Sie jedoch, dass mindestens ein Wert pro Terz vorhanden sein sollte und diese Werte möglichst gleichmäßig über den Korrekturbereich verteilt sind.

**b) Aktivieren sie die Kompensation durch ‚Use frequency response compensation‘(Bild 5.11)**



Sie können im Hauptmenü von ARTA unter ‚**Setup**‘ sehen, ob die Mikrofonkompensation aktiv ist.

Wenn ‚**FR Compensation**‘ mit einem Haken versehen ist, ist die Kompensation aktiv. Durch erneutes Klicken wird die Kompensation deaktiviert.

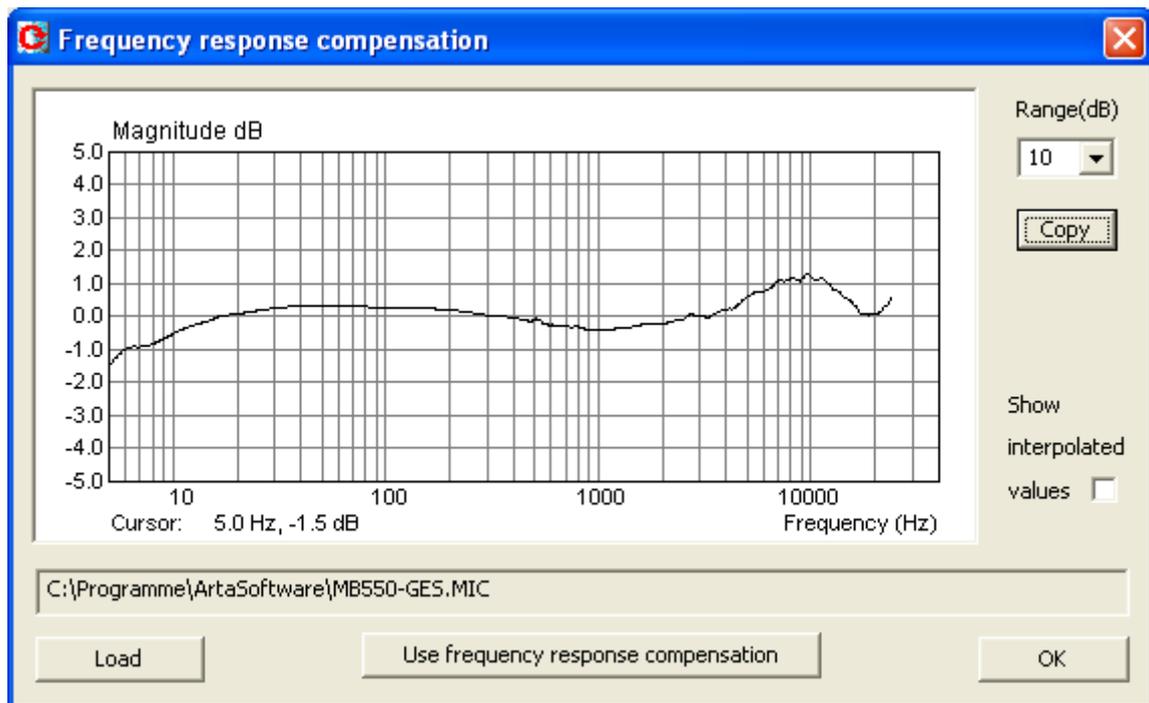


Bild 5.11: Menü Frequenzgangkompensation

Die oben beschriebene Prozedur zur Korrektur Ihres Mikrofons setzt zunächst voraus, dass Sie den individuellen Frequenzgang Ihres Mikrofons kennen. Um an den Frequenzgang des Mikrofons zu gelangen, gibt es prinzipiell folgende Möglichkeiten:

- Nutzen Sie den vom Hersteller mitgelieferten Frequenzschrieb (in der Regel nur eine Typspezifikation),
- Beauftragen Sie einen „Kalibrierdienst“ (z.B. Hifi-Selbstbau, IBF-Akustik)
- Führen Sie die Kalibrierung selbst durch, sofern sie Zugang zu einem hochwertigen Messmikrofon haben:
  - > Substitutionsmethode für  $f > 200\text{Hz}$ ,
  - > Druckkammermethode für  $f < 200\text{ Hz}$

### 5.3.1 Kalibrierung mittels eines hochwertigen Referenzmikrofons > 200 Hz

Wenn Sie temporär Zugriff auf ein hochwertiges Messmikrofon haben (s. z.B. Bild 5.12a), können Sie die Kalibrierung Ihres Mikrofons selbst vornehmen.

Eine recht gute Beschreibung der Prozedur ist z.B. auf der Homepage von Earthworks in dem Artikel „How Earthworks Measures Microphones“ zu finden. Earthworks verwendet im Bereich oberhalb von 500 Hz die Substitutionsmethode, in der das Testobjekt auf einer unendlichen Schallwand gegen ein Referenzmikrofon gemessen wird. Je tiefer die Testfrequenz wird, desto problematischer wird es, einen entsprechend großen und reflexionsarmen Messraum zu finden bzw. die Messung von Fremdeinflüssen freizuhalten. Um sich von diesen Zwängen zu befreien, verwendet Earthworks im unteren Frequenzbereich eine kleine Druckkammer zur Kalibrierung (s. Abschnitt 5.4.2).

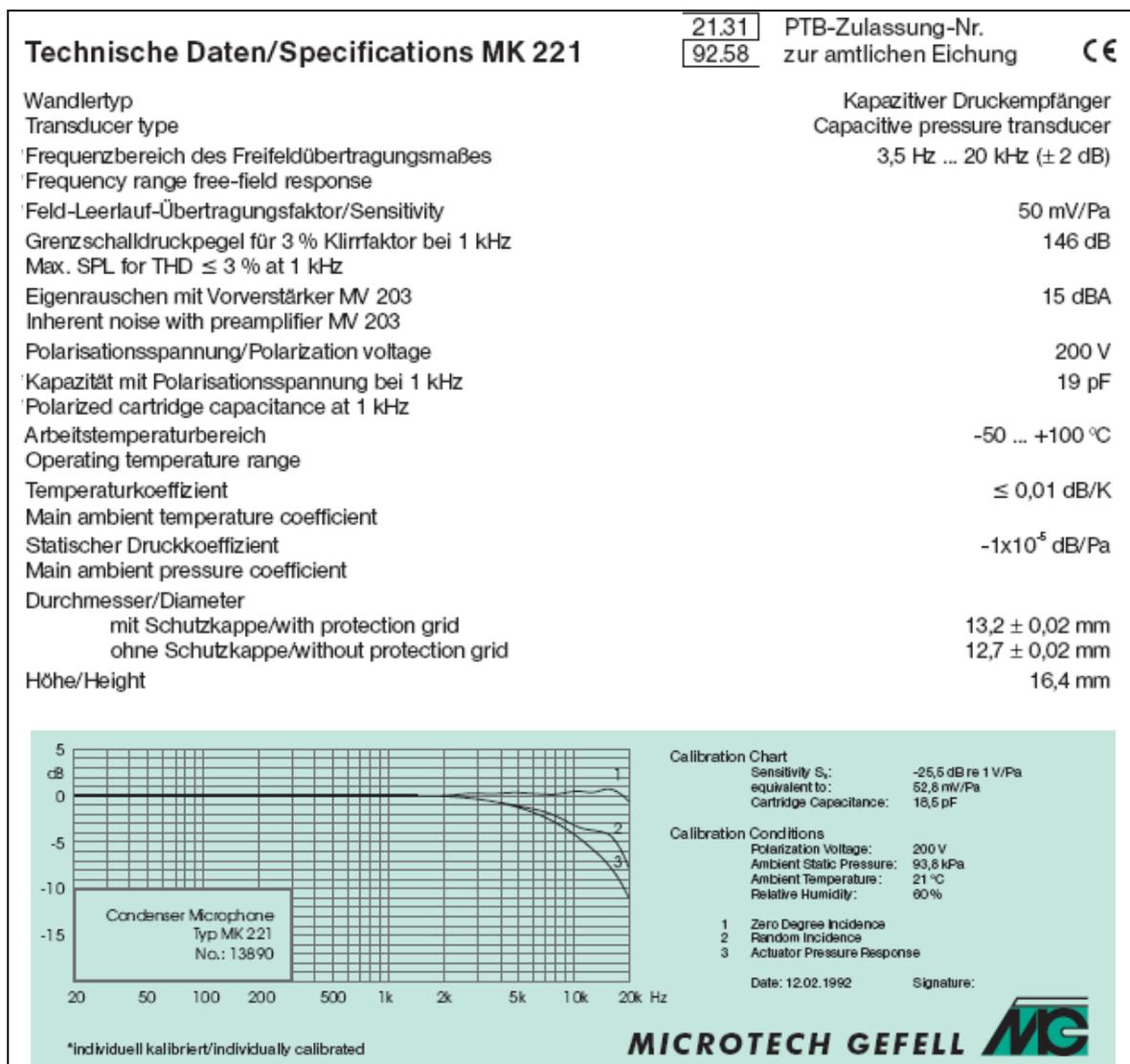


Bild 5.12a: „Referenzmikrofon“ MK 221 von Mikrotech Gefell

Bild 5.12b zeigt mit dem Referenzmikrofon und dem Kalibrierobjekt (MB550) gemessene Frequenzgänge. Kalibrierobjekt und Referenz unterscheiden sich im Pegel und im Frequenzgang. Zunächst versuchen wir den Pegelunterschied auszugleichen, denn der würde sich später nur als Offset bemerkbar machen.

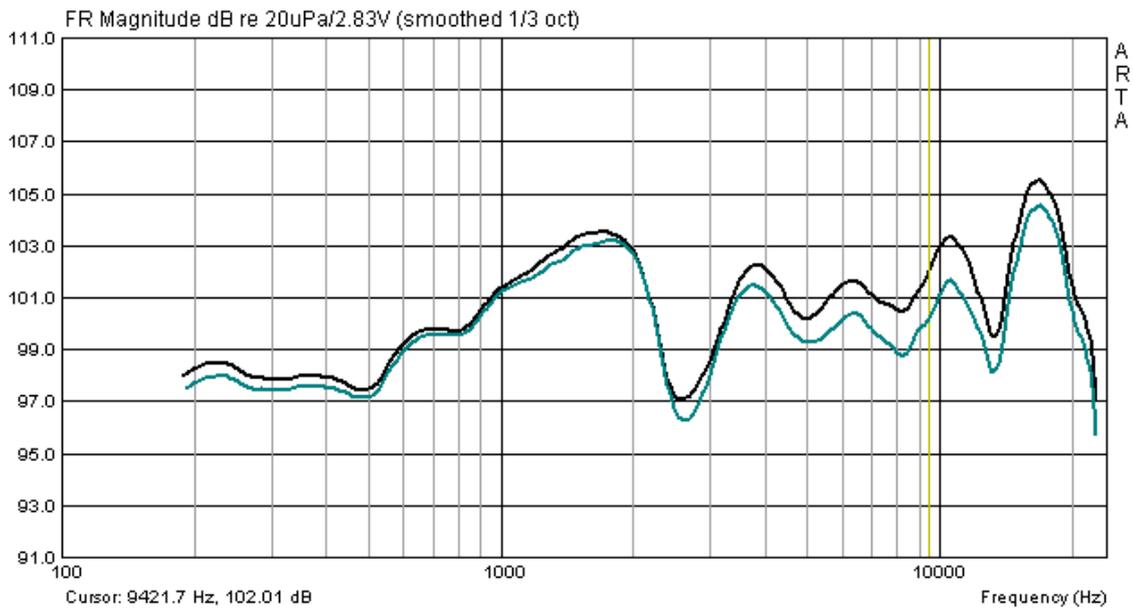


Bild 5.12b: Referenzmikrofon (MK 221, blau) und Kalibrierobjekt (MB550)

Mit ‚Scale Level‘ reduzieren wir den Pegel des MB 550 soweit, bis ein möglichst großer Teil beider Frequenzgänge in Deckung kommt (siehe Bild 5.13).

Der dafür beste Wert ist nicht immer auf den ersten Blick zu erkennen, daher ist ein wenig Probieren sinnvoll. Sie können mit ‚Scale Level‘ beliebig häufig Werte addieren oder subtrahieren.

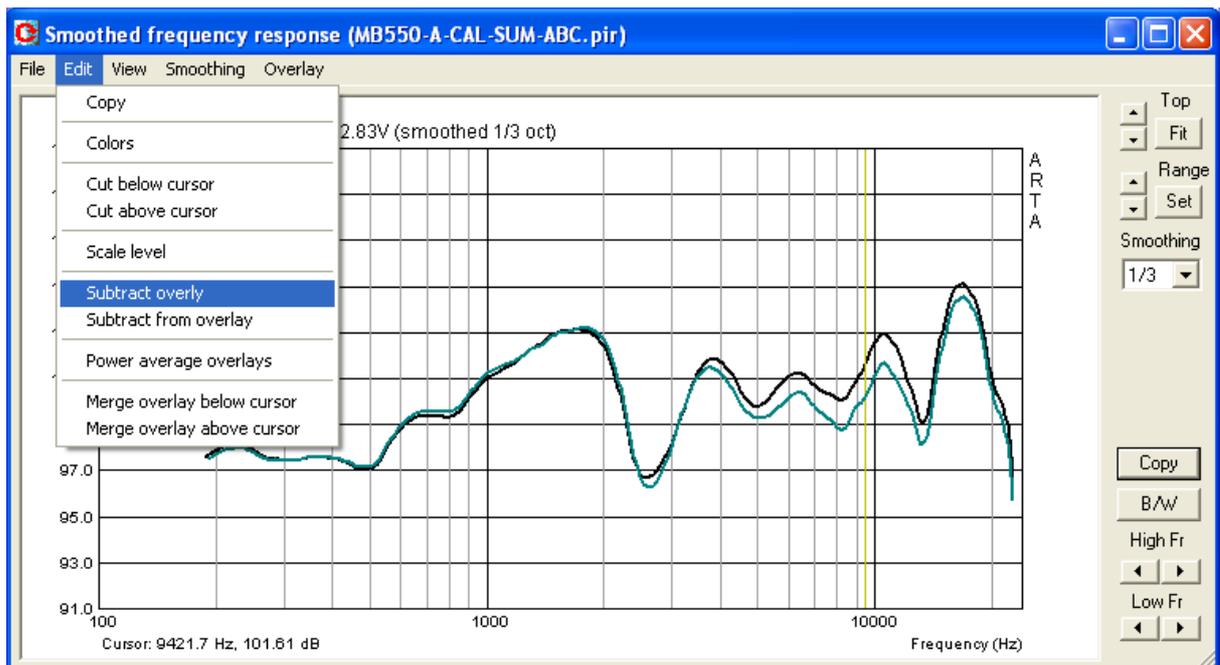
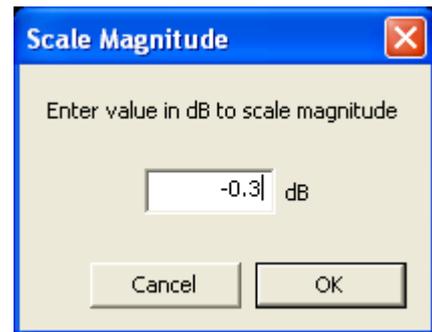


Bild 5.13: Skalierung und Differenzbildung

Danach bilden wir mit ‚**Subtract overlay**‘ (siehe Menü Edit in Bild 5.13) die Differenz zwischen den beiden Frequenzgängen.

Bild 5.14 zeigt das Ergebnis dieser Operation. Die Abweichungen im Frequenzbereich von 150 Hz bis 20 kHz liegen in einem Band von max. +/- 1,25 dB.

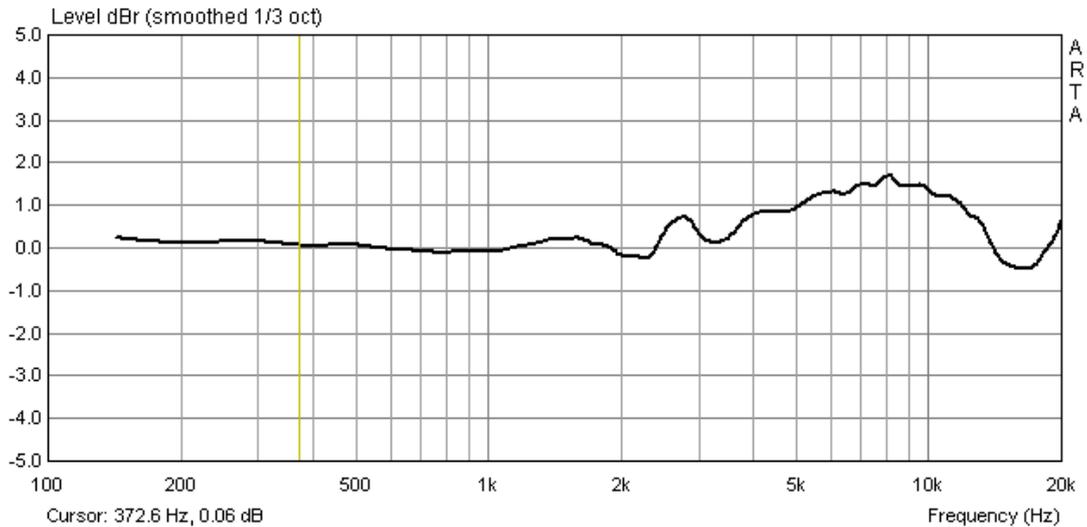


Bild 5.14: Abweichungen des Frequenzganges zur Referenz auf Achse

Durch ‚**Export ASCII**‘ können wir nun unsere Kompensationsdatei erzeugen. Nach Umbenennung von \*.txt auf \*.MIC kann sie dann wie oben gezeigt eingelesen werden.

### 5.3.2 Kalibrierung unterhalb 500 Hz in einer Druckkammer

Wie bereits ausgeführt, verwendet Earthworks im Frequenzbereich unterhalb 500 Hz eine Druckkammer zur Kalibrierung. Konstruktion und Arbeitsweise der Druckkammer sind in der ARTA-Application-Note Nr. 5 ausführlich beschrieben [V].

Die größte Abmessung der Kammer soll maximal 1/6 bis 1/8 der Wellenlänge der oberen Grenzfrequenz betragen, bei 500 Hz also 11,5 cm bis 8,4 cm.

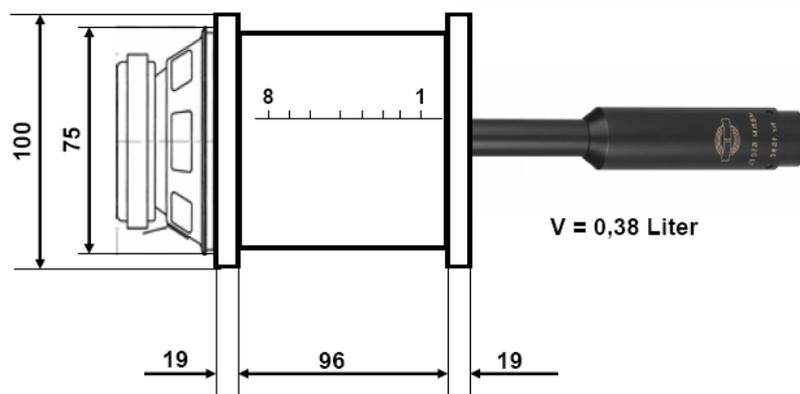


Bild 5.15: Konstruktions- und Anwendungsprinzip der Messkammer

Die Anwendung der Druckkammer ist weitgehend Bild 5.15 zu entnehmen. Das zu prüfende Mikrofon wird mit Hilfe eines Adapters in die Kammer eingebracht, gut mit Kitt abgedichtet und

anschließend mit ARTA oder STEPS im gültigen Frequenzbereich gemessen. Das Einbringen des Mikrofons in die Kammer hat den Vorteil, dass die Messung weitgehend unabhängig von der Umgebung wird und zusätzlich Störungen ausgeblendet werden. Da in der Kammer bei üblichen Spannungswerten mit sehr hohem Schalldruck (z.B. 2,83 V → 145 dB) zu rechnen ist, sollten zur Vermeidung von Schäden an den zu untersuchenden Mikrofonen nur sehr kleine Anregungsspannungen (ca. 0,01 V) verwendet werden. Bild 5.16 zeigt den mit STEPS ermittelten Frequenzgang des MK 221 in der Messkammer.

Im Folgenden wird anhand eines Beispiels gezeigt, wie aus der Referenzkurve und der Messkurve für das zu kalibrierende Mikrofon die Kalibrierkurve ermittelt wird.

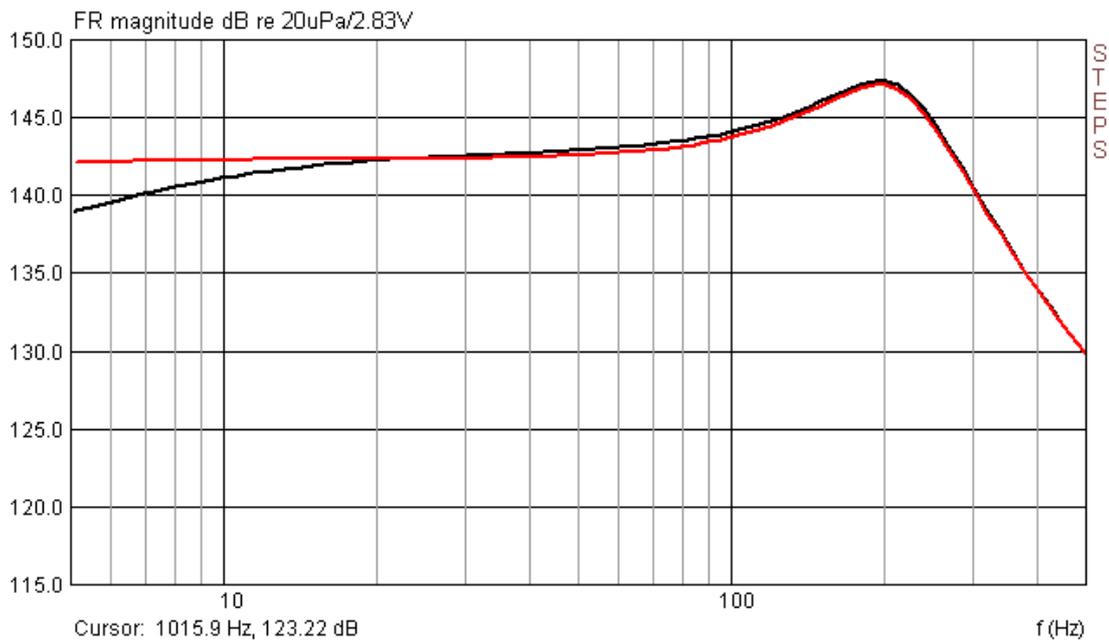


Bild 5.16 : MB 550 (schwarz) und Referenzfrequenzgang nach Pegelanpassung

In der Regel ist davon auszugehen, dass die Mikrofone unterschiedliche Empfindlichkeit haben werden. Daher ist zunächst eine Pegelanpassung erforderlich. Am einfachsten geht es, wenn eine Referenzfrequenz gewählt und die jeweilige Empfindlichkeit am Cursor abgelesen wird. Die Differenz ist anschließend mittels ‚Scale‘ auszugleichen.

Sofern mit ARTA gemessen wurde, kann die erforderliche Differenzbildung direkt mit ‚Edit → Subtract Overlay‘ erfolgen. Wenn mit STEPS gemessen wurde (bessere Reproduzierbarkeit), ist ein kleiner Umweg über z.B. Excel oder ein dafür geeignetes Simulationsprogramm (z.B. CALSOD) erforderlich.

Bild 5.17 zeigt das mit STEPS ermittelte Ergebnis für das Mikrofon MB 550 für den Frequenzbereich von 5 bis 500 Hz. Wird diese Kompensationskurve mit dem Ergebnis aus dem vorangegangenen Abschnitt zusammengefügt (siehe Bild 5.14), so erhalten Sie eine Kompensationsdatei für den gesamten Frequenzgang von ca. 5 Hz bis 20 kHz wie z.B. in Bild 5.11 gezeigt.

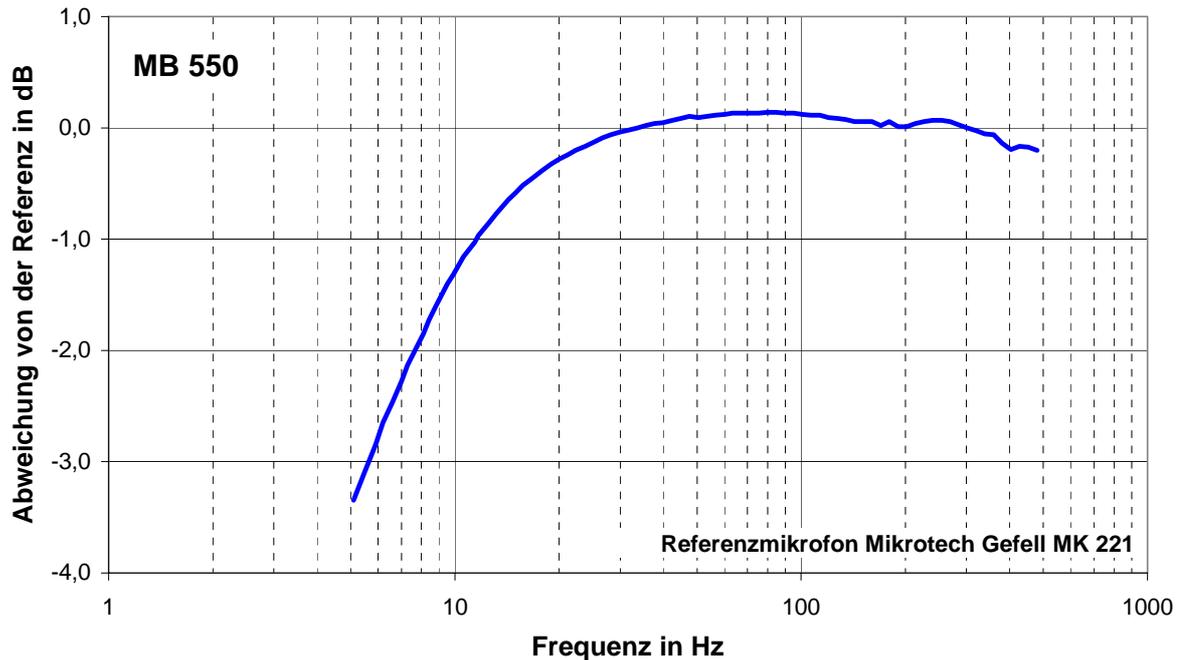


Bild 5.17: MB 550, Abweichungen vom Referenzfrequenzgang

Die Ergebnisse weiterer Mikrofone sind in Bild 5.18 zusammengefasst. Sie zeigen, dass unterhalb von 100 Hz mit deutlichen Abweichungen zwischen verschiedenen DIY-Mikrofonen gerechnet werden muss. Selbst relativ hochwertige Mikrofonkapseln (KE4-211) sind anscheinend keine Gewähr dafür, dass Abweichungen von der Spezifikation oder Streuungen vernachlässigbar sind.

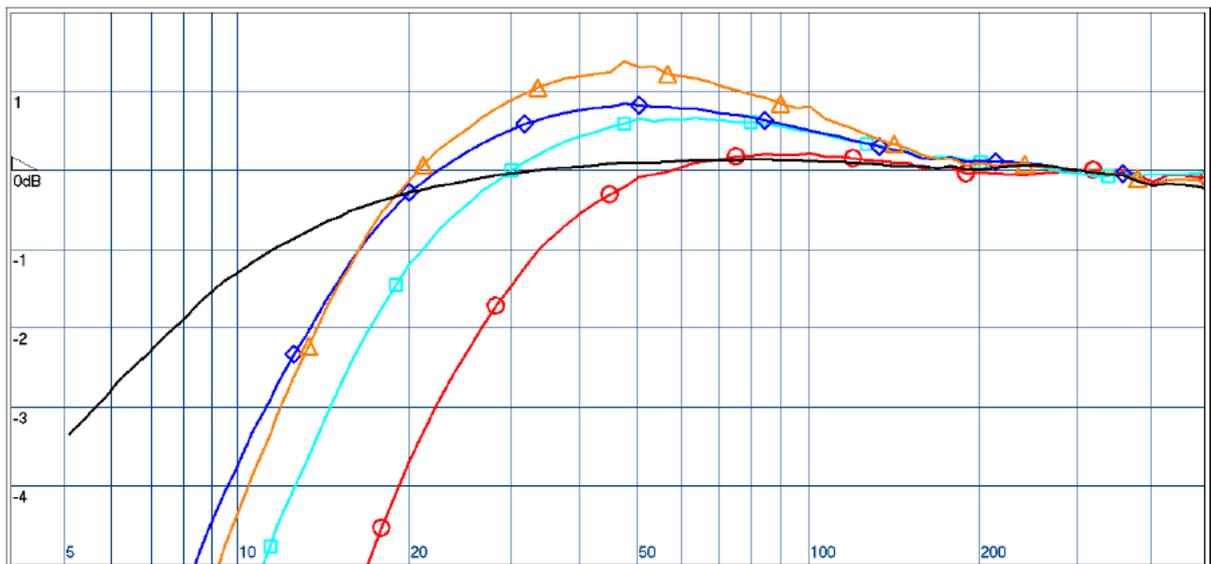


Bild 5.18: Ergebnisse der untersuchten Mikrofone: Schwarz (MB 550), Rot (KE4-211, Nr.1), Hellblau (KE4-211, Nr.2, Nr.2K), Blau (MCE 2000), Orange (Panasonic WM 60)

Dass neben einem linearen Frequenzgang auch andere Kriterien von Bedeutung sind, soll durch Bild 5.19 gezeigt werden. Alle bereits genannten Mikrofone wurden in der Druckkammer

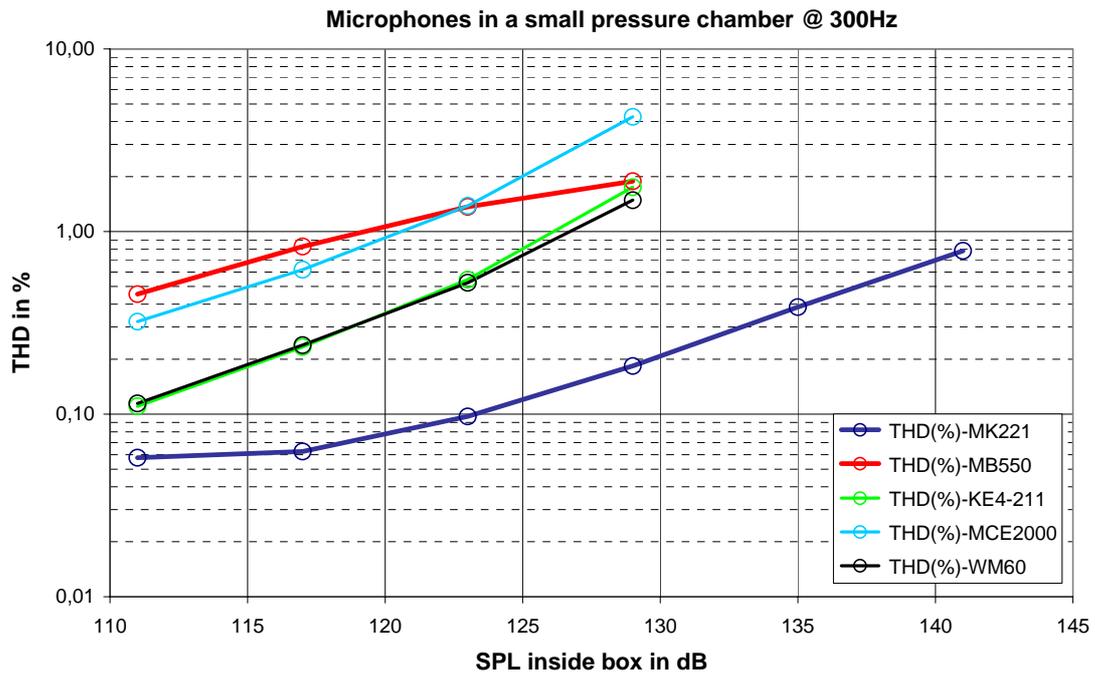


Bild 5.19: Vergleich des Klirrverhaltens von Mikrofonen bei 300 Hz

hinsichtlich ihres Verzerrungsverhaltens untersucht. Hier zeigt sich deutlich in Verzerrung (THD) und Grenzschalldruck, warum professionelle Messmikrofone „etwas“ teurer sind.

## 5.4 Prüfung des Messverstärkers

Ein wesentlicher Bestandteil der Messkette ist der Messverstärker. In vielen Fällen wird die eigene Leistungsendstufe beim Messen zum Einsatz kommen, gelegentlich wohl auch Bausätze oder Eigenentwicklungen. Unabhängig von der Wahl ist es erstrebenswert, zumindest die Eckdaten des eingesetzten Verstärkers zu kennen.

Sofern der Messverstärker nur für übliche Frequenzgang- und Impedanzmessungen genutzt wird, sind Verstärker mit einem linearen Frequenzgang zwischen 10 Hz und 20 kHz und Leistungen im Bereich von 6-8 Watt hinreichend. Sollen zusätzlich Verzerrungs- bzw. Kompressionsmessungen an Lautsprechern vorgenommen werden, sind Leistungen von 80 Watt und mehr an 8 Ohm nicht schädlich.

Um nun die eigene Gerätschaft hinsichtlich dieser Bedingungen unter die Lupe nehmen zu können, hier ein kleiner Exkurs zur Messung von Verstärkern mit ARTA.

Als Messobjekt wurde folgender Verstärker genutzt, der auf Basis einer Standardapplikation (siehe Bild 5.20) auf einer Lochrasterplatine aufgebaut war. Als Spannungsversorgung diente ein kleiner Ringkerntransformator mit 2 x 12 V und 36 VA.

Gemäß Simulation sollte sich für diese Schaltung der in Bild 5.21 dargestellte Frequenz- bzw. Phasengang ergeben.

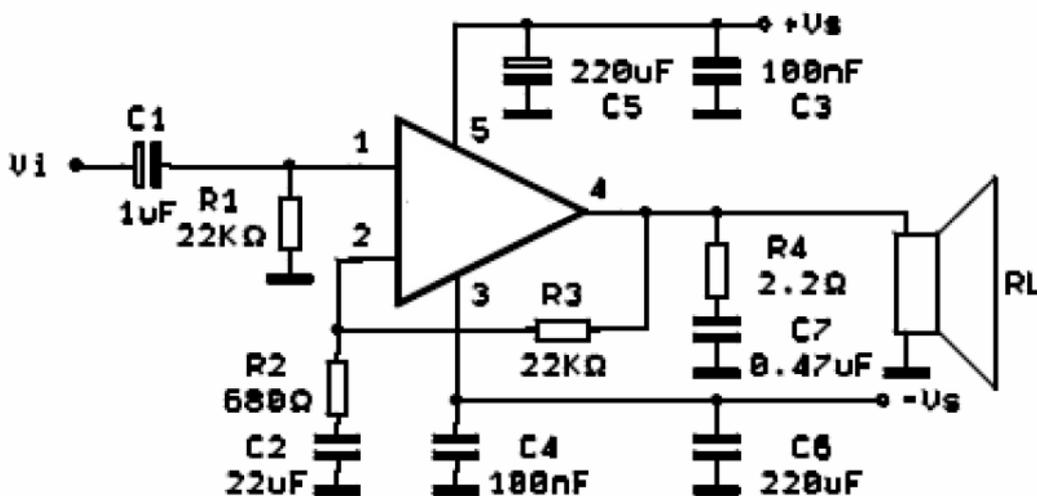


Bild 5.20: Messverstärker auf Basis des TDA 2030

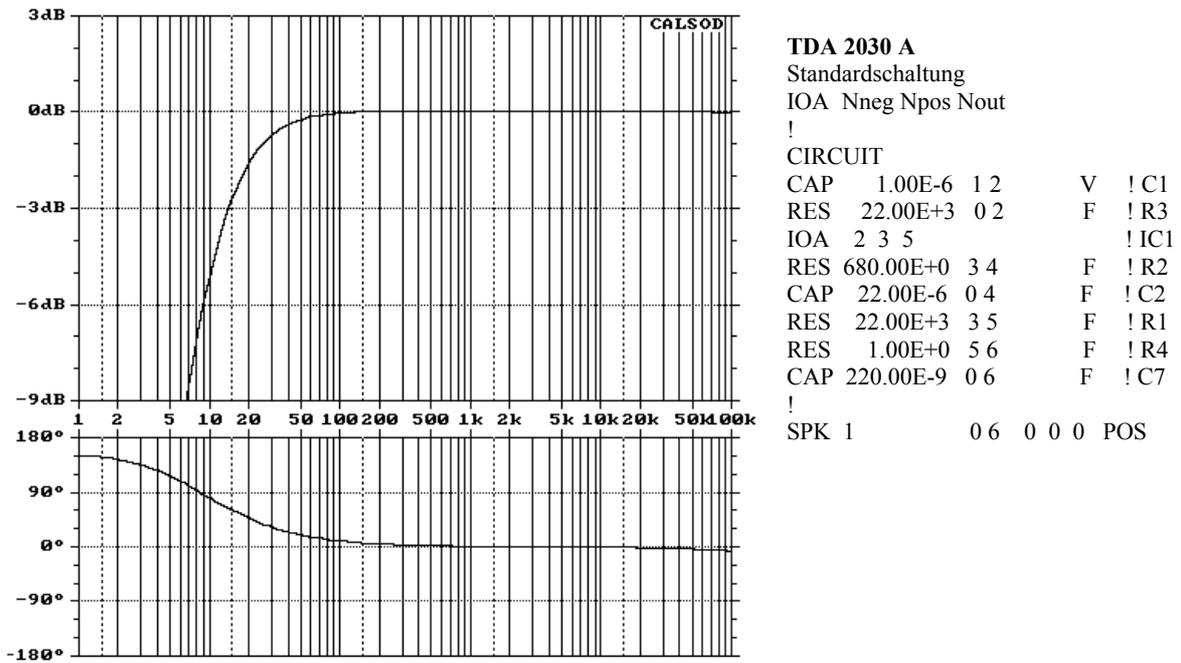


Bild 5.21: Simulation des Messverstärkers auf Basis des TDA 2030

Andere Kenngrößen eines Verstärkers, wie in Bild 5.22 und nachfolgender Tabelle dargestellt, sollen hier ebenfalls ermittelt werden.

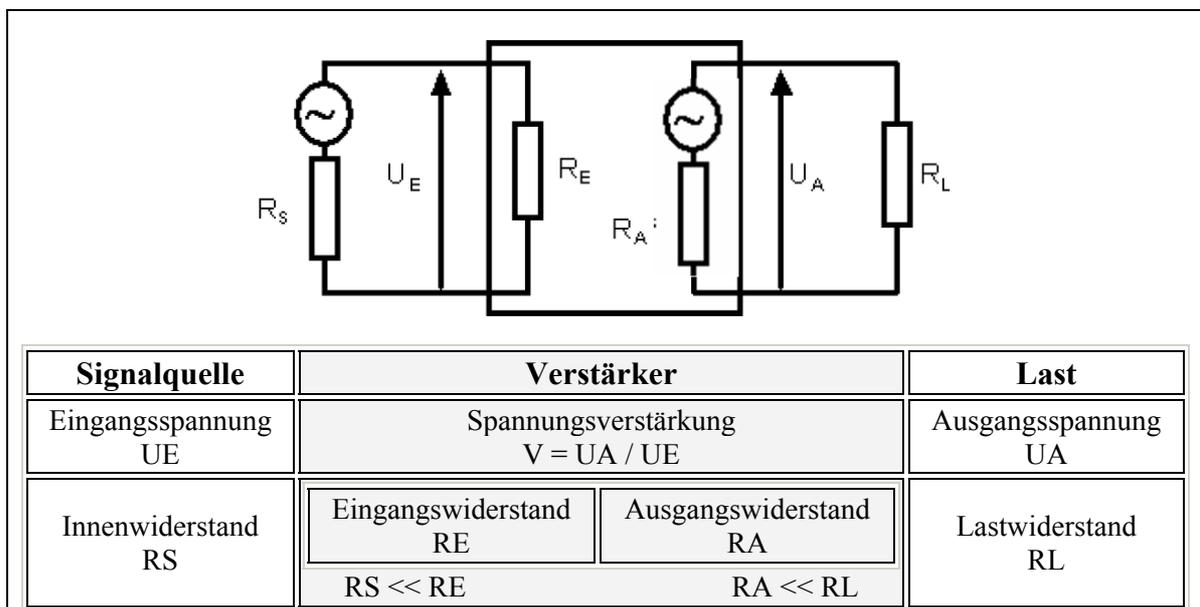


Bild 5.22: Prinzipskizze eines Verstärkers

Der **Eingangswiderstand R<sub>E</sub>** ist der eingangsseitige Innenwiderstand eines Verstärkers und wird dadurch bestimmt, dass man in Reihe zum Verstärkereingang einen Widerstand R<sub>V</sub> schaltet. Dadurch geht die Eingangsspannung von U<sub>E1</sub> auf U<sub>E2</sub> und mit ihr die Ausgangsspannung von U<sub>A1</sub> auf U<sub>A2</sub> zurück. Hieraus ergibt sich der Eingangswiderstand des Verstärkers zu:

$$R_E = R_V \cdot U_{A2} / (U_{A1} - U_{A2})$$

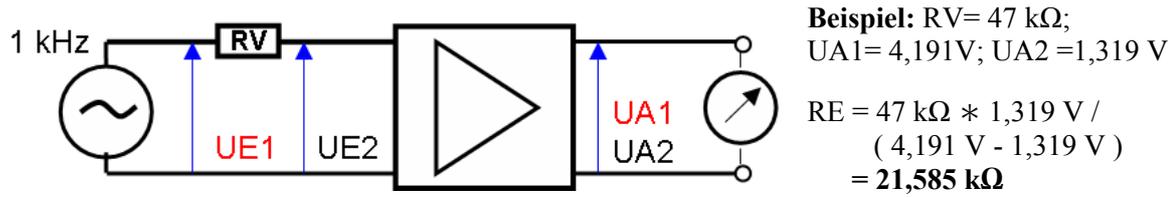


Bild 5.23: Messung des Eingangswiderstandes

Der **Verstärkungsfaktor** ist das Verhältnis zwischen der Ausgangs- und der Eingangsspannung eines Verstärkers.

$$V = U_A / U_E$$

Es wird mit einer sinusförmigen Wechselspannung gemessen, deren Frequenz üblicherweise 1 kHz beträgt. Ein genauer Spannungsteiler zwischen dem Generator und dem Verstärker erleichtert die Messung bei hohen Verstärkungsfaktoren (z.B. Mikrofonvorverstärker). Man misst die Spannung  $U_E'$  vor dem Spannungsteiler und multipliziert  $v$  mit dem Spannungsteilverhältnis  $u = (R_1 + R_2) / R_2$ . Dann gilt  $V = U_A * u / U_E'$ .

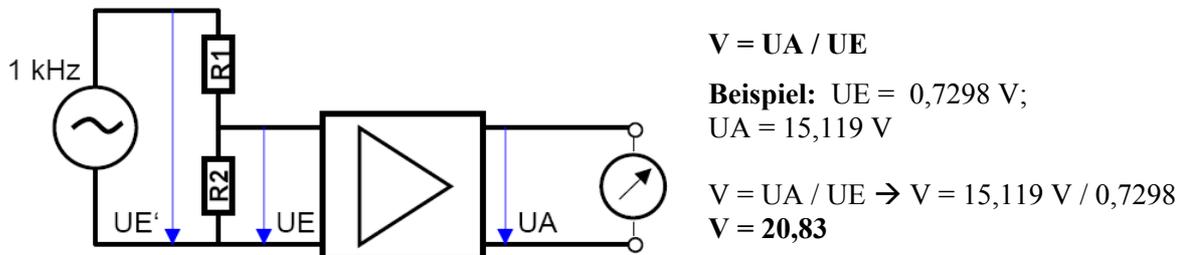


Bild 5.24: Messung des Verstärkungsfaktors

Der **Ausgangswiderstand** ist der ausgangsseitige Innenwiderstand eines Verstärkers und wird dadurch bestimmt, dass man den Ausgang mit einem Widerstand  $R_L$  belastet. Dadurch sinkt die Ausgangsspannung vom Wert der Leerlaufspannung  $U_0$  auf den Wert der Klemmenspannung  $U_L$  ab. Der Ausgangswiderstand ist dann

$$R_A = R_L * (U_0 / U_L - 1).$$

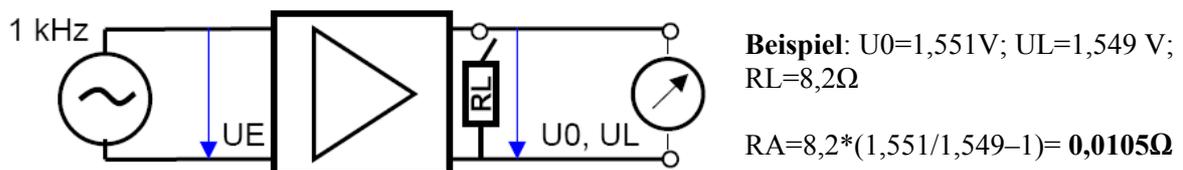
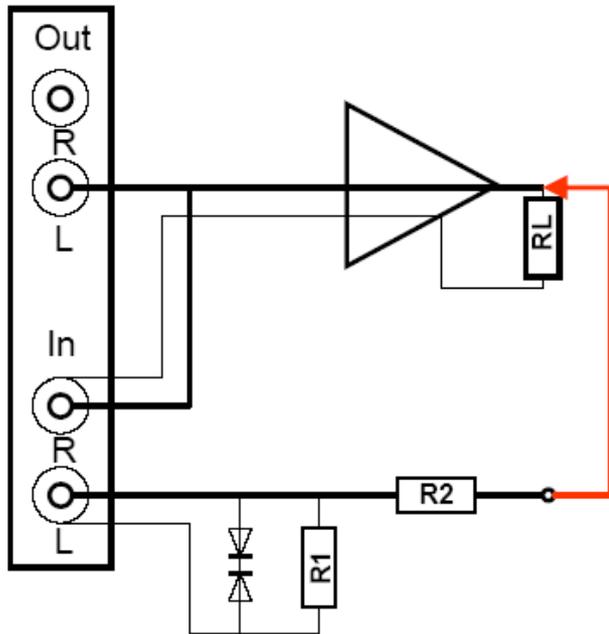


Bild 5.25: Messung des Ausgangswiderstandes

Für die Messungen mit ARTA verwenden wir den Messaufbau aus Bild 5.26. Hierdurch stellen wir sicher, dass der Eingangskanal der Soundkarte nicht übersteuert wird und bei „Verdrahtungsproblemen“ durch die Dioden geschützt ist.



$$A = 20 * \log (R_x / R_2 + R_x)$$

$$R_x = Z_{IN} * R_1 / (Z_{in} + R_1)$$

Beispiel:

$Z_{IN}$  = Eingangsimpedanz der Soundkarte  
= 10k

Abschwächung A	R1	R2
-10 dB	510 Ω	1047Ω
-20 dB	510 Ω	4,4kΩ
-30 dB	510 Ω	15kΩ

Bild 5.26: Spannungsteiler für ARTA zur Messung von Verstärkern

Die Messung des Frequenzganges ist in Bild 5.27 dargestellt. Es zeigt sich eine recht gute Übereinstimmung mit der Simulation. Die untere Grenzfrequenz (-3dB) beträgt 12,4 Hz, die obere Grenzfrequenz ist aufgrund der Begrenzung durch die Samplefrequenz der verwendeten Soundkarte (48 kHz) nicht zu bestimmen.

Bild 5.28 zeigt das Verzerrungsverhalten des Messverstärkers bei 1, 4, 8 und 16 Watt Leistung an 8 Ohm Last. Es ist zu sehen, dass die hier eingesetzte Standardschaltung mit den TDA 2030A bis 8 Watt Ausgangsleistung an 8 Ohm gut verwendbar ist. Bitte beachten Sie, dass an anderen Lasten (z.B. 4 Ohm) das Verzerrungsverhalten anders aussehen kann.

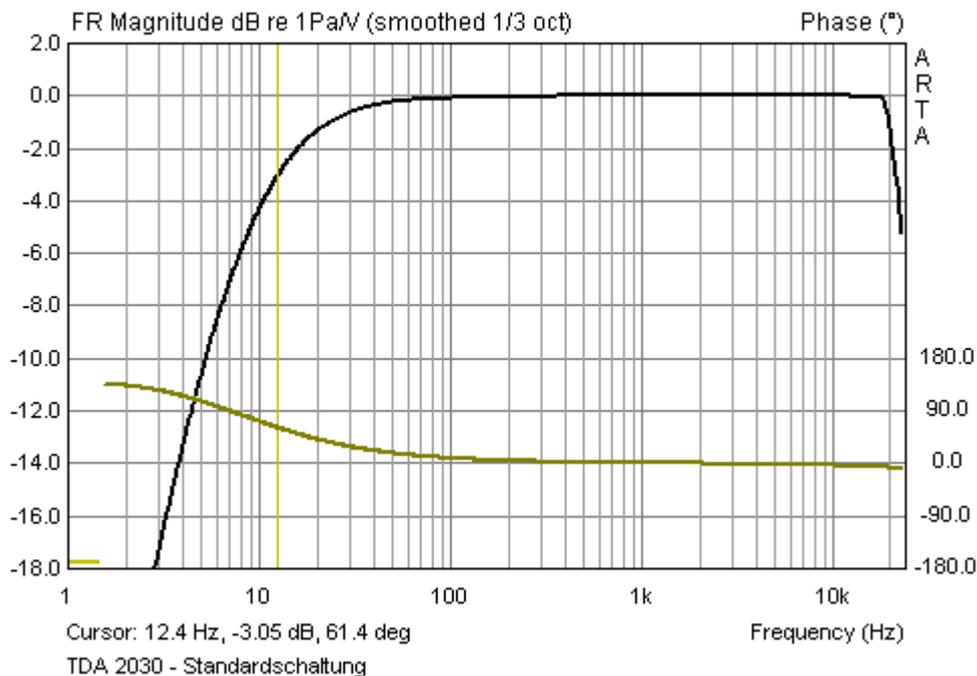


Bild 5.27: Frequenzgang des Messverstärkers auf Basis des TDA 2030

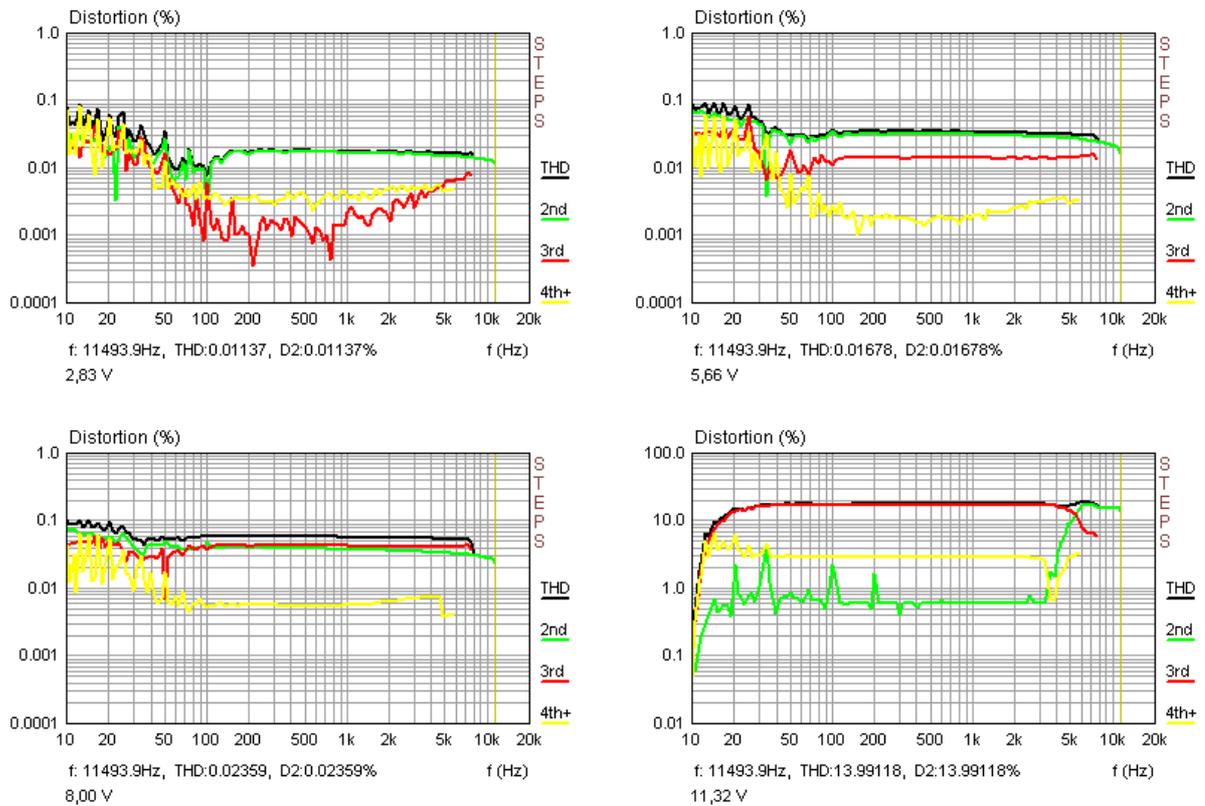


Bild 5.28: Klirrverhalten (THD) des Messverstärkers bei 1, 4, 8 und 16 Watt an 8 Ohm

Ab Release 1.3 sind in STEPS spannungs- bzw. leistungsbezogene Verzerrungsmessungen möglich. Bild 5.29 zeigt das spannungsabhängige Klirrverhalten des Messverstärkers bei 1 kHz. Weitere Details zu dieser Messart finden Sie in [Kapitel 9.3](#).

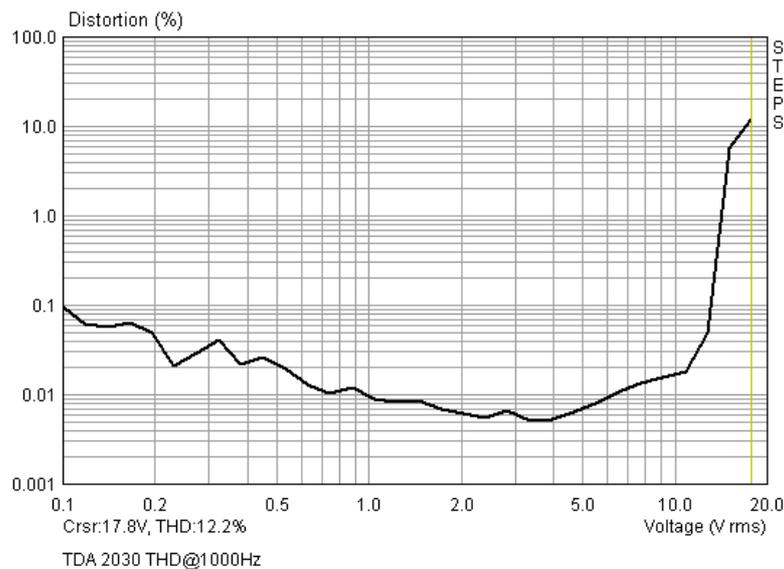


Bild 5.29: Spannungsabhängiges Klirrverhalten (THD) des Messverstärkers bei 1000 Hz

## 6. Messen mit ARTA

### 6.0 Allgemeines

Nachdem die Kalibrierung der Messkette abgeschlossen ist und alles zur Messung vorbereitet, kann es mit den eigentlichen Messungen losgehen. Man sollte es sich zur eisernen Regel zu machen, vor jeder Messsitzung alle Kabelverbindungen und alle Einstellungen gründlich und in aller Ruhe zu kontrollieren.



Bild 6.0.1: Messausstattung ohne Mess- bzw. Verbindungskabel und Stativ

Billige Kabel - und hier ganz besonders schlecht verpresste Kabel mit Krokodilklemmen – oder auf die Schnelle zusammengelötete Verbindungskabel lösen immer wieder Fehler, lange Suchereien und häufig auch Verzweiflung aus.

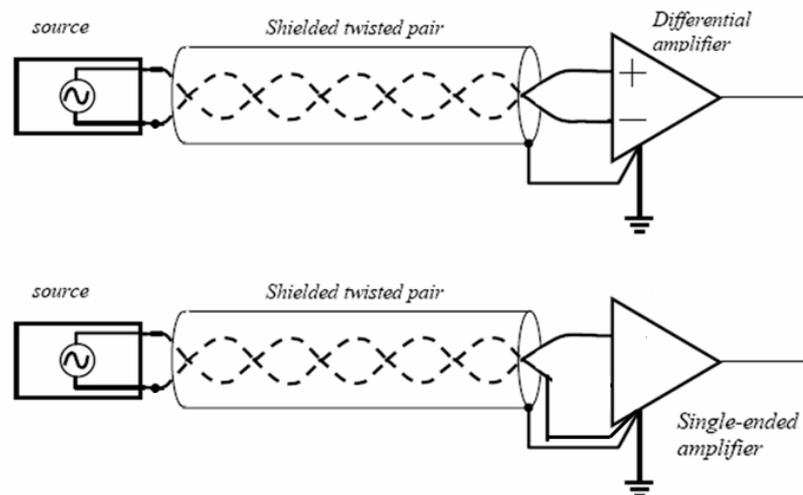
**MERKE:** Ein sauber zusammengestelltes Mess-Equipment mit qualitativ hochwertigen und eindeutig gekennzeichneten Mess- bzw. Verbindungskabeln sowie eine ARTA-MessBox helfen unsinnige Fehler (und Schäden) zu vermeiden. Dies gilt ganz besonders dann, wenn längere Zeit nicht gemessen wurde und die Vertrautheit mit dem System ein wenig abhanden gekommen ist.

## 6.0.1 Messleitungen

Wer kleine analoge Spannungen messen will, sollte auch auf seine Messkabel achten. Naturgemäß leidet die Übertragungsqualität des Signals, wenn kleine Messsignale mit einfachen Kabeln über größere Entfernungen übertragen werden, da Störsignale jeglicher Art auf die Leitungen einwirken.

Um den Masse- und Störproblemen entgegenzuwirken, sollten folgende Hinweise [26] beachtet werden:

- Verwenden Sie möglichst kurze Kabel zwischen Quelle (Sensor) und Messverstärker. Besonders im Falle hochohmiger Quellen ist hierauf zu achten.
- Verwenden Sie möglichst zweifach abgeschirmte Leitungen.
- Wenn erforderlich, ziehen Sie eine zusätzliche Masseleitung und legen die Abschirmung nur einseitig auf.



- Vermeiden Sie Masseschleifen. Achten Sie auf gleiches Erdpotential zwischen Messquelle und Messgerät (Soundkarte). Messen Sie vorher mit einem DVM zwischen beiden Massepotentialen in AC und DC.
- Legen Sie das Signalkabel nicht an Störquellen vorbei (Trafos, Netzteile, Netzspannung führende Kabel etc.).
- Falls möglich, trennen Sie den Computer galvanisch vom Netz (Laptop im Batteriebetrieb)
- Nutzen Sie zusätzlich die Mittelwertbildung (Averaging)

## 6.0.2 Der Signal/Störabstand der Messkette

Der Beachtung des Signal-/Störabstandes (S/N Ratio) kommt bei jeder Messung eine besondere Bedeutung zu. Ein korrekter Frequenz- und Phasengang für eine Messung kann nur dann berechnet werden, wenn der Signal- oder Nutzpegel größer ist als der Störgeräuschpegel.

Daher sollte vor jeder Messung der Signal/Störabstand mit Hilfe einer 1/3 Oktav Messung im **FR1**-Modus ermittelt werden.

Messen Sie dazu im vorgesehenen Messaufbau den Schallpegel mit und ohne Lautsprecher (DUT) und vergleichen Sie die Terzpegel (s. Bild .6.0.2). Die Störgeräusche sollten in jedem Band mindestens 12 dB unter dem Signalpegel liegen. Dabei gilt: Je größer der Abstand, je besser die Qualität der Messergebnisse.

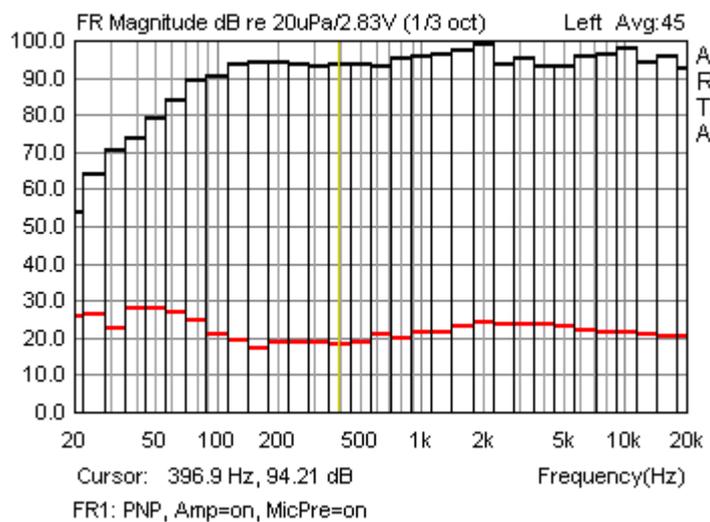


Bild 6.0.2: Ermittlung des Signal-/Störabstandes im FR-Modus

Zeigt sich in einem oder mehreren für die Messung relevanten Bändern kein oder nur ein geringer Pegelunterschied, so haben Sie die folgenden Möglichkeiten zur Verbesserung der Situation:

- den Störpegel verringern oder den Raum bzw. die Messumgebung wechseln
- den Pegel des Anregungssignals erhöhen
- Anregungssignale mit geringem Energiegehalt vermeiden (z.B. MLS)
- Mittelung, siehe Abschnitt 6.0.3

Der Phasengang reagiert sehr empfindlich auf ein ungünstiges Signal/Störabstandsverhältnis und dies besonders bei Messungen an Lautsprechern und Lautsprecherboxen, die nicht den gesamten Frequenzbereich abdecken. Grundsätzlich gilt, dass der Phasenfrequenzgang nur dort zuverlässig berechnet werden kann, wo ein genügend großer Signal/Rauschabstand vorhanden ist.

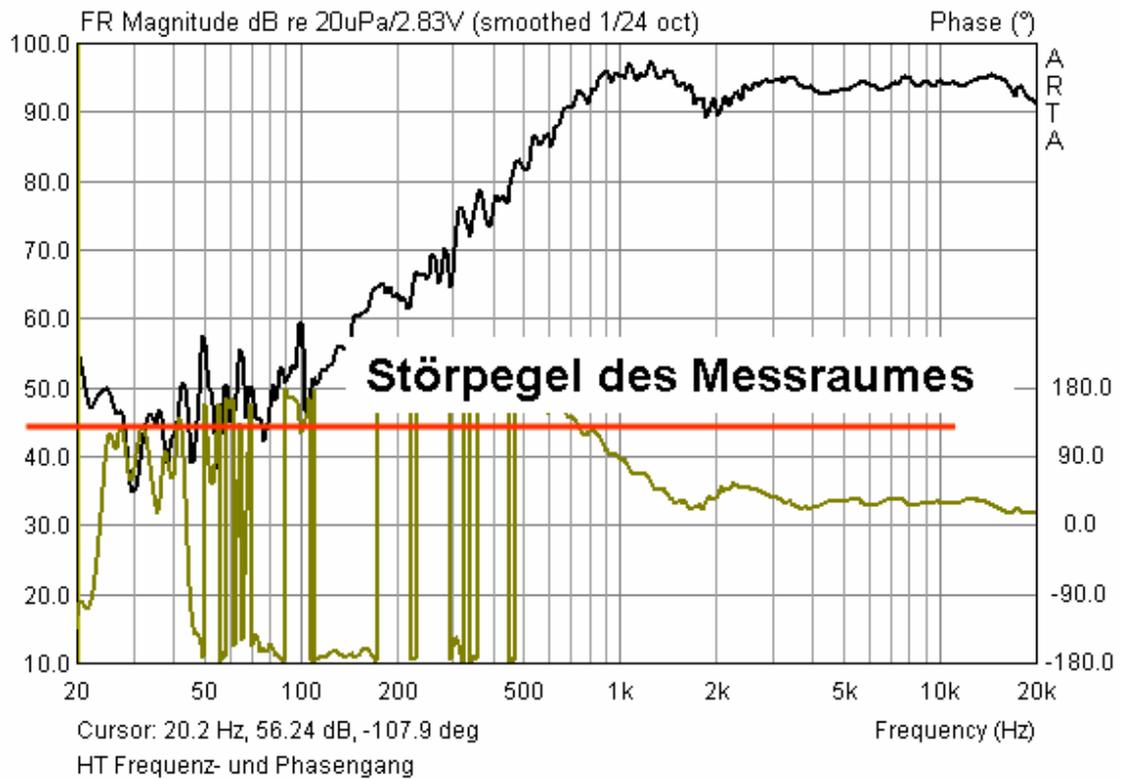


Bild 6.0.3: Frequenz- und Phasengang eines HT im normalen Wohnraum gemessen

Bei Messungen an einzelnen Lautsprechern ist dies in der Regel nicht im gesamten Frequenzgang der Fall. So strahlt ein Hochtonlautsprecher bei 100 Hz so wenig Schallenergie ab, dass die Übertragungsfunktion in diesem Frequenzbereich vom Störpegel des Messraumes überdeckt wird. Der Phasengang wird demzufolge weitgehend aus dem Raumrauschen berechnet und ist daher nicht verwendbar.

### 6.0.3 Mittelungen

Wie bereits oben erwähnt, finden Messungen selten unter optimalen Bedingungen statt. Oft hat man erhebliche Nebengeräusche durch Verkehrslärm, Lüftergeräusche von Computern, das Anlaufen von Heizungs- oder Klimaanlage, Windgeräusche sowie Arbeiten im Gebäude.

Um hier Messergebnisse mit erträglicher Genauigkeit zu erhalten, greift man auf die Mittelung zurück. Im Mode **IMP** finden wir im Menü „**Impulse response measurement**“ das Feld „**Number of averages**“. Im Mode **FR1**, **FR2** und **SPA** finden Sie in den jeweiligen Untermenüs unter „Averaging“ das Feld „**Max averages**“.

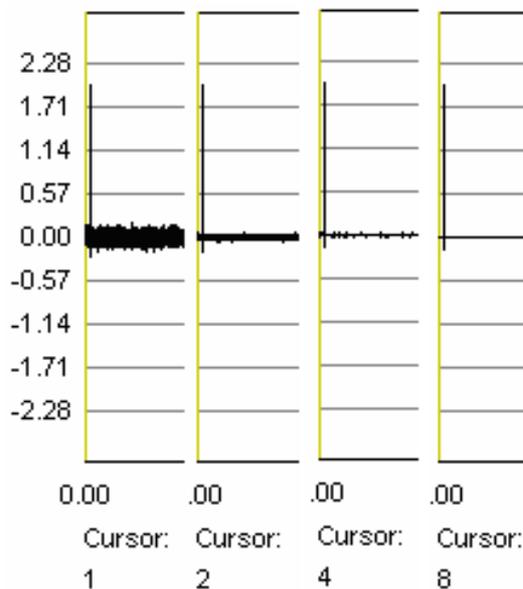
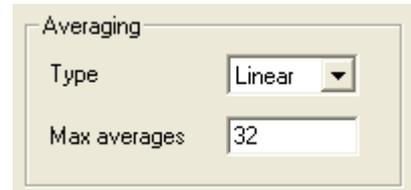


Bild 6.0.4: Mittelung eines verrauschten Signals

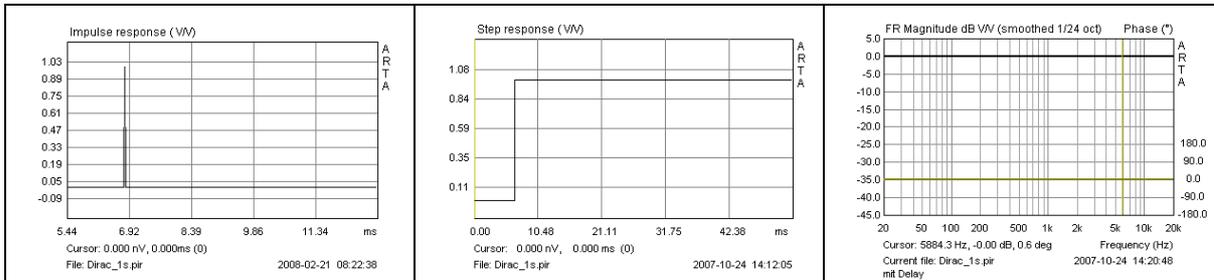
In diesen Feldern wird die Zahl der gewünschten Messungen eingestellt, ARTA bildet dann automatisch den Mittelwert dieser Messungen.

Pro Verdopplung der Anzahl der Messungen erhöht sich der Geräuschabstand um  $1/\sqrt{n}$ , also 3 dB. Dies kann allerdings nicht beliebig fortgeführt werden, da andere Erscheinungen, wie z.B. Jitter, dem Ganzen eine Grenze setzt.

Bild 6.0.4 zeigt das Messergebnis für ein sehr verrauschtes Signal mit 1, 2, 4 und 8 Mittelungen. Wie wir sehen, ist das Mittelungsverfahren recht wirkungsvoll.

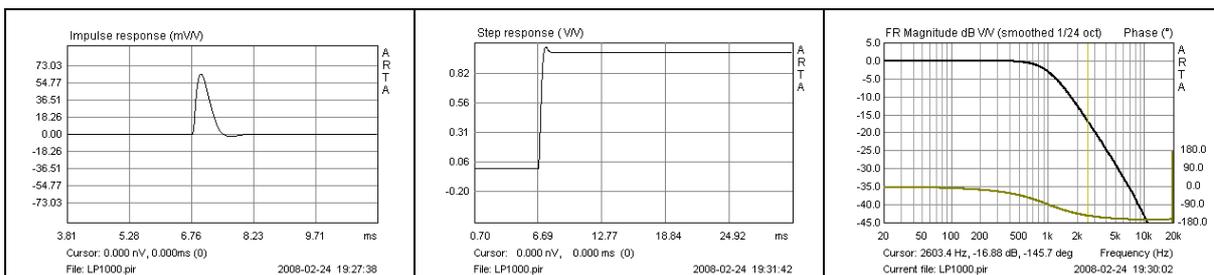
## 6.1 Impulsantworten – Theorie und Praxis

Je nach Messobjekt - besonders bei Subwoofern - und Kenntnis der Signaltheorie, ist die Überraschung mehr oder minder groß, wenn die erste Impulsantwort auf dem Monitor zu sehen ist. Daher soll an dieser Stelle ein kurzer Überblick mit Beispielen aus Theorie und Praxis gegeben werden.



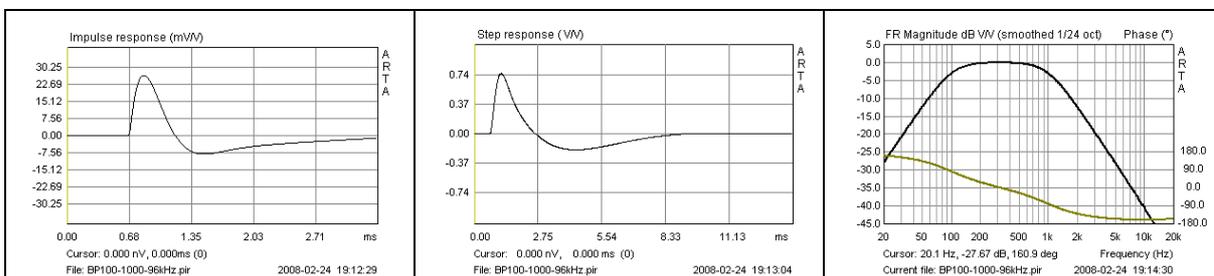
**Bild 6.1.2.1:** Sprungantwort (mitte) und Frequenzgang (rechts) eines Dirac Impulses (links)

Zur Beschreibung der Theorie wurde ein Dirac-Impuls (siehe Bild 6.1.2.1) bzgl. der Zielgröße (Tiefpass, Bandpass, Hochpass) gefiltert und anschliessend als Wav-Datei in ARTA eingelesen und ausgewertet. Auf diesem Wege erzeugte Impuls- und Sprungantworten sowie Frequenzgänge entsprechen – soweit die Bandbreitenbegrenzung keinen Strich durch die Rechnung macht - den idealen Verläufen der Filtertheorie



**Bild 6.1.2.2:** Impulsantwort (links), Sprungantwort (mitte) und Frequenzgang (rechts) eines 1000 Hz Tiefpasses

Bild 6.1.2.2 zeigt als erste Beispiel einen 12 dB Tiefpass mit einer Eckfrequenz von 1000 Hz. Beachten Sie die Veränderungen an Impuls- und Sprungantwort im Vergleich zum Bild 6.1.2.1.



**Bild 6.1.2.3:** Impulsantwort (links) Sprungantwort (mitte) und Frequenzgang (rechts) eines Bandpasses mit 100 Hz / 1000 Hz Übergangsfrequenz

Das zweite Beispiel in Bild 6.1.2.3 zeigt einen 12 dB Bandpass mit 100 Hz respektive 1000 Hz Eckfrequenz . Analysieren Sie auch hier die Veränderungen an Impuls- und Sprungantwort im Vergleich zum Dirac-Impuls. Bitte beachten Sie die unterschiedlichen Zeitachsen.

Um den Einfluss unterschiedlicher Eckfrequenzen auf das Aussehen der Sprungantwort zu verdeutlichen, wird im nächsten Bild je ein 12dB Tiefpass, Bandpass und ein Hochpass gezeigt. Haben Sie eine besonderes Augenmerk auf den Bandpass, denn alle Lautsprecher zeigen dieses Verhalten.

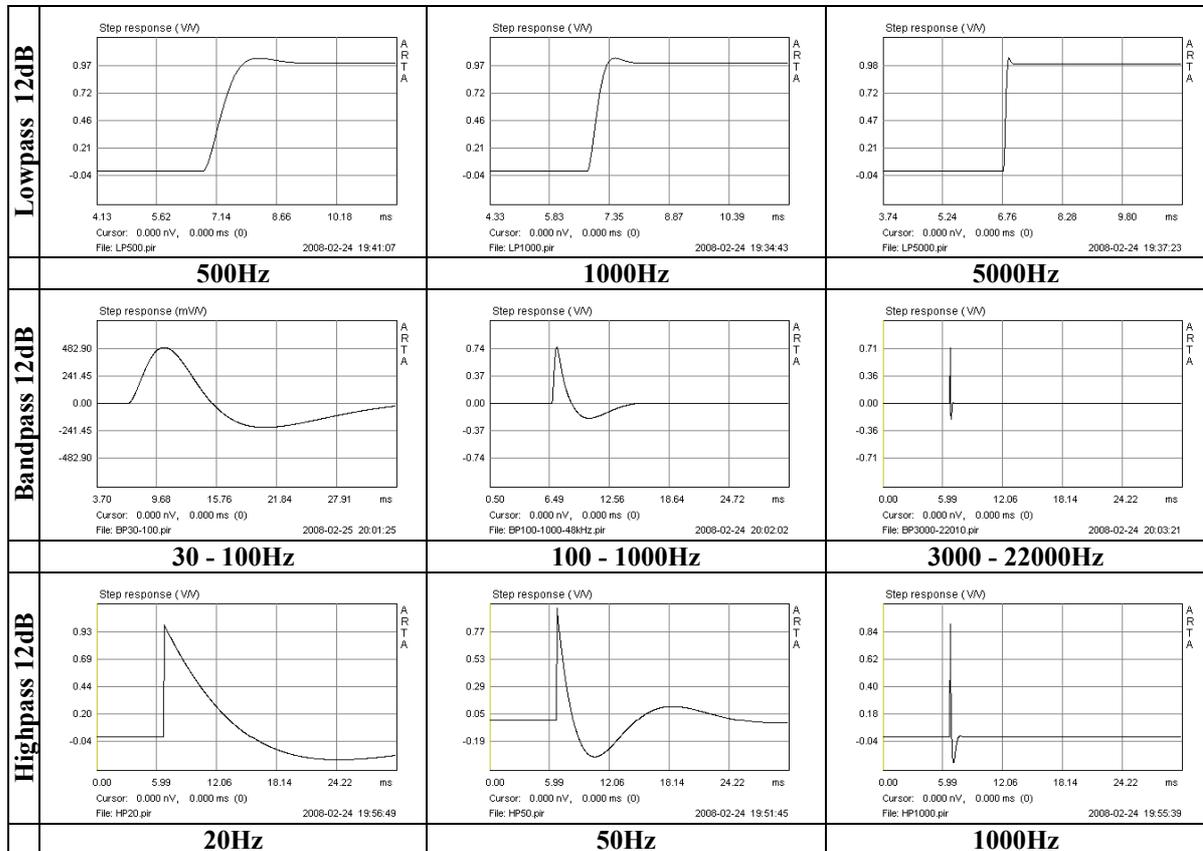
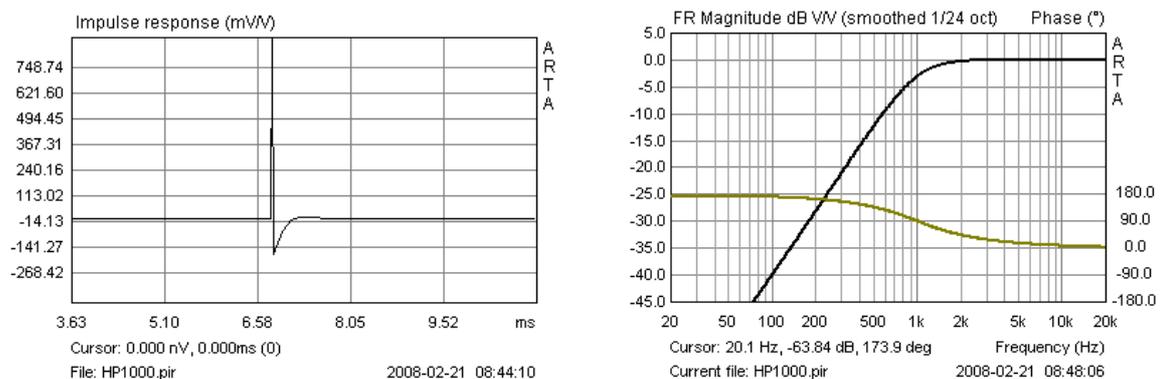
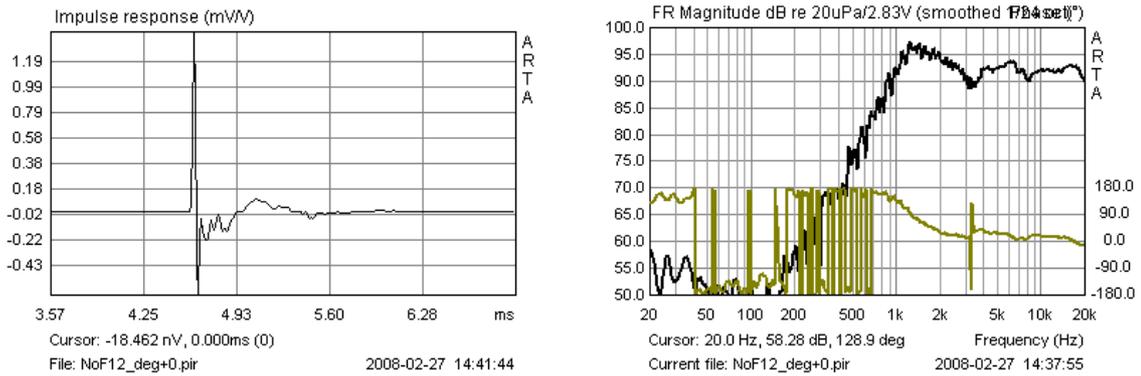


Bild 6.1.2.4: Einfluss der Eckfrequenz auf das Aussehen der Sprungantwort

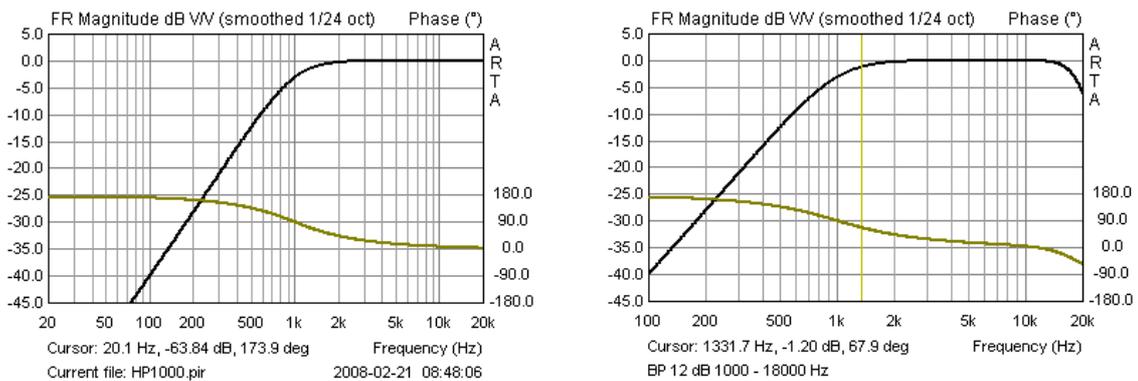
Im letzten Beispiel wird ein Hochtöner durch einen 12 dB Hochpass mit 1000 Hz Eckfrequenz simuliert. Hierzu gibt es ein reales Gegenstück. Bild 6.1.2.5 zeigt die Simulation (oben) sowie den gemessenen Frequenzgang eines Hochtöners. Wie wir sehen, gibt es deutliche Unterschiede zum theoretischen Verlauf. Sowohl die individuelle Charakteristik des Hochtöners, als auch die Einbaubedingungen sowie die Messbedingungen (Messabstand, Raum, Störgeräusche etc.) zeigen sich in der Impulsantwort und demzufolge auch in den abgeleiteten Auswertungen. Zum seltsamen Verlauf des Phasenganges finden Sie eine Erläuterung in Kapitel 6.1.





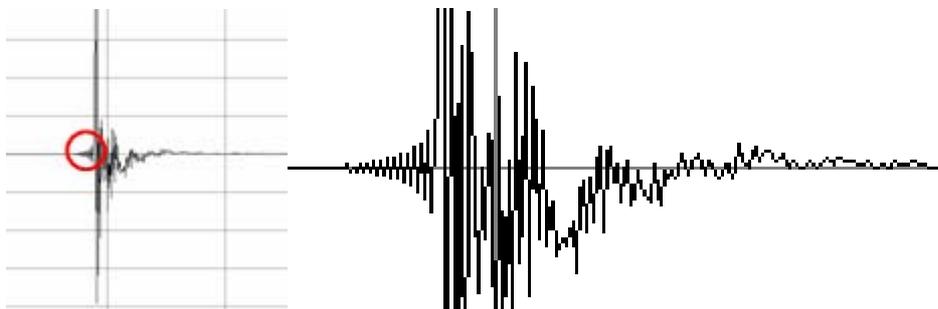
**Bild 6.1.2.5:** Impulsantwort und Frequenzgang eines simulierten und eines realen Hochtöners

Darüber hinaus ist natürlich auch ein Hochtöner durch einen Bandpass zu beschreiben, hier aber aufgrund der Bandbreitenbegrenzung der Simulationssoftware (22 kHz) und des Messsystems (24 kHz) nur eingeschränkt darstellbar (Bild 6.1.2.6)



**Bild 6.1.2.6:** Simulation eines Hochtöners als Hochpass (links) und Bandpass (rechts)

Abschliessend noch eine Anmerkung zu einer häufig gestellten Frage: Woher kommen die seltsamen Artefakte vor der eigentlichen Impulsantwort ?



**Bild 6.1.2.7:** Impulsantwort mit Pre-Ringing

Dieses so genannte Pre-Ringing ist eine Folge der Bandbreitenbegrenzung des Messsystems. Es tritt jeweils mit Frequenzen der halben Abtastrate auf, bei den heute üblichen Soundkarten also mit 24 kHz (48 kHz) bzw. 48 kHz (96 kHz). Begrenzte Abhilfe kann durch Setzen von „Filter dual channel impulse response“ im Menü „Impulse response measurement“ erreicht werden.

## 6.2 Messen, aber wo?

Vor der Beantwortung der Frage nach dem Wo, steht zunächst die Frage nach dem Was in welchem Kontext. Das „Was“ definiert in diesem Zusammenhang einen wichtigen Teil der Messaufgabe. Wenn z.B. ein Subwoofer oder eine 3 Wege Standbox gemessen werden soll, so sind andere Bedingungen zu erfüllen, als wenn ein kleiner Lautsprecher für den Schreibtisch - bestückt mit einem kleinen Breitbänder – vor das Mikrofon soll.

Zur Erläuterung ein Beispiel: Bild 6.2.1 und Bild 6.2.2 zeigen zwei fiktive Lautsprecherkonstruktionen. Für die Entwicklung der Frequenzweiche der 3 Wege-Box sollte die Messung auch 2 Oktaven unterhalb der Übergangsfrequenz TT/MT – im Beispiel ca. 300 Hz - noch genügend Auflösung haben und das bei einem Messabstand, der die Integration beider Lautsprecher einschließlich der Gehäuseeffekte zulässt (s. Kap. 6.3)

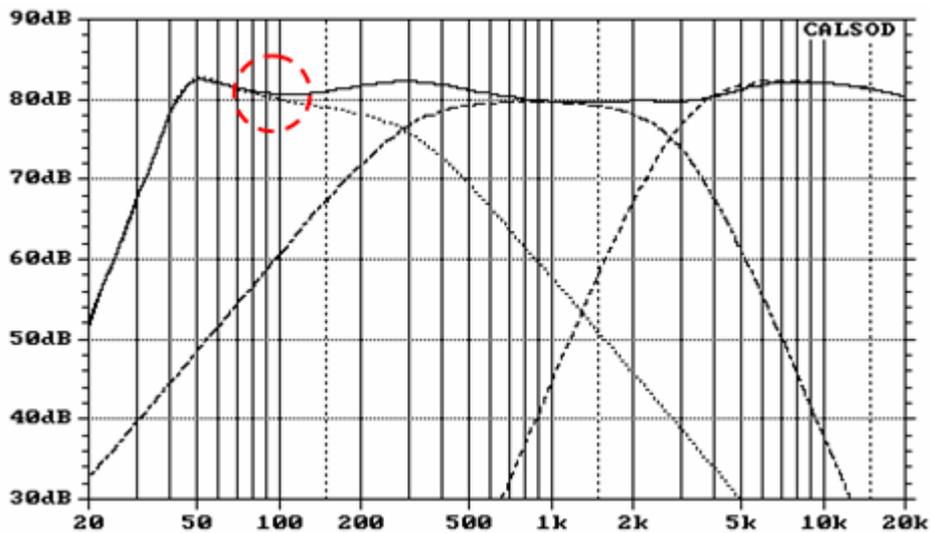


Bild 6.2.1: Simulation, 3 Wege Weiche

Selbst eine 2 Wege Box mit einer Übergangsfrequenz von ca. 2000 Hz verlangt als untere Frequenzgrenze mindestens 500Hz (Bild 6.2.2). Soll der so genannte **Baffle Step** (s. rechtes Teilbild) bei der Weichenentwicklung mit berücksichtigt werden, so muss – je nach Schallwandbreite – die Messung 200 bis 150 Hz mit hinreichender Auflösung wiedergeben.

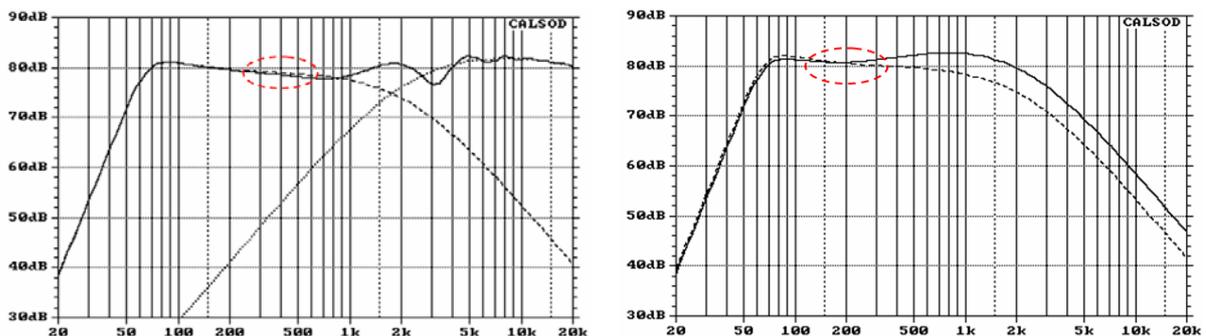


Bild 6.2.2: Simulation, 2 Wege Weiche (links), TT mit /ohne Baffle Step (rechts)

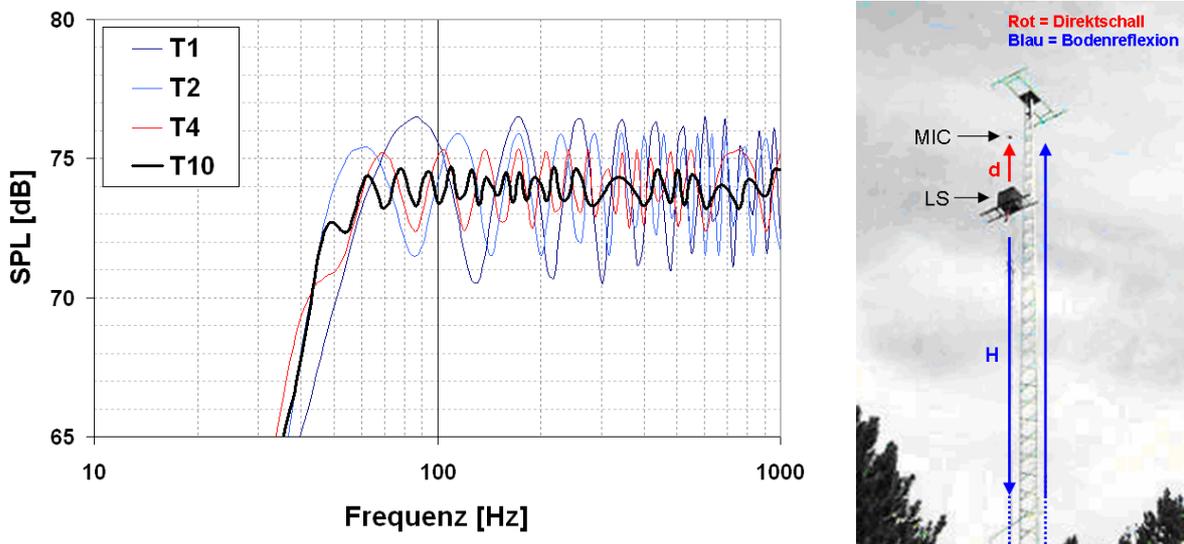
Besteht weiterhin die Anforderung, dass möglichst alle Raumerückwirkungen wie Reflexionen oder stehende Wellen der Messung ferngehalten werden sollen, so wird die Aufgabe nicht eben einfacher.

Bevor es in die Details geht, schauen wir uns zunächst mal an, was für die Lösung derartiger Messaufgaben im „Werkzeugkoffer“ ist. In der Literatur [2, 22-26] werden folgende Möglichkeiten diskutiert: Freifeldmessung, Messung im reflexionsarmen Raum, Ground-Plane-Messung, Halbraum-Messung, gefensterter Messung, Nahfeldmessung.

### FREIFELDMESSUNG

Wie zutreffend durch den Namen beschrieben, ist die erste und älteste Möglichkeit die Messung in der freien Natur. Der Lautsprecher und das Mikrofon werden soweit von allen reflektierenden Flächen angebracht, dass es praktische keine Rückwirkung von reflektierenden Flächen – in der Regel der Boden - mehr gibt. Dafür ist ein Kran, ein Turm oder ähnliches erforderlich. Bild 6.2.3, rechtes Teilbild zeigt ein Beispiel für den praktischen Messaufbau [22]. Der Lautsprecher und das Mikrofon werden mittels eines „Aufzugs“ an einem Gittermast in die Messposition befördert.

Der reflektierte Schall trifft nach  $((2 \cdot H + d) / 344)$  Sekunden am Mikrofon ein. Das linke Teilbild zeigt eine Simulation, in der die Bodenreflexion dem Direktschall bei 1, 2, 4 und 10 Meter Höhe überlagert ist. Es wird deutlich, dass bei schallhartem Boden (Worst Case) für eine halbwegs störungsfreie Messung die Turmhöhe im Bereich von 10 Metern liegen sollte.



**Bild 6.2.3:** Freifeldmessung, Simulation Bodenabstand (links), Messaufbau [aus 22] (rechts)

Neben dem Vorteil theoretisch ideale Messbedingungen schaffen zu können, ist ein Aspekt bei der Freifeldmessung natürlich immer zu beachten: Das Wetter! Nicht nur Schnee und Regen, auch der Wind und andere Störgeräusche machen einem das Leben schwer und damit Messungen nur in bevorzugten Klimazonen halbwegs planbar.

Dennoch, wer einen ruhigen Garten sein Eigen nennt, sollte die Freifeldmessung nicht aus dem Auge verlieren. Auch wenn der eigene „Gittermast“ nur 3 oder 4 Meter hoch ist, in Verbindung mit einer „gefensterten“ Messung sind dann 40 - 50 Hz als unterer Grenzfrequenz realisierbar (siehe Kap. 6.2).

## REFLEXIONSARMER RAUM

Wenn Freifeldmessungen unabhängig vom Wetter und Störschall durchgeführt werden sollen, dann hilft nur ein reflexionsarmer Raum (RAR), mitunter auch schalltoter oder echofreier Raum



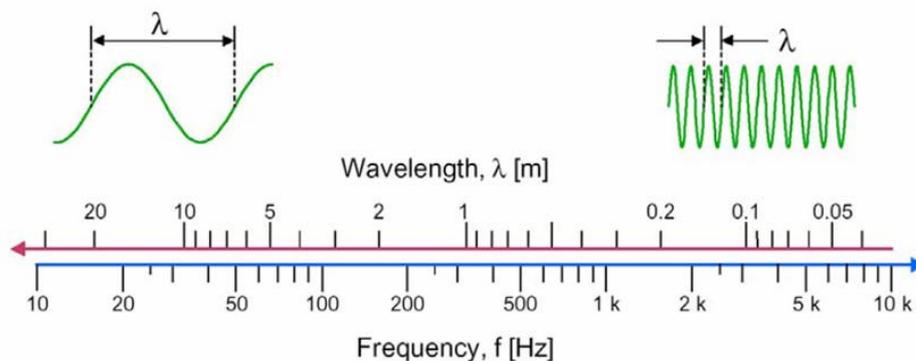
genannt. In einem RAR sind alle Begrenzungsflächen mit Schall absorbierendem Material - meist Glas- oder Mineralwolle - ausgekleidet. Um eine möglichst vollständige Schallabsorption im gesamten Nutzbereich zu erreichen, wird die Auskleidung häufig in Keilform ausgeführt (s. Bild 6.2.4).

RAR können als Vollraum oder als Halbraum ausgeführt werden. In einem Vollraum sind alle Grenzflächen mit absorbierendem Material versehen. Die Zugänglichkeit des Raumes wird durch einen eingezogenen Gitterboden oder ein Spanndrahtgeflecht gewährleistet (s. Bild links). In einem Halbraum bleibt der Boden schallhart und ist somit ohne Einschränkungen zugänglich.

Hochwertige RAR sind "Raum in Raum" Konstruktionen. Der innen befindliche Nutzraum ist durch Federn völlig vom übrigen Baukörper entkoppelt. Aufgrund dieser Bauweise wird die Übertragung des Luft- und Körperschalls stark reduziert, was einen geringen Grundgeräuschpegel gewährleistet

**Bild 6.2.4:** RAR Visaton [24]

Durch das Fehlen von Reflexionen entspricht das Schallfeld eines RAR dem im Freien in großem Abstand über dem Boden (s. auch Freifeldmessung). Das von einer Schallquelle ausgesandte Signal bleibt vom Raum unbeeinflusst.

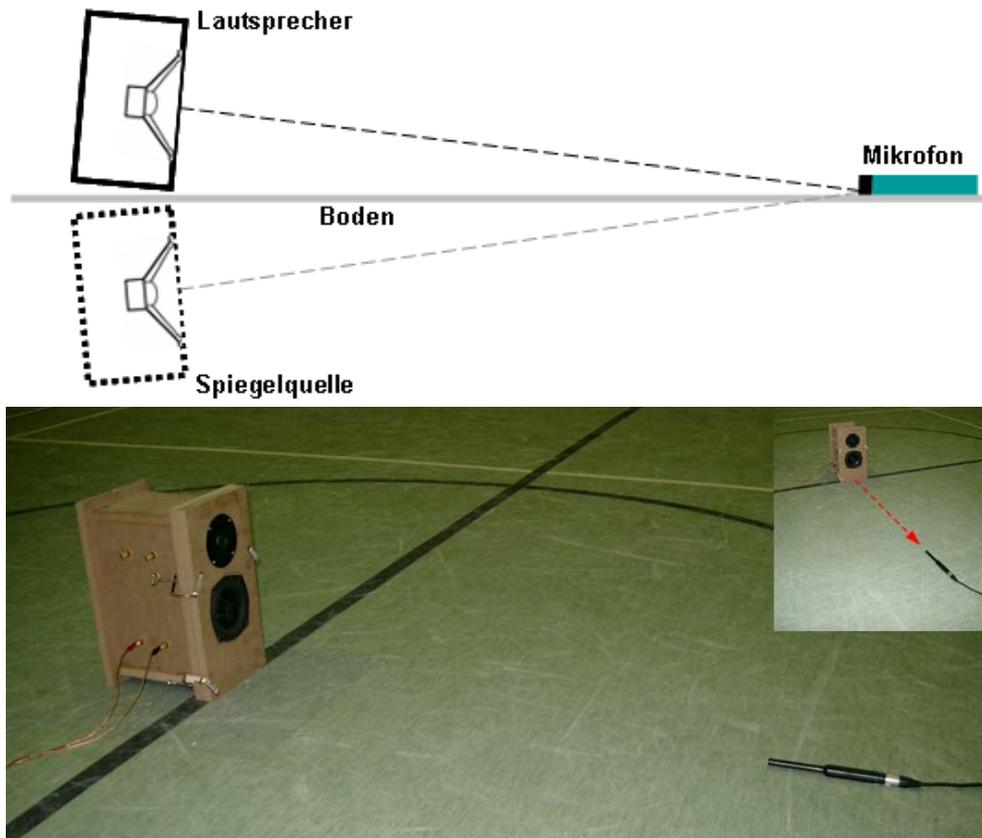


**Bild 6.2.5:** Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge

Die untere Grenzfrequenz eines RAR wird durch die Abmessungen des Raumes und der Auskleidung bestimmt. Übliche Grenzfrequenzen liegen im Bereich von 70 Hz – 125 Hz und setzen ein Brutto-Raumvolumen von 350 m<sup>3</sup> bis 60 m<sup>3</sup> voraus. Die Länge der Absorptionskeile sollte ca. 1/4 der Wellenlänge der unteren Grenzfrequenz betragen (s. Bild 6.2.5). Um auch die oben genannten üblichen Grenzfrequenzen noch wirksam absorbieren zu können, sind somit Keillängen von ca. einem Meter erforderlich.

## GROUND PLANE MESSUNG

Ein interessanter Aspekt der Ground-Plane-Messung – im Folgenden kurz GPM genannt- ist, dass weder Turm noch Raum, sondern nur eine große reflektierende Fläche notwendig ist. Ein asphaltierter Parkplatz, ein Spielplatz oder auch eine große Turnhalle sind – natürlich außerhalb der normalen Nutzungszeit - geeignete Objekte.



**Bild 6.2.6:** Ground Plane Messung

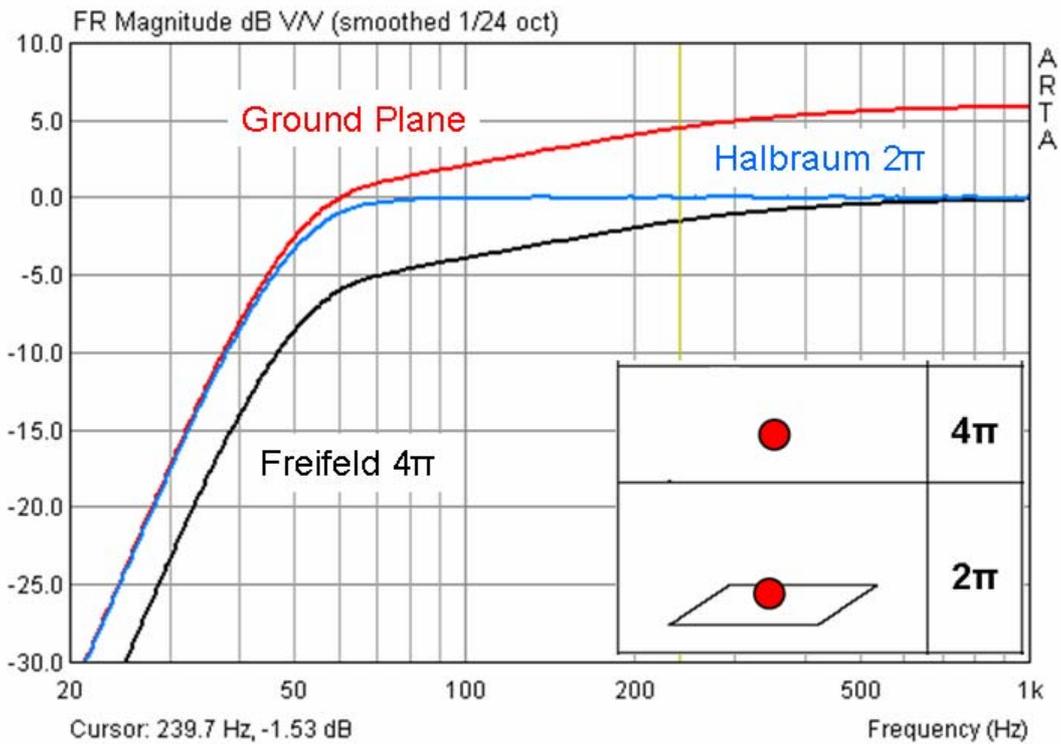
Es sollten keinerlei reflektierende Hindernisse im Umkreis des Messortes sein. Die Entfernung von der Quelle (Lautsprecher) bis zum nächsten Hindernis sollte mindestens das Fünffache des Messabstandes betragen. So wird sichergestellt, dass der Pegel der Reflexion mindestens um 20 dB reduziert ist und damit weniger als 1 dB zum Gesamtschalldruck beiträgt.

Der Lautsprecher sollte auf den Boden stehen und so geneigt sein, dass die Lautsprecherachse direkt auf das Messmikrofon zeigt. Das Mikrofon muss direkt auf dem Boden liegen (Bild 6.2.6). Der Anstellwinkel  $\alpha$  berechnet sich wie folgt :

$$\alpha = \arctan (H/d) \text{ mit}$$

**H** = Abstand Boden - Membranmitte  
**d** = Distanz Mikrofon - Lautsprecher

Der Messabstand muss groß genug sein, um sicher im Fernfeld zu sein. In der Regel ist das gewährleistet, wenn der Abstand größer ist, als das dreifache der maximalen Abmessung der Quelle, wobei hier Quelle und Spiegelquelle einbezogen werden müssen. Grundsätzlich muss bei der GPM beachtet werden, dass zwei Quellen entlang der Messachse gespiegelt sind. Die Schallwand ist daher doppelt so groß und auch die Form ist anders, als die eines einzelnen Systems. Bei der GPM sollten Gehäuseeffekte also immer sorgfältig beachtet werden. Da dies im Wesentlichen Auswirkungen in vertikaler Richtung hat, können Polar-Messungen oder auch Verzerrungsmessungen wie gewohnt durchgeführt werden.



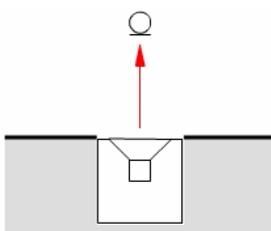
**Bild 6.2.7:** GPM, Freifeld- und Halbraummessung bei 1 Meter

Für die Messung kleiner Lautsprecher oder Lautsprecher Chassis hat sich in der Praxis ein Messabstand von 1 Meter als Standard durchgesetzt. Es ist zu beachten, dass die GPM über die Spiegelung der Quelle dem Pegel auf Achse 6 dB hinzufügt. Es kann daher zweckmäßig sein, bei der GPM den Messabstand auf 2 Meter zu erhöhen, denn durch die Abstandsverdopplung reduziert sich der Pegel wieder um 6 dB.

Sofern mit der gleichen Eingangsleistung angeregt wird, hat eine GPM bei 2 Meter Messabstand die gleiche Empfindlichkeit im Mittel- und Hochtonbereich wie eine  $2\pi$  oder  $4\pi$ -Messung bei 1 Meter. Bei niedrigen Frequenzen, ist der Pegel identisch einer  $4\pi$  Messung. Dann folgt eine Region, in der sich die Abstrahlcharakteristik der Quelle - in Abhängigkeit von der Größe der Schallwand und dessen Spiegelbild - langsam von  $4\pi$  zu  $2\pi$  verändert.

### HALBRAUM

Bei einer Halbraummessung ( $2\pi$ ) dient entweder der Fußboden oder eine Wand als „unendliche Schallwand“ für den zu messenden Lautsprecher. Im freien Gelände kann eine Grube ausgehoben



werden, im Gebäude stellt die bündige Versenkung des Lautsprechers im Boden oder der Wand eine nicht unwesentliche bauliche Maßnahme dar (siehe z.B. [www.hobbyhifi.de](http://www.hobbyhifi.de), Messraum). Für Messungen in freier Natur gelten im Wesentlichen die Aussagen der Freifeldmessung (s. hierzu weiter oben sowie Bild 6.2.7). Bei Messungen im Raum sind die Ausführungen aus Kapitel 6.2.0 zu beachten.

## 6.2.0 Messen unter Wohnraumbedingungen

Keiner von uns verfügt über einen reflexionsarmen Raum, wir müssen uns wohl oder übel mit Wohnzimmern und Kellerräumen - oder im Sommer und bei Windstille mit Gärten oder Parkplätzen - begnügen.

Was ist nun bei Messungen in „beengten Verhältnissen“ zu beachten und wie kann ARTA dabei unterstützen? Wie unterscheiden sich die Messräume der Profis von normalen Wohnzimmern?

Zur partiellen Beantwortung dieser Frage werden in Bild 6.2.2 zwei unterschiedliche Messräume verglichen. Das Testobjekt und die Messbedingungen wurden im Rahmen eines Ringversuches (<http://www.visaton.de/vb/>, Stichwort Ringversuch) eindeutig definiert und bei beiden Messungen konstant gehalten. Der einzige Unterschied zwischen den Messbedingungen bestand im Messraum, dokumentiert durch die untere Bildreihe in Bild 6.2.2 mittels der Nachhallzeitverläufe. Während der reflexionsarme Messraum deutlich unter  $RT = 0,15$  s liegt, bewegt sich der Wohnraum im Mittel bei  $RT = 0,35$ s.

Der Messabstand betrug 30 cm, das Testobjekt, ein 8cm Breitbandlautsprecher von Visaton, war bündig auf einer kleinen Schallwand montiert. Das Chassis und das Messmikrofon befanden sich in etwa auf halber Raumhöhe.

In der oberen Bildreihe ist der ungeglättete Frequenzgang zu sehen. Deutlich machen sich die Reflexionen des Wohnraumes im rechten Frequenzschrieb bemerkbar. Die zweite Bildreihe von oben zeigt die mit 1/24 Oktave geglätteten Frequenzgänge (schwarze Kurve). Wie deutlich zu sehen ist, bleibt die Rauigkeit im Frequenzgang erhalten. Erst durch Setzen eines Fensters (siehe Bild 6.2.1) werden die Raumreflexionen ausgeblendet (rote Kurve).

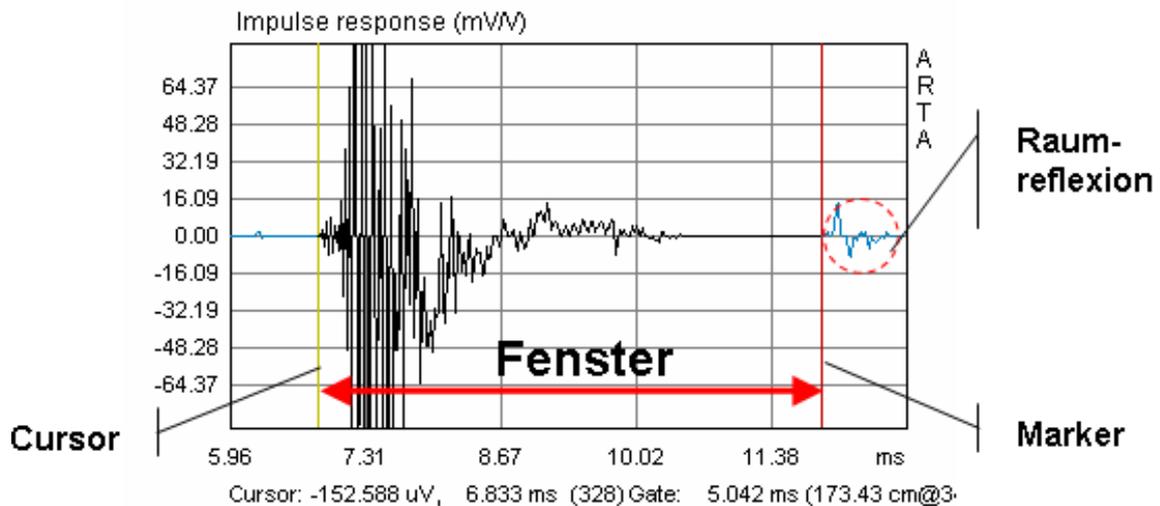
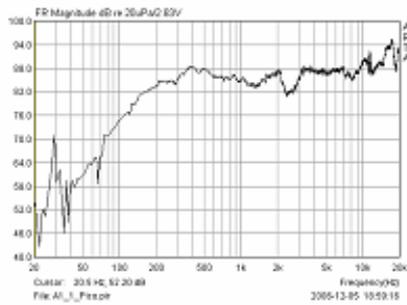


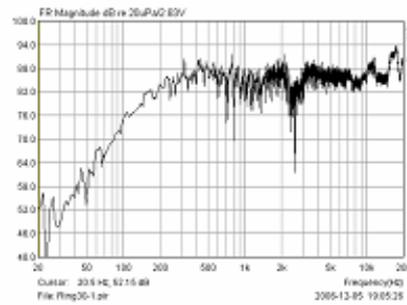
Bild 6.2.1: Ausblenden der Raumreflexionen durch Setzen eines Fensters

Auch im periodenbasierten Wasserfall (dritte Bildzeile von oben) ist der Wohnraum deutlich zu sehen. Die „Rauhigkeiten“ im Frequenzgang zwischen 200 und 2000 Hz machen sich hier durch langsames Abklingen der Raumenergie bemerkbar. Andeutungsweise ist dieser Vorgang auch im normalen Wasserfalldiagramm (vierte Bildreihe von oben) sichtbar. Zwischenfazit: Die Profis haben es einfacher beim Messen den Lautsprecher vom Raum zu trennen.

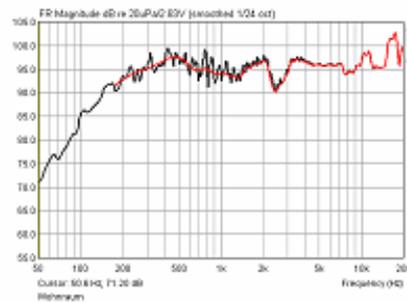
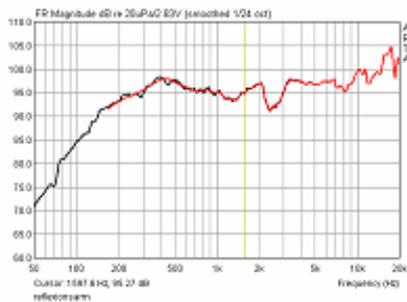
**Reflexionsarmer Messraum**



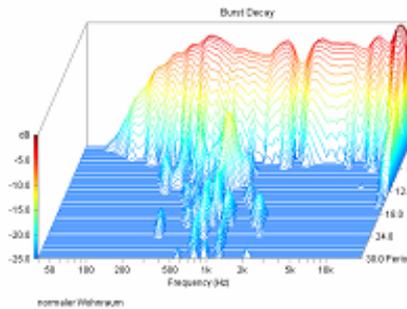
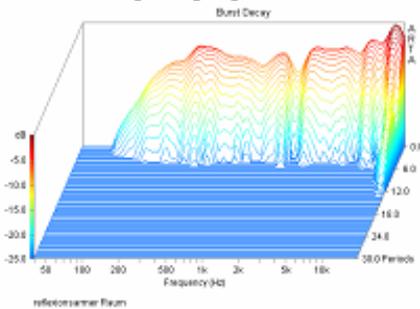
**Normaler Wohnraum**



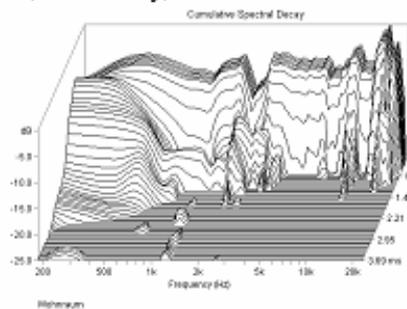
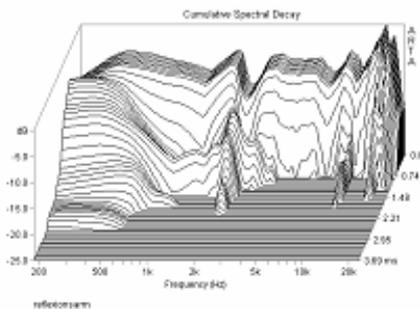
**Frequenzgang ohne Glättung (unsmoothed FR)**



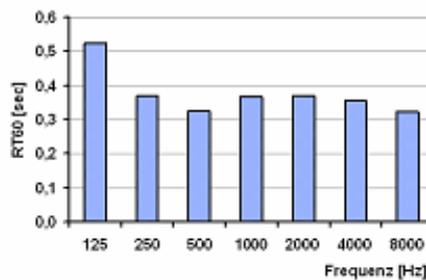
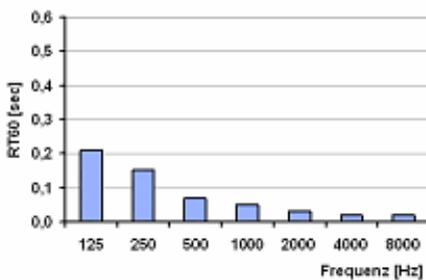
**Frequenzgang mit 1/24 Okt. Glättung (schwarz) und zusätzlichem Gate (rot)**



**Periodenbasierter Wasserfall (Burst Decay)**



**Normaler Wasserfall (CSD)**



**Nachhallzeiten der Messräume**

Bild 6.2.2a: Vergleich zweier Messräume (siehe auch Bild 6.2.2b)

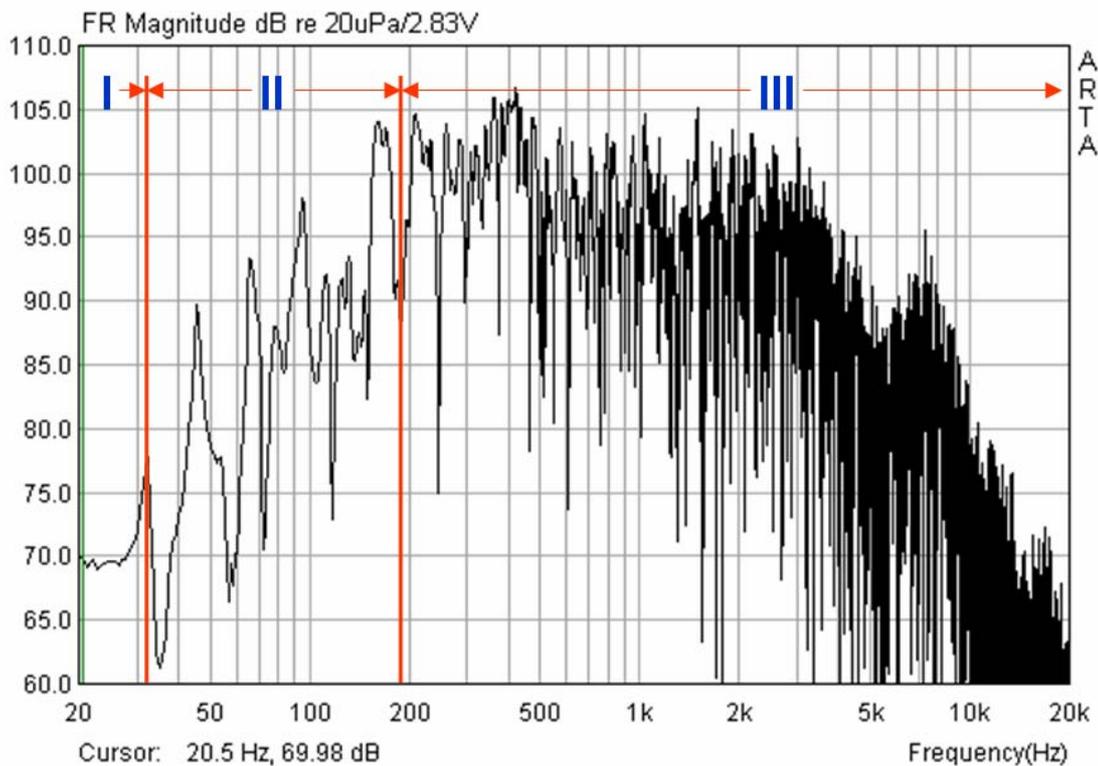


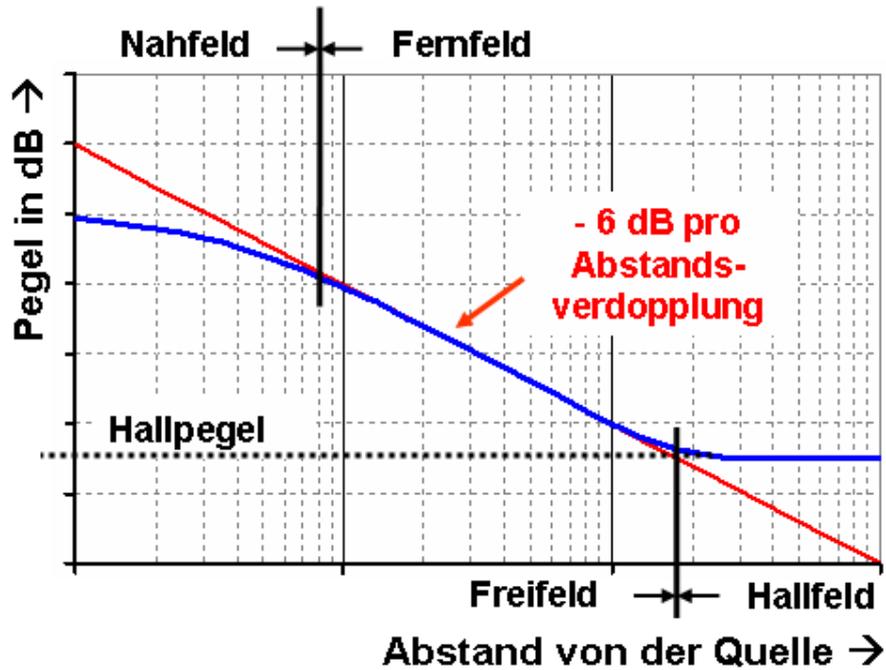
Bild 6.2.2a: Charakterisierung eines Messraumes (L=4,95, B=3,85, H=2,25; RT=0,38s)

- Bereich I** Druckbereich  
 $f = c / (2 \cdot L)$  mit  $c = 344$  m/s;  $L =$  Länge Raum
- Bereich II** Resonanzbereich (Raummoden)  
 $f \leq 2000 \cdot \sqrt{V} / RT$  mit  $V =$  Raumvolumen;  $RT =$  Nachhallzeit
- Bereich III** Statistischer Bereich (Diffus- oder Hallfeld)  
 $f \geq 2000 \cdot \sqrt{V} / RT$  mit  $V =$  Raumvolumen;  $RT =$  Nachhallzeit

Dennoch geht es auch ohne reflexionsarmen Messraum. Struck und Temme [3] beschreiben, wie man Freifeldmessungen in normalen Räumen „simulieren“ kann. Dazu werden eine Nahfeldmessung und eine Fernfeldmessung zusammengesetzt. Die Definition der Begriffe Nah-, Fern- und Freifeld kann man recht gut aus Bild 6.2.3 ableiten.

Nah- und Fernfeld beziehen sich auf den Abstand zur Schallquelle, Frei- (oder auch Direkt-) und Diffusfeld dagegen auf die Umgebungsbedingungen der Schallquelle.

Das Frei- und das Diffusfeld sind von der Art der Schallquelle unabhängig; sie werden durch die akustischen Eigenschaften des Raumes im Umfeld der Schallquelle geprägt. Breitet sich der Schall nach allen Seiten von der Schallquelle ungehindert aus, d.h. es gibt im betrachteten Schallfeld keine von Hindernissen reflektierten oder gestreuten Schallwellen, so spricht man von Freifeldbedingungen.



- Freifeld Nur Direktschall ohne Reflexionen
- Nahfeld Messabstand < abgestrahlte Wellenlänge
- Fernfeld Abgestrahlte Wellenlänge > Abmessung Quelle  
Schalldruck nimmt mit 6 dB pro Abstandsverdopplung ab

Bild 6.2.3: Definition von Schallfeldern

Befindet sich die Schallquelle in einem Raum, so werden die abgestrahlten Schallwellen von Raumbegrenzungsflächen oder Einrichtungsgegenständen reflektiert. Durch Vielfachreflexionen erfolgt eine völlige Durchmischung der Schallwellen, d.h. an jedem Raumpunkt ist der Schalleinfall aus jeder Raumrichtung gleich wahrscheinlich. Die örtliche Schallenergie-dichte ist an allen Punkten in diesem Durchmischungsfeld gleich groß, sofern das Mikrophon hinreichend weit von der Schallquelle und von allen Reflexionsflächen entfernt ist. Man spricht dann vom diffusen Schallfeld.

Bei der Schallabstrahlung in einem Raum überwiegt in Quellennähe das Freifeld, in einem hinreichend großen Abstand von der Quelle das Diffusfeld. Als Grenze zwischen diesen beiden

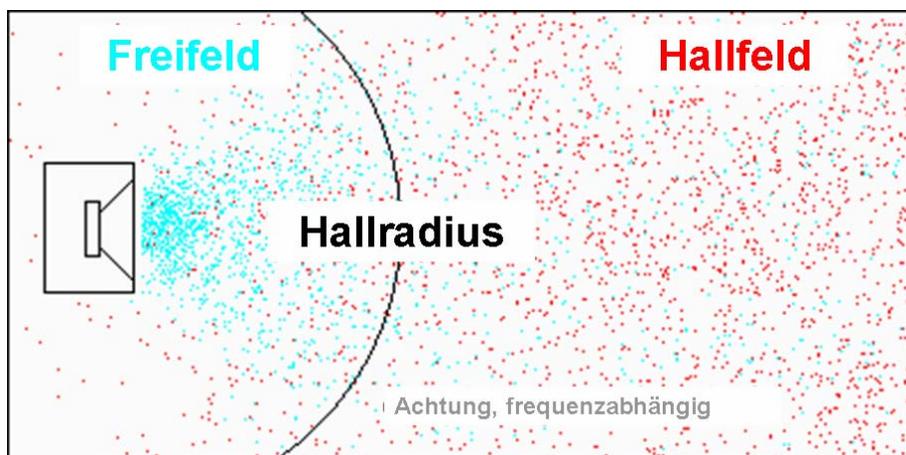


Bild 6.2.4: Definition von Schallfeldern, Hallradius

Schallfeldarten wird der Abstand von der Quelle definiert, bei dem die Schallanteile beider Felder gleich groß sind, dem sog. Hallradius  $R_H$

$$R_H = 0,057 \sqrt{(V/RT_{60})} \quad \text{mit } V = \text{Raumvolumen [m}^3\text{]} \text{ und } RT_{60} = \text{Nachhallzeit [sec]}$$

Ist der Abstand von der Schallquelle kleiner als der Hallradius, dann geht das Schallfeld im Raum in das Freifeld der Quelle über.

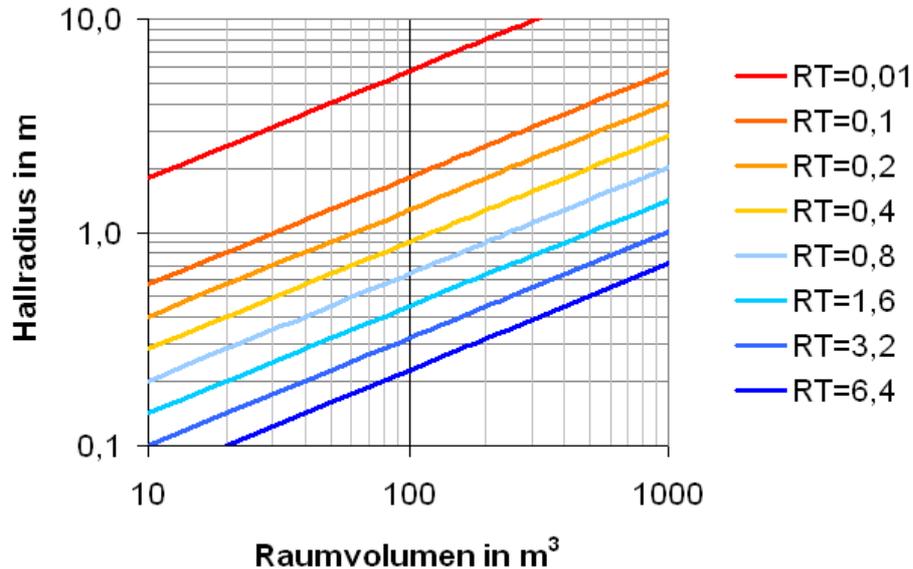


Bild 6.2.5: Ermittlung des Hallradius

**Beispiel:** Für einen Raum mit einem Volumen von 50 m<sup>3</sup> (5 x 4 x 2,5m) und einer Nachhallzeit von 0,4 sec, beträgt der Hallradius ca. 0,64 Meter. Soll der Messabstand von 1 Meter sicher im Freifeld liegen, so wäre in einem Raum gleicher Größe eine Nachhallzeit von deutlich unter 0,2 sec zu realisieren.

*Anmerkung:* Zur Messung der Nachhallzeit siehe [Abschnitt 6.2.1](#).

Was können wir mit diesen Informationen anfangen? Nun, hieraus können wir ableiten, wann wir uns in unserem Messraum überwiegend im Freifeld bewegen und sie ermöglichen uns eine grobe Einschätzung der zu erwartenden Messqualität.

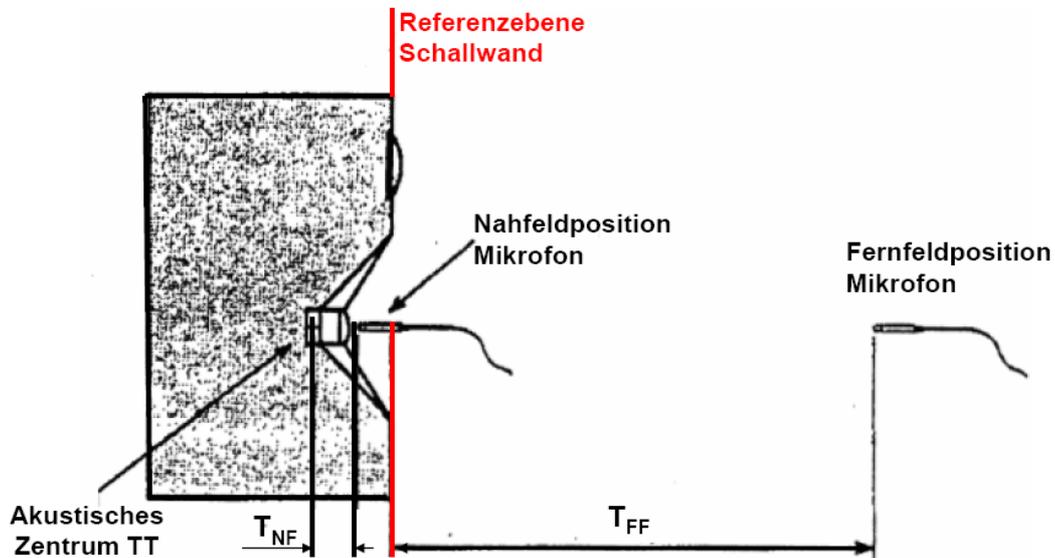


Bild 6.2.6: Positionierung des Mikrofons im Nah-, Fernfeld \*) s. Anmerkung 1

**Hinweise zum Nahfeld:**

- Mikrophon so nah wie möglich und zentrisch vor Membran
- Messabstand  $< 0,11 \cdot$  Abmessung der Quelle  $\rightarrow$  Fehler  $< 1$  dB
- obere Frequenzgrenze für Nahfeldmessungen ergibt sich aus Bild 6.3a

Bezüglich Nahfeldmessungen müssen zwei Dinge beachtet werden. Zum Einen, dass das Mikrophon nicht übersteuert wird und zum Anderen, dass der Gültigkeitsbereich von Nahfeldmessungen zu höheren Frequenzen begrenzt ist.

Bild 6.2.7 ist die obere Frequenzgrenze für Nahfeldmessungen zu entnehmen. Dabei ist als größte Abmessung der Quelle einzusetzen. Daraus kann abgeleitet werden, dass Nahfeldmessungen ab ca. 300Hz an Vertrauenswürdigkeit verlieren.

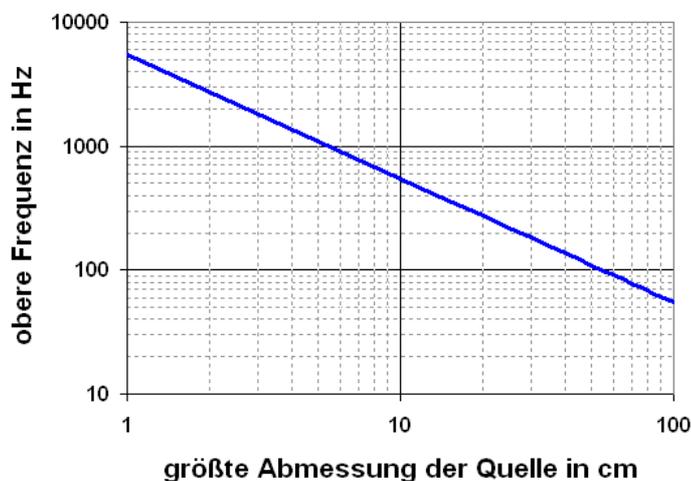


Bild 6.2.7: Obere Frequenzgrenze für Nahfeldmessungen \*) s. Anmerkung 2

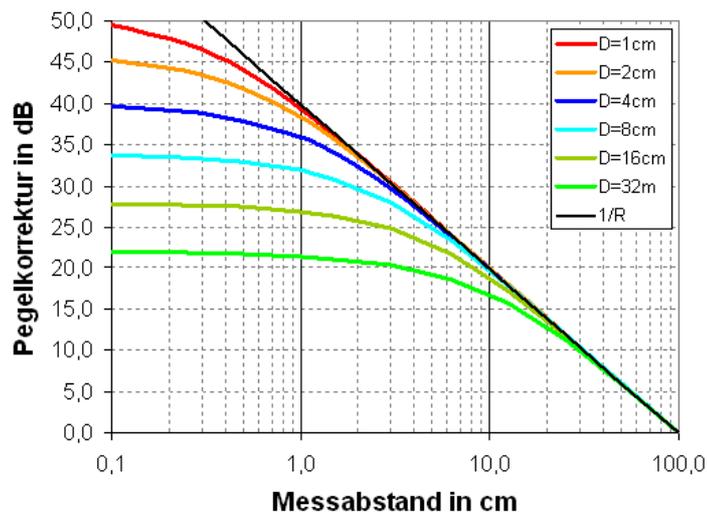


Bild 6.2.8: Abschätzung der Pegelkorrektur für Nahfeldmessungen

Bild 6.2.8 ermöglicht eine schnelle Abschätzung, ob bei der Nahfeldmessung das Mikrofon übersteuert werden könnte. Wird der zu messende Lautsprecher z.B. mit 86 dB/W/m und einem effektiven Membrandurchmesser von 8 cm angegeben, so haben wir in 1 cm Abstand von ca. 86 dB + 32 dB = 118 dB bei einem Watt Anregungspegel auszugehen und liegen damit schon im Grenzschall-druckbereich üblicher Elektret-Messmikrofone.

**Anmerkung 1:** In Bild 6.2.6 wird auf das so genannte „akustische Zentrum“ des Lautsprechers hingewiesen. Das bedeutet, dass die gewählte Bezugsebene und der Schallentstehungsort nicht zwangsläufig übereinstimmen. Deutlich wird dies bei der Auswertung von Impulsantworten. Der mit dem Zollstock gemessene Abstand und der aus der Laufzeit des Schalls ermittelte Abstand unterscheiden sich oft um einige cm (zur Ermittlung des Abstandes aus der Schalllaufzeit siehe auch Abschnitt 5.3.3, Punkt 2). Die Auflösung dieser Methode wird durch die Samplingrate der Soundkarte bestimmt (48kHz = 7,2mm, 96kHz = 3,58mm)

**Anmerkung 2:** Unter Verwendung der größten Abmessung der Quelle (Raumdiagonale des Gehäuses) ergeben sich für Wohnraumbedingungen nicht realisierbare Messabstände. Als Kompromiss können entweder der 3fache Durchmesser des größten Lautsprechers, oder für Messungen im Hochtonbereich, mindestens der 6fache Abstand zur nächsten Gehäusekante genommen werden.

### Hinweise zum Fernfeld:

- Messabstand  $d > 3 \cdot$  größte Abmessung der Quelle
- Die untere Frequenzgrenze  $f_U$  hängt vom maximal möglichen Zeitfenster (Gate) des Raumes ab (s. hierzu weiter unten)

Grundsätzlich müssen wir bei Fernfeldmessungen darauf achten, dass sowohl Quelle als auch Mikrofon so weit wie möglich von reflektierenden Flächen aufgestellt werden. In normalen Räumen ist in der Regel die Deckenhöhe mit ca. 2,50 m die limitierende Abmessung (Boden- bzw. Deckenreflexion).

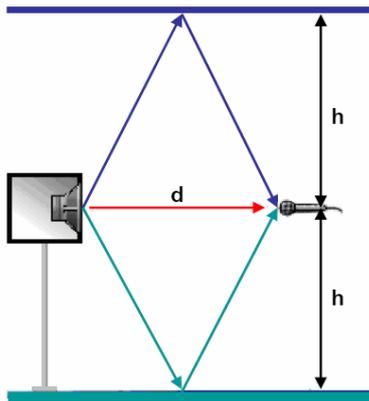


Bild 6.2.8: Messanordnung

Laufweg der Boden- bzw. Deckenreflexion:

$$D_{\text{Boden/Decke}} = 2 * \sqrt{((d/2)^2 + h^2)} \text{ [m]}$$

Differenz zwischen Direktschall und reflektiertem Schall:

$$\Delta = D_{\text{Boden/Decke}} - d \text{ [m]}$$

Laufzeitunterschied:

$$T = \Delta / c \text{ [s]} \text{ mit } c = 344 \text{ m/s}$$

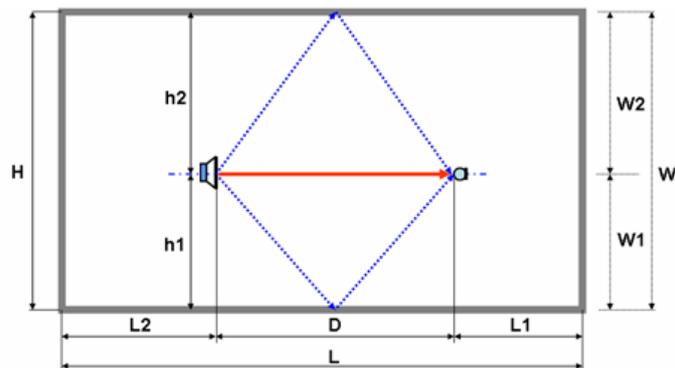
Untere Frequenzgrenze:

$$f_U = 1/T \text{ [Hz]}$$

Um Reflexionen im Impulsdiagramm leichter erkennen zu können, sollte man vorher seinen Messraum analysieren (s. Bild 6.2.8). Dazu in Bild 6.2.9 ein kleines Rechenbeispiel.

**Berechnet**

L Länge	4,90 m	
W Breite	3,90 m	
H Höhe	2,20 m	
L2	1,57 m	
L1	2,80 m	
W2	2,23 m	
W1	1,67 m	
D	0,53 m	
h1	1,37 m	
h2	0,83 m	
t <sub>Direkt</sub>	1,5407 ms	0,53 m
t <sub>Boden</sub>	8,1128 ms	2,79 m
t <sub>Decke</sub>	5,0656 ms	1,74 m
t <sub>Links</sub>	9,8308 ms	3,38 m
t <sub>Rechts</sub>	13,0563 ms	4,49 m
t <sub>RW Rückwand</sub>	17,8198 ms	6,13 m
t <sub>FW Frontwand</sub>	10,6686 ms	3,67 m



**Gemessen**

t1 = t <sub>Direkt</sub>	1,583 ms	0,54 m
t2 = t <sub>Decke</sub>	5,313 ms	1,83 m
t3 = t <sub>Boden</sub>	8,104 ms	2,79 m
t4 = t <sub>Links</sub>	9,688 ms	3,33 m
t5 = t <sub>Frontwand</sub>	10,983 ms	3,78 m
t6 = t <sub>Rechts</sub>	13,104 ms	4,51 m
t7 = t <sub>Rückwand</sub>	18,063 ms	6,21 m

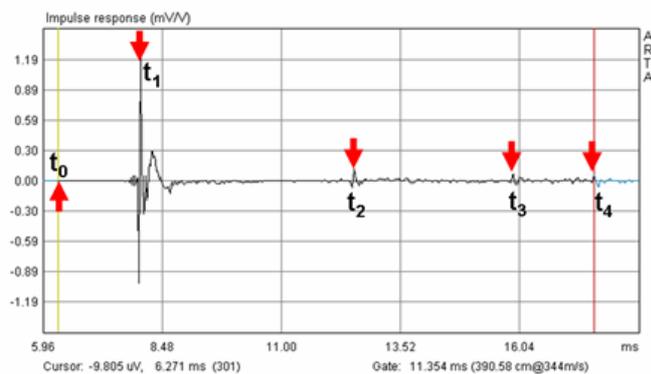


Bild 6.2.9: Analyse des Messraumes

Durch die Rechnung im oberen Teil des Bildes lassen sich die wesentlichen Reflexionen in der Impulsantwort recht gut identifizieren. Das ist nicht immer so einfach, denn je nach Beschaffenheit des Raumes (Anteil und Verteilung stark reflektierender oder absorbierender Flächen), sind die Reflexionen mehr oder minder ausgeprägt.

Jetzt noch ein zweites Beispiel, welches sich auf Bild 6.2.10 bezieht. Bei einer Raumhöhe von  $H=2,20$  m, einem Messabstand  $D=0,53$  m und einer Messhöhe  $h_1$  von  $1,37$  m ergibt sich ein Schalllaufweg  $D_{\text{Boden/Decke}}$  für die Boden- bzw. Deckenreflexion von:

$$D_{\text{Boden}} = 2 * ((0,53*0,5)^2 + 1,37^2)^{0,5} = 2,79 \text{ m}$$

also  $2,26$  m länger als der Weg des Direktschalls (Messabstand). Das entspricht einer Laufzeit von:

$$T = 2,26 / 344 = 0,0065697 = 6,5697 \text{ ms}$$

und einer unteren Frequenzgrenze von:

$$f_U = 1 / 0,0065697 = 152,2 \text{ Hz}$$

In diesem Raum und beim genannten Messabstand können wir unseren Messungen im Fernfeld erst ab  $152$  Hz aufwärts vertrauen.

Andere Messabstände für Messhöhe = halbe Raumhöhe sind in folgender Tabelle berechnet.

<b>d [m]</b>	<b>0,030</b>	<b>0,060</b>	<b>0,120</b>	<b>0,240</b>	<b>0,480</b>	<b>0,960</b>
<b>h [m]</b>	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100
<b>D Boden / Decke [m]</b>	2,200	2,201	2,203	2,213	2,252	2,400
<b>Delta [m]</b>	2,170	2,141	2,083	1,973	1,772	1,440
<b>T [ms]</b>	6,309	6,223	6,056	5,736	5,150	4,187
<b>fu [Hz]</b>	158,5	160,7	165,1	174,3	194,2	238,8

Schauen wir uns nun in den nächsten Bildern an, wie sich der Frequenzgang mit zunehmendem Messabstand im unteren Frequenzbereich verändert.

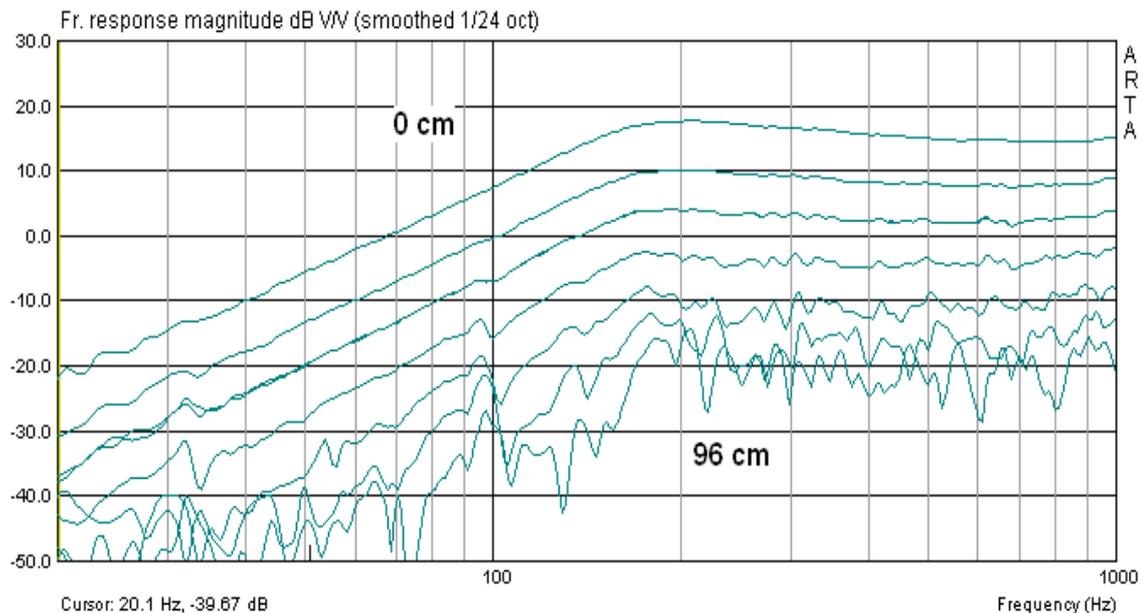


Bild 6.2.10: Übergang Nahfeld → Fernfeld (0, 3, 6, 12, 24, 48, 96 cm Messabstand)

Ab  $6$  cm, jedoch spätestens bei  $12$  cm Messabstand sind erste Raumeinflüsse zu erkennen.

Gemäß den oben gegebenen Hinweisen soll bei einem Messabstand  $< 0,11 * \text{Abmessung der Schallquelle}$  der Fehler kleiner als  $1$  dB sein. Die größte Abmessung der Schallquelle im oben gezeigten Beispiel (FRS 8 in  $2,0$  Liter CB) beträgt ca.  $26$  cm. Danach sollte der Messfehler im Nahfeld bis zu einem Messabstand von ca.  $3$  cm unter  $1$  dB bleiben.

Wie sieht es nun im oberen Frequenzbereich aus? Bild 6.2.11 zeigt die „gefensterten“ Frequenzgänge bei verschiedenen Messabständen.

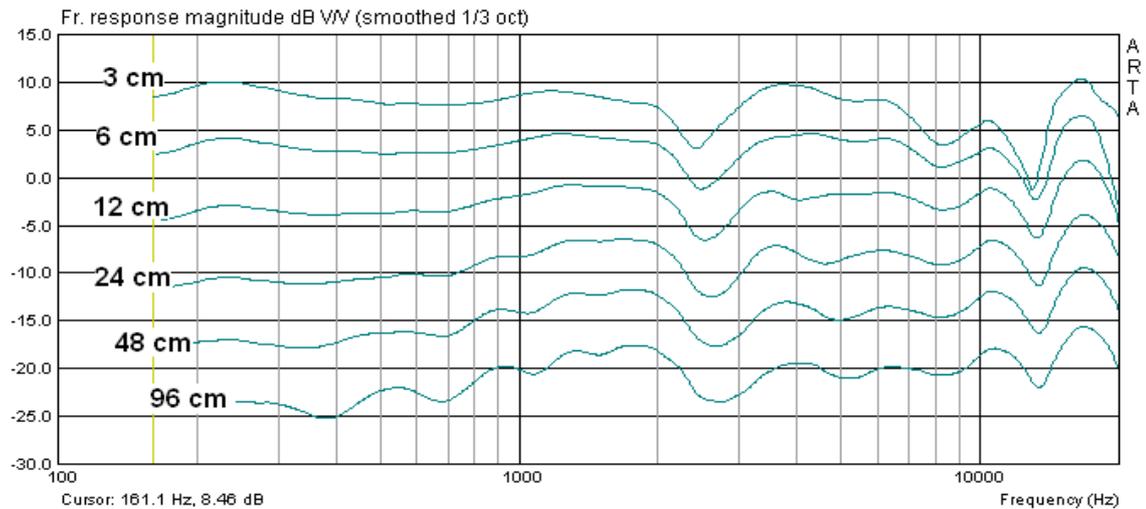


Bild 6.2.11: Übergang Fernfeld → Nahfeld

Spätestens beim Übergang von 24 cm auf 12 cm sind Abweichungen in der Parallelität und der 6 dB-Steigerung pro Abstandshalbierung zu beobachten. Wir kommen also allmählich in das Nahfeld (siehe hierzu auch [9]).

Was passiert nun, wenn wir den Messabstand noch weiter vergrößern. Dazu einige Messungen, die in einer Turnhalle (27 x 15 x 5,5 m) bei ca. 2,80m Messhöhe und verschiedenen Messabständen zwischen 1,35 m bis 3,79 m gemacht wurden. Zur Einschätzung der Eigenschaften des Messraumes wurde auch hier die Nachhallzeit bestimmt. Bild 6.8a zeigt die Ergebnisse: Die mittlere Nachhallzeit liegt bei ca. 3 Sekunden.

Daraus ergibt sich ein Hallradius von ca. 1,40m, was bedeutet, dass bis zu diesem Messabstand der Einfluss des Raumes relativ gering sein sollte. Wir werden sehen!

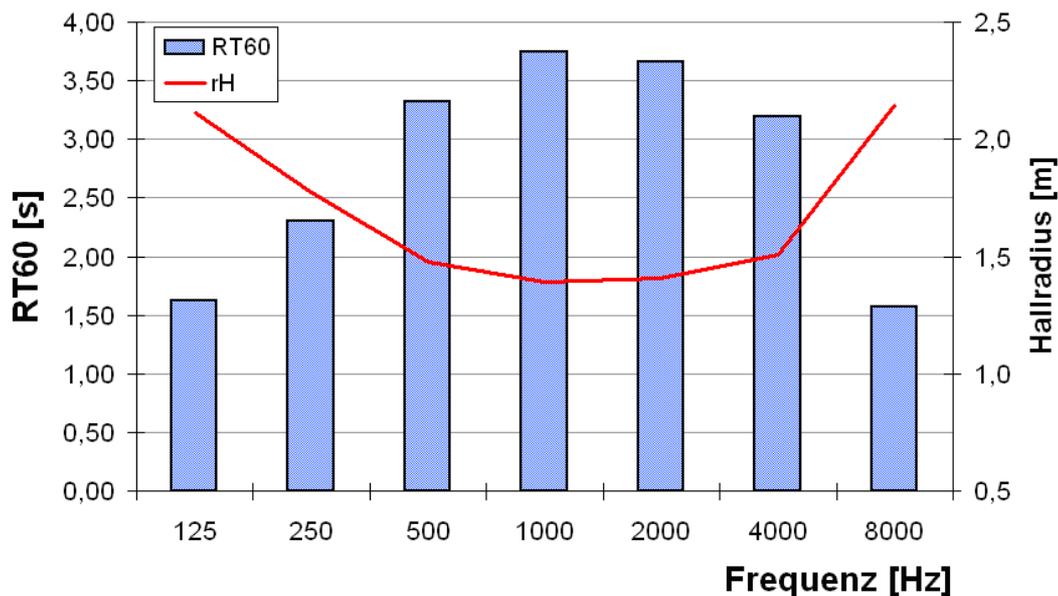


Bild 6.2.12: Nachhallzeit (blau) / Hallradius (rot) einer Turnhalle (27 x 15 x 5,5m)

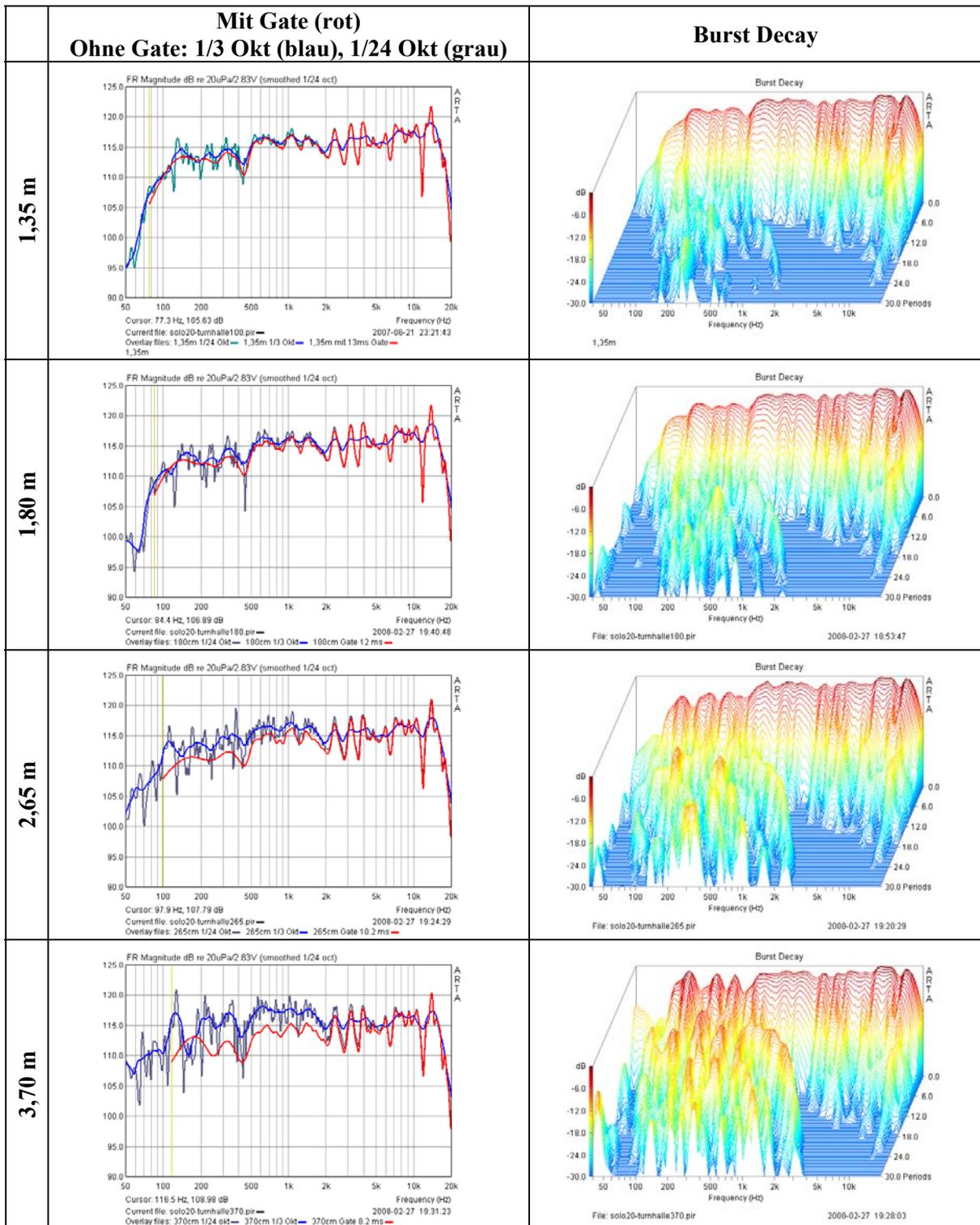


Bild 6.2.13: Messung einer Solo 20 in einer Turnhalle mit unterschiedlichen Mikrofonabständen

In der nachfolgenden Tabelle werden die weiteren Randbedingungen – wie schon aus dem obigen Beispiel bekannt – abgeschätzt. Aus den Messbedingungen ergeben sich Zeitfenster von 8,6 bis 12,8 ms Dauer.

<b>d [m]</b>	<b>1,35</b>	<b>1,80</b>	<b>2,72</b>	<b>3,79</b>
<b>h [m]</b>	2,80	2,80	2,80	2,80
<b>D Boden / Decke [m]</b>	5,76	5,88	6,23	6,76
<b>Delta [m]</b>	4,41	4,08	3,51	2,97
<b>T [ms]</b>	12,82	11,87	10,19	8,64
<b>f<sub>u</sub> [Hz]</b>	78,00	84,27	98,13	115,75

In Bild 6.2.15 sind in der linken Bildreihe die Messungen mit 1/24 Oktave (grau) und mit 1/3 Oktave Glättung (blau) ohne Fenster (Gate) zu sehen. Die rote Linie zeigt die gefensternten Messungen - d.h. unter Ausblendung des Messraumes.

In der rechten Bildreihe ist schön zu sehen, dass mit zunehmendem Messabstand der Einfluss des Raumes größer wird. Der Übergang vom Freifeld zum Hallfeld ist gut nachvollziehbar (Hallradius ca. 1,40 m). Leider wurden keine Messungen bei kürzeren Messabständen gemacht um das zu demonstrieren.

### 6.2.1 Ermittlung der Nachhallzeit – Kenngrößen des Raumes

Wie bereits festgestellt, nimmt der Raum, in dem wir unsere Messungen durchführen, deutlichen Einfluss auf das Ergebnis. Er verändert den Direktschall durch Echo und Nachhall (s. Abschnitt 6) und erschwert dadurch die isolierte messtechnische Beschreibung des Lautsprechers.

Unter den in ISO 3382 gelisteten raumakustischen Parametern ist die Nachhallzeit  $R_{T60}$  eine der wichtigsten Kenngrößen. Sofern die Möglichkeit der Modifikation besteht, wäre für Messräume eine sehr kurze Nachhallzeit anzustreben, Für Hörräume im Heimbereich werden Nachhallzeiten von ca. 0,4 Sekunden empfohlen [5].

ARTA unterstützt die Ermittlung der Nachhallzeit auf Basis der Festlegungen der oben genannten Norm. Bei der Durchführung der Messung wird von der ISO 3382 die Beachtung folgender Randbedingungen gefordert:

- Das Mikrofon soll mindestens 1m von allen reflektierenden Flächen und nicht zu dicht an der Quelle (Lautsprecher) positioniert werden. Der minimale Abstand von der Quelle kann wie folgt berechnet werden:

$$d_{\min} = 2\sqrt{\frac{V}{cT}} \text{ [m]}$$

$V$  = Raumvolumen [m<sup>3</sup>],  
 $c$  = Schallgeschwindigkeit [m/s],  
 $T$  = geschätzte Nachhallzeit [s]

- Die Schallquelle soll eine möglichst kugelförmige Abstrahlcharakteristik haben. Eine hierfür besonders geeignete Quelle ist im nebenstehenden Bild zu sehen.
- Das Mikrofon soll Kugelcharakteristik haben (siehe auch 5.3.1).
- Der **Anregungspegel** sollte 45 dB über dem Störpegel liegen. Unter normalen Wohnraumbedingungen ist demnach ein Anregungspegel > 90dB erforderlich.
- Um den Raum hinreichend anregen zu können, muss das **Anregungssignal** möglichst energiereich sein. Es wird empfohlen, mit einem Sinus-Sweep zu arbeiten. Zur Verbesserung des Rauschabstandes stellen Sie zusätzlich im Menü „**Impulse response measurement**“ unter „**Number of averages**“ 4 Mittelungen ein.



Ferner ist wichtig, dass die Anregungsdauer des Raumes deutlich länger als die geschätzte Nachhallzeit sein sollte.

Eine Abschätzung der Nachhallzeit kann mittels der folgenden Gleichung vorgenommen werden:

$$R_{T60} = 0,163 * V / A$$

mit  $V$  = Raumvolumen in  $m^3$ ,  $A$  = äquivalente Schallabsorptionsfläche in  $m^2 \rightarrow A = \sum a_i * S_i$   
 $a_i$  = Schallabsorptionskoeffizient der Teilflächen,  $S_i$  = Teilfläche in  $m^2$

Material	Einheit	63Hz	125HZ	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
Teppich	m <sup>2</sup>	0,016	0,026	0,044	0,090	0,222	0,375	0,542	0,680
Parkett	m <sup>2</sup>	0,020	0,030	0,040	0,040	0,050	0,050	0,050	0,050
Tapete, Gipskarton	m <sup>2</sup>	0,020	0,020	0,030	0,040	0,050	0,060	0,080	0,080
Gipsputz, Beton, Naturstein	m <sup>2</sup>	0,020	0,020	0,020	0,030	0,040	0,060	0,070	0,080
Tür, Holz lackiert	m <sup>2</sup>	0,150	0,100	0,080	0,060	0,050	0,050	0,050	0,050
Fenster , Isolierglas	m <sup>2</sup>	0,150	0,200	0,150	0,100	0,050	0,030	0,020	0,020
Vorhang	m <sup>2</sup>	0,240	0,410	0,620	0,770	0,820	0,820	0,860	0,950
Regal	m <sup>2</sup>	0,410	0,450	0,480	0,480	0,480	0,510	0,530	0,620
Polsterstuhl	Stück	0,220	0,380	0,470	0,490	0,520	0,530	0,560	0,640
Polstersessel	Stück	0,310	0,440	0,570	0,620	0,700	0,710	0,740	0,780
Sofa, Zweisitzer	Stück	0,620	0,880	1,140	1,240	1,400	1,420	1,480	1,560

Obenstehende Tabelle stellt einige Absorptionskoeffizienten für gängige „Schallschlucker“ im relevanten Frequenzband zur Verfügung. Für die Abschätzung der erforderlichen Anregungszeit ist die Berechnung bei 125 Hz hinreichend.

**BEISPIEL:**

Ein Raum mit den Abmessungen 4,9 x 3,8 x 2,2 m und einem Volumen von 40,96 m<sup>3</sup> hat Flächenanteile mit folgenden Materialien: 18,6 m<sup>2</sup> Teppich, 58 m<sup>2</sup> Beton/Naturstein, 10 m<sup>2</sup> Regal, 1,0 m<sup>2</sup> Fenster, 3,6 m<sup>2</sup> Tür, 2 Polsterstühle. Daraus berechnen sich

$$A = 18,6*0,026 + 58*0,02 + 10*0,45 + 1*0,20 + 3,6*0,10 + 2*0,38 = 7,46 m^2$$

und

$$R_{T60} = 0,163 * 40,96 / 7,46 = 0,89 \text{ Sekunden bei } 125 \text{ Hz.}$$

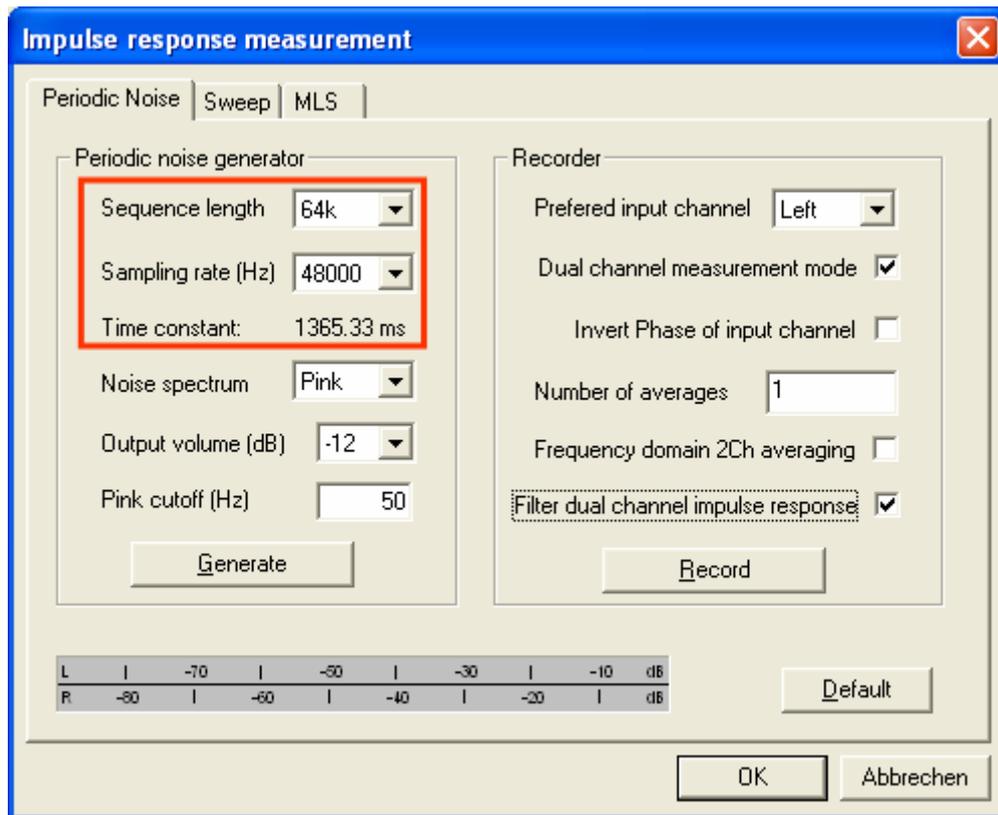
Die erforderliche Anregungsdauer sollte also deutlich länger als 0,89 Sekunden sein.

Bild 6.9 zeigt wie in ARTA mit den rot umrandeten Parametern die Anregungsdauer eingestellt werden kann. Dabei gilt

$$\text{Anregungsdauer} \approx \text{Sequence Lenght} / \text{Sampling Rate}$$

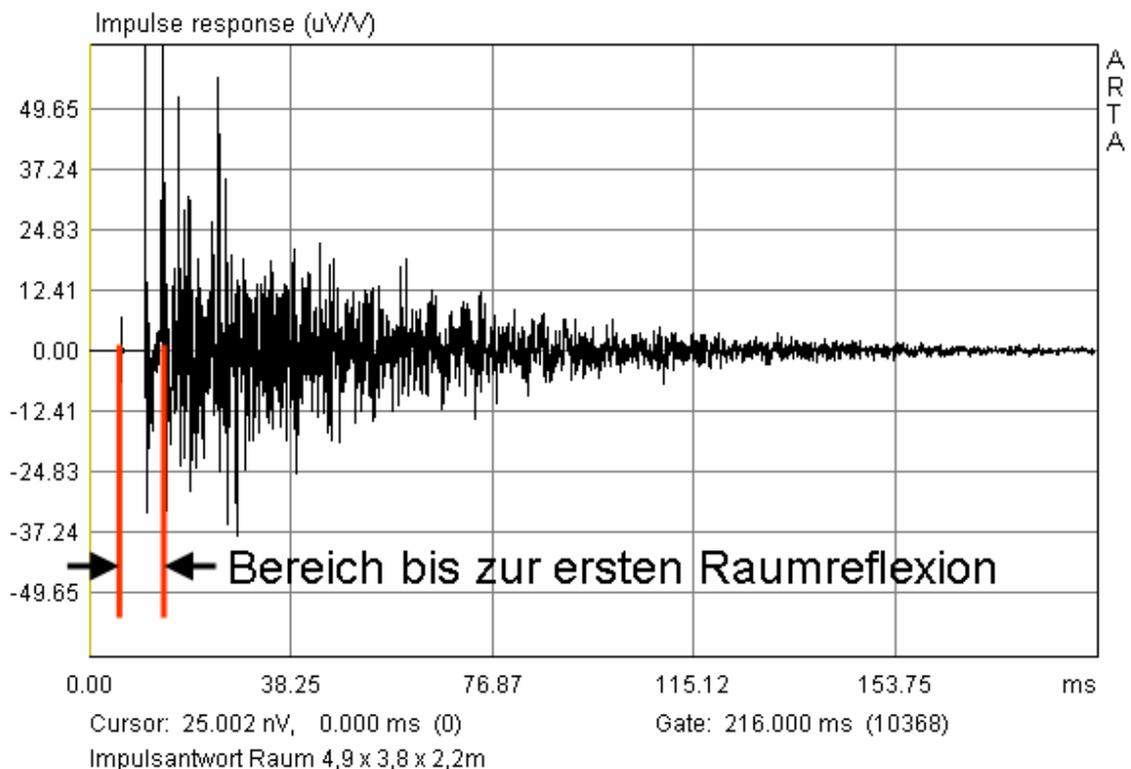
Bei den zur Verfügung stehenden Sequenzlängen von 16k, 32k, 64k und 128k ergeben sich bei 48 kHz Abtastrate Anregungsdauern von 0,33s, 0,66s, 1,33s und 2,66 s. Das sollte für normale Wohnräume hinreichend sein. Wer - aus welchem Grund auch immer - eine längere Anregungszeit benötigt, kann das durch Reduzierung der Abtastrate erreichen.

**Anmerkung:** Zur Ermittlung der Absorptionskoeffizienten von Materialien mittels der In-Situ Messung siehe ARTA Application Note No. 8 [VIII].



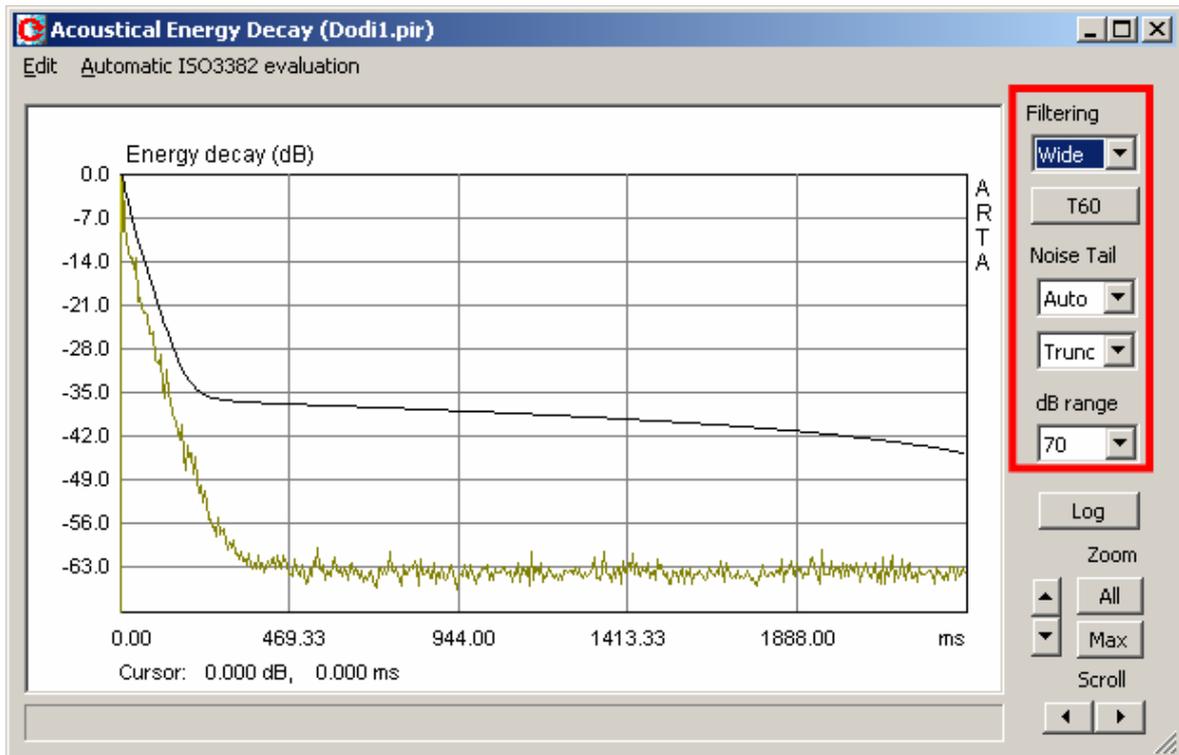
**Bild 6.2.1.1:** Einstellung der Anregungszeit

Die Impulsantwort des Raumes ist in Bild 6.2.1.2 dargestellt. Zur Orientierung ist der Abschnitt bis zur ersten Raumreflexion gekennzeichnet, das ist der Bereich, den wir normalerweise für Lautsprechermessungen betrachten.



**Bild 6.2.1.2:** Impulsantwort des Raumes

Durch Betätigung des Buttons  wird folgendes Menü geöffnet. Im rot umrandeten Bereich sind alle wesentlichen Bedienelemente, die wir zur weiteren Auswertung benötigen.



<b>Filtering</b>	Wahl des auszuwertenden Oktavbandes bzw. des gesamten Frequenzbandes (Wide)
<b>dB range</b>	Einstellung der Y-Achse
<b>T60</b>	Startet die Berechnung der akustischen Parameter. Das Ergebnis wird unter der Grafik angezeigt
<b>Noise Tail</b>	Besteht aus zwei Einstellgrößen: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mit der ersten Größe wird bestimmt, welcher Anteil der Kurve zur Auswertung herangezogen wird</li> <li>- Mit der zweiten Einstellgröße wird die Methode der Rauschreduzierung festgelegt:                 <ul style="list-style-type: none"> <li>o <b>Trunc</b> – meint, dass der gewählte Anteil bei der Berechnung nicht berücksichtigt wird</li> <li>o <b>Sub</b> – meint, dass das mittlere Rauschniveau des “Schwanzes” von der Kurve abgezogen wird</li> </ul> </li> </ul>
<b>Log</b>	Ausgabe des Berichtes mit den kalkulierten raumakustischen Parametern
<b>Zoom</b>	Horizontaler Zoom-Faktor, Max oder All
<b>Scroll</b>	Die Grafik nach rechts oder links verschieben

**Bild 6.2.1.3:** Erläuterung der Bedienelemente

Die Auswertung läuft wie folgt:

- 1) Wähle das Frequenzband mit „Filtering“
- 2) Bestimme den auszuwertenden Teil der Kurve mit „Noise tail“. Hier ist ein wenig Probieren angesagt. Ziel ist, die Kurve durch Wahl der %-Zahl und der Methode möglichst gut dem abfallenden Ast anzupassen. Die Qualität dieser Anpassung wird als Korrelationskoeffizient  $r$  nach dem nächsten Arbeitsschritt direkt unter der Grafik angezeigt. Ein Korrelationskoeffizient von  $r = 1$  wäre optimal.

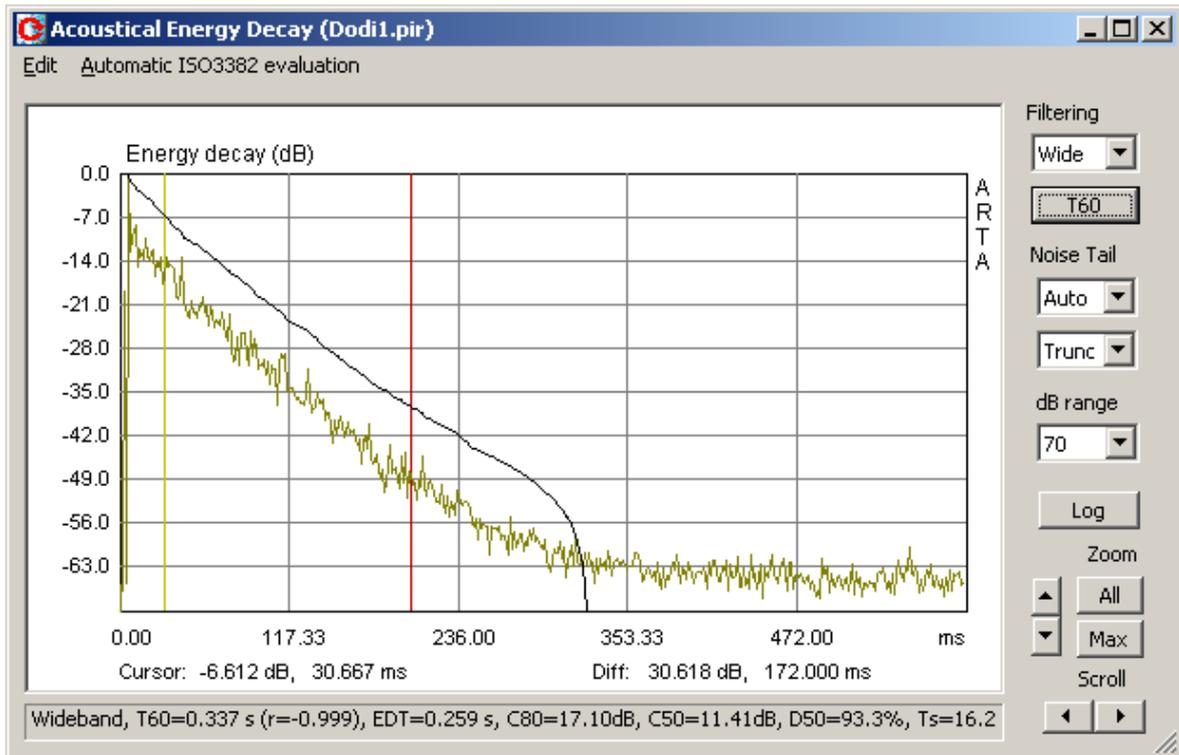


Bild 6.2.1.4: Auswertung mit Cursor und Marker

F (Hz)	Wide	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T30 (s)	0.330	1.159	0.434	0.338	0.300	0.334	0.336	0.318	0.288
rT30	-0.999	-0.989	-0.986	-0.997	-0.993	-0.998	-0.999	-0.999	-0.999
T20 (s)	0.321	1.016	0.496	0.354	0.287	0.317	0.331	0.302	0.283
rT20	-0.999	-0.981	-0.962	-0.993	-0.983	-0.994	-0.997	-0.999	-0.997
T60user(s)	0.337	1.170	0.428	0.329	0.373	0.383	0.361	0.333	0.309
rT60user	-0.999	-0.994	-0.992	-0.998	-0.988	-0.997	-0.999	-0.999	-0.999
EDT (s)	0.259	0.662	0.281	0.256	0.299	0.231	0.265	0.287	0.225
C80 (dB)	17.10	5.51	15.88	15.75	16.83	18.95	16.04	16.76	18.76
C50 (dB)	11.41	0.84	11.07	11.61	10.48	12.73	10.08	10.03	13.22
D50 (%)	93.25	54.79	92.76	93.54	91.79	94.93	91.07	90.96	95.46
Ts (ms)	16.158	57.727	22.574	18.194	15.358	14.862	22.555	19.329	16.068
BR	1.408								

Bild 6.2.1.5: Ausgabe der Ergebnisse

- 3) Bestimme durch Setzen des Cursors (gelb) und des Markers (rot) den Bereich, der ausgewertet werden soll. Die Auswertung erfolgt durch Betätigung des Buttons T60.
- 4) Wiederhole Schritt 1- 3 für alle Frequenzbänder.

- 5) Ausgabe der ermittelten raumakustischen Parameter durch Betätigung von Log. Die Ergebnisse können als Screenshot oder als CSV-Datei ausgegeben werden. Die CSV-Datei kann direkt in Excel eingelesen werden, was die statistische Auswertung ein wenig erleichtert. Bitte darauf achten, dass im Setup unter „CSV Format“ das Komma eingestellt wird (s. nachfolgendes Bild).

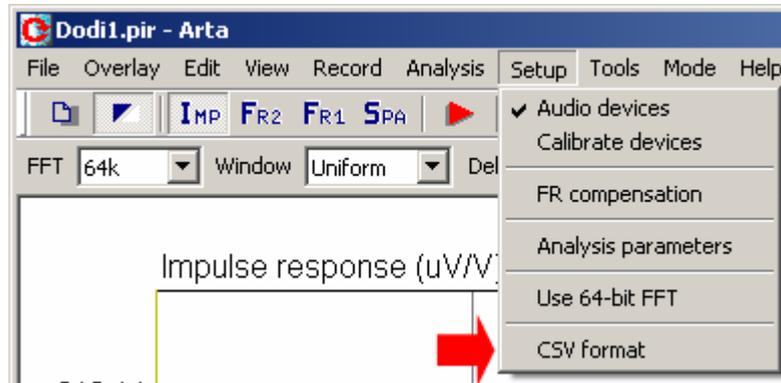


Bild 6.2.1.6 zeigt die statistische Auswertung von drei Messpositionen mit Excel. Die roten Balken zeigen die einfache Standardabweichung (Streuung) der Messungen.

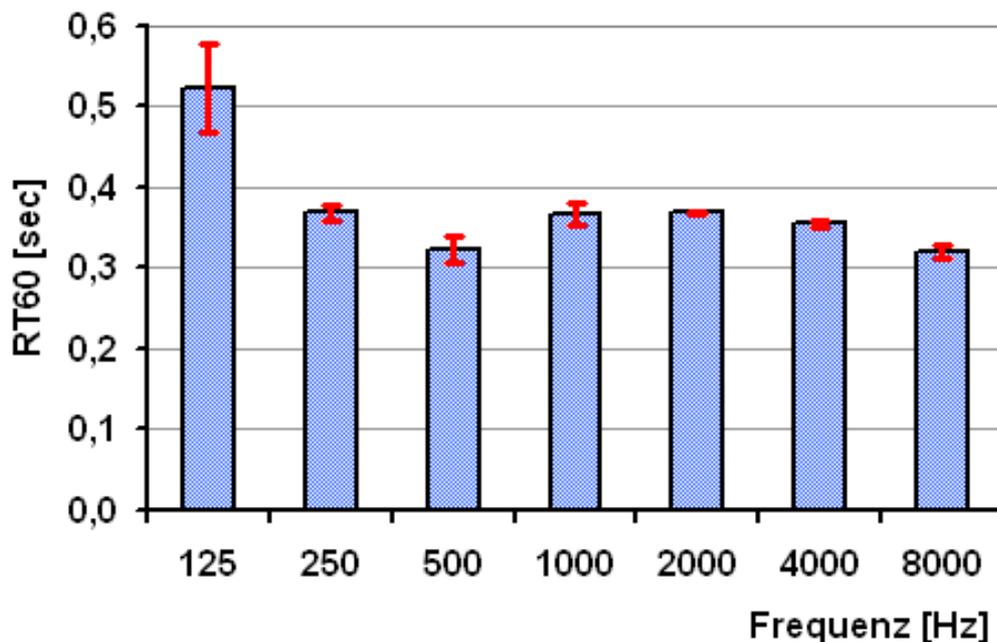
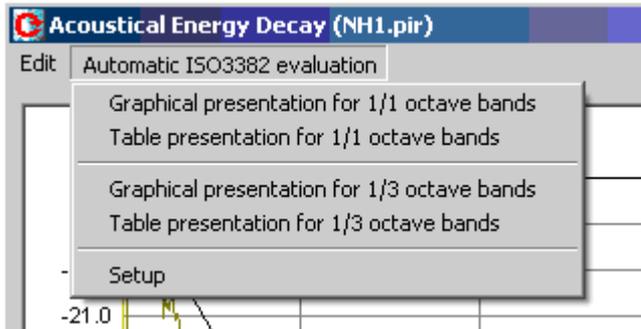


Bild 6.2.1.6: Statistische Auswertung der Einzelergebnisse

### 6.2.2 Die automatisierte Auswertung der Nachhallzeit

Ab der Version 1.5 bietet ARTA eine automatisierte Auswertung der raumakustischen Parameter gem. ISO 3382. Im Menü „Acoustical Energy Decay“ werden unter „Automatic ISO 3382



Evaluation“ 5 Optionen angeboten:

- 1/1 Oktav grafische Auswertung
- 1/1 Oktav tabellarische Auswertung
- 1/3 Oktav grafische Auswertung
- 1/3 Oktav tabellarische Auswertung

sowie das Setup Menü.

Für die Auswertung ist lediglich der gewünschte Menüpunkt zu aktivieren. Für den Fall der 1/1 Oktav-Grafik sollte das

Ergebnis aussehen wie folgt (Bild 6.2.2.1).

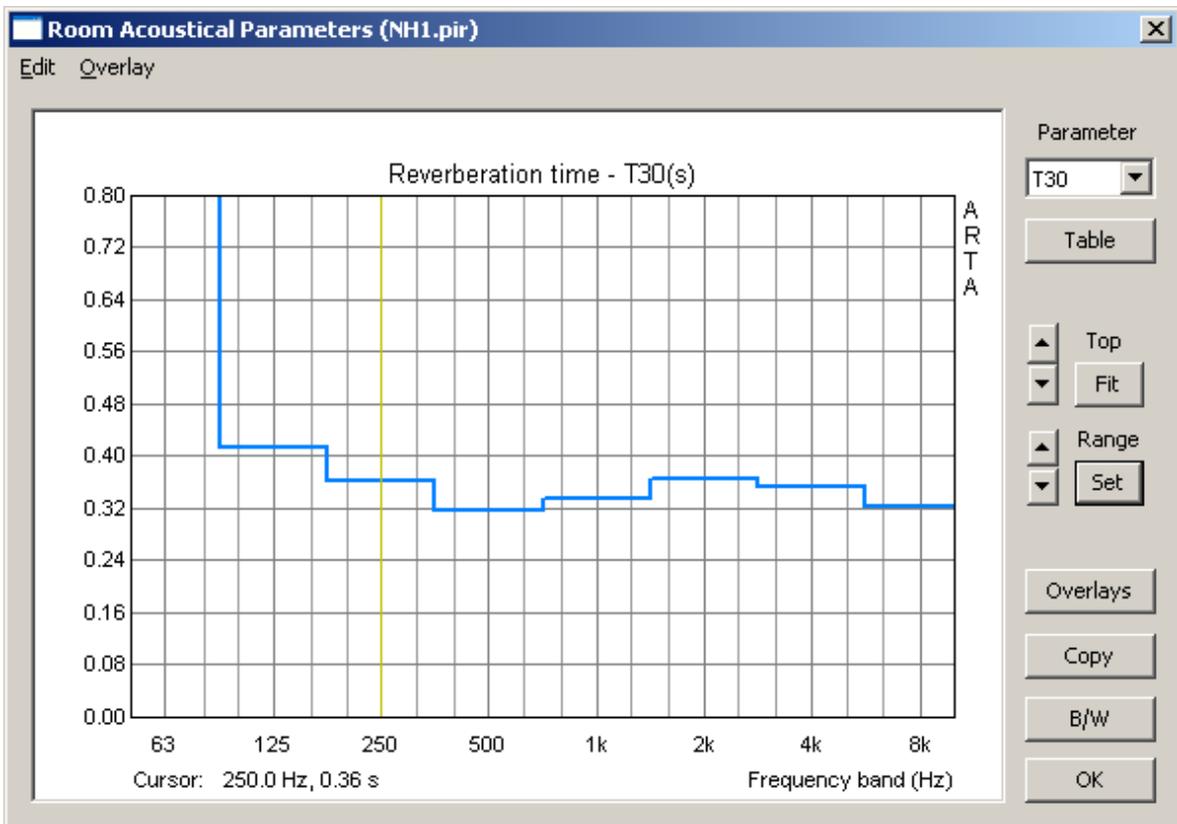
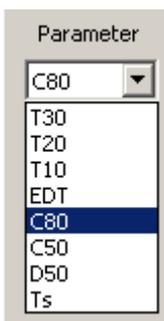


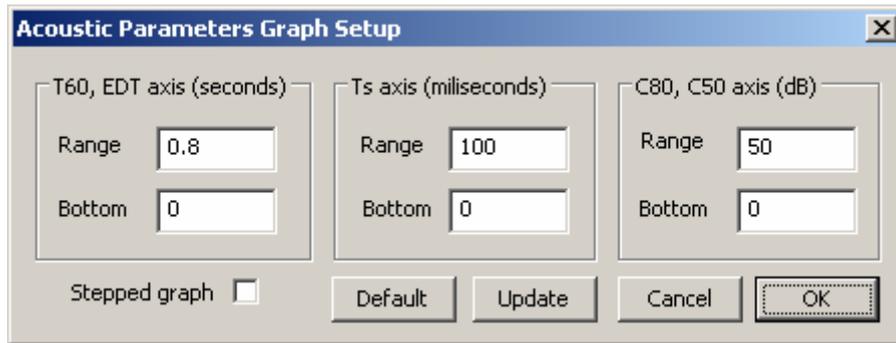
Bild 6.2.2.1: Grafische Auswertung für Oktavbänder



Zur Manipulation der Grafik stehen die bekannten Möglichkeiten zur Verfügung. Ferner können die Ergebnisse als **Overlay** abgelegt werden.

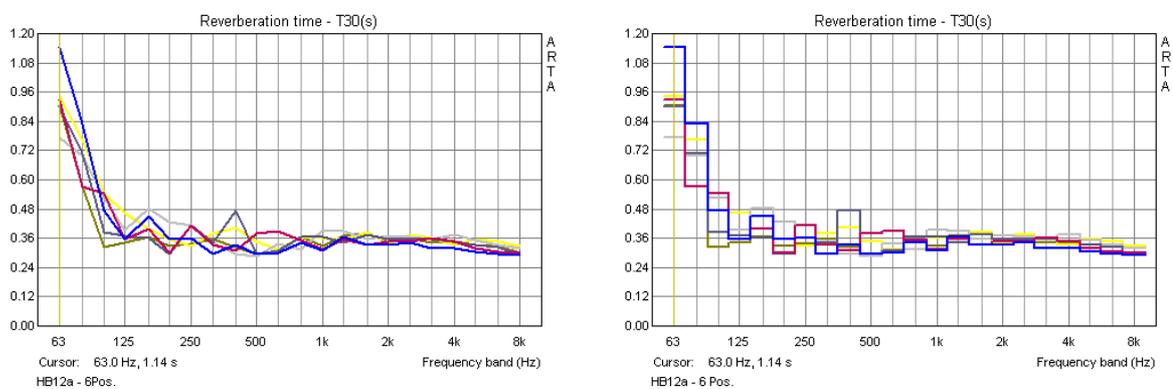
Im Feld „**Parameter**“ können alle angezeigten raumakustischen Parameter als Grafik abgerufen werden (siehe Bild links).

Unter „**Set**“ besteht die Möglichkeit die Achsen der Grafik nach eigenen Wünschen zu skalieren. Bild 6.2.2.2 zeigt die angebotenen Möglichkeiten. Mit dem Button „**Update**“ kann eine Vorschau initiiert werden.



**Bild 6.2.2.2:** Setup Menu für die Grafik der akustischen Parameter

Mit der Checkbox „**Stepped Graph**“ kann die Art der grafischen Darstellung manipuliert werden. Wenn sie aktiviert ist, wird die Grafik als Band (Balken) dargestellt (s. Bild 6.2.2.3).



**Bild 6.2.2.3:** Grafische Darstellung in Terzbändern: Linie (links), Bänder (rechts)

Wie bei der manuellen Variante können die Ergebnisse auch als Tabelle ausgegeben werden. Es ist zu beachten, dass bei der automatischen Auswertung T60 nicht ausgewiesen wird (Bild 6.2.2.4).

F (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T30 (s)	1.077	0.414	0.361	0.316	0.335	0.367	0.355	0.323
rT30	-0.979	-0.991	-0.994	-0.997	-0.998	-1.000	-0.999	-0.999
T20 (s)	1.026	0.344	0.322	0.328	0.316	0.369	0.349	0.308
rT20	-0.968	-0.990	-0.994	-0.991	-0.996	-0.999	-0.999	-0.999
T10 (s)	0.529	0.272	0.359	0.422	0.264	0.367	0.332	0.293
rT10	-0.987	-0.993	-0.989	-0.997	-0.996	-0.998	-0.995	-0.998
EDT (s)	0.621	0.567	0.470	0.386	0.317	0.375	0.263	0.296
C80 (dB)	5.34	8.51	14.02	13.88	16.62	12.84	15.85	17.17
C50 (dB)	1.06	1.82	7.82	9.44	10.21	7.21	10.72	10.77
D50 (%)	56.08	60.32	85.82	89.79	91.30	84.03	92.18	92.28
Ts (ms)	57.592	41.275	23.094	19.808	20.576	26.655	19.902	18.029
BR	1.035							

**Bild 6.2.2.4:** Tabellarische Darstellung

### 6.3 Messaufbau für akustische Messungen an Lautsprechern

Zur Entwicklung eines Lautsprechers sind neben Wissen und Material, ARTA und ein Paar Ohren hinreichend. Zwecks Reduzierung des Entwicklungsaufwandes wird heute zusätzlich Simulationssoftware (z.B. BoxSim, CALSOD) eingesetzt. Der virtuelle Entwicklungsprozess reduziert sowohl den Materialeinsatz als auch die Entwicklungszeit. Die Simulationsergebnisse sind in der Regel recht nah an der Wirklichkeit, erfordern dafür aber die Berücksichtigung einiger Besonderheiten bei der Ermittlung der Frequenz- und Impedanzgänge, mit denen die Programme gefüttert werden. Dazu im Folgenden einige Hinweise, die nicht als Kochrezept, sondern als Anregung zum Ausprobieren zu verstehen sind.

#### Simulationsprogramme

Aus der Vielzahl der verfügbaren Simulationsprogramme schauen wir uns im Folgenden beispielhaft zwei Vertreter bzgl. der Anforderungen an den Messaufbau und die Messdaten an, mit denen sie gefüttert werden:

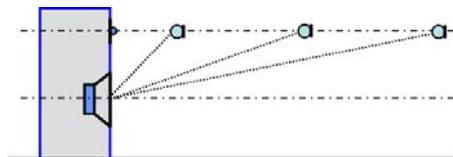
- BoxSim
- CALSOD

**BoxSim** bietet die Möglichkeit die Einzellautsprecher frei auf der Schallwand zu positionieren (X-, Y-Achse) sowie die Eingabe des Schallentstehungsortes (Z-Achse). Das Mikrofon wird in unendlichem Abstand positioniert, demzufolge kann es keine Winkelfehler zwischen den Einzellautsprechern geben.



Aufgrund dieser Konstellation ist es erforderlich, die Lautsprecher jeweils auf Achse – oder in hinreichend großem Abstand - zu messen und die Messdaten als FRD- oder ZMA-Files in BoxSim zu importieren.

**CALSOD** ist in dieser Hinsicht etwas flexibler. Es erlaubt sowohl die freie Positionierung (X, Y, Z) der Einzellautsprecher auf der Schallwand als auch des Mikrofons (X, Y, Z). Hierdurch kann



prinzipiell jede Mess- und Hörsituation abgebildet und simuliert werden. Die importierten Messdaten müssen dann aber auch den gewählten Bedingungen entsprechen.

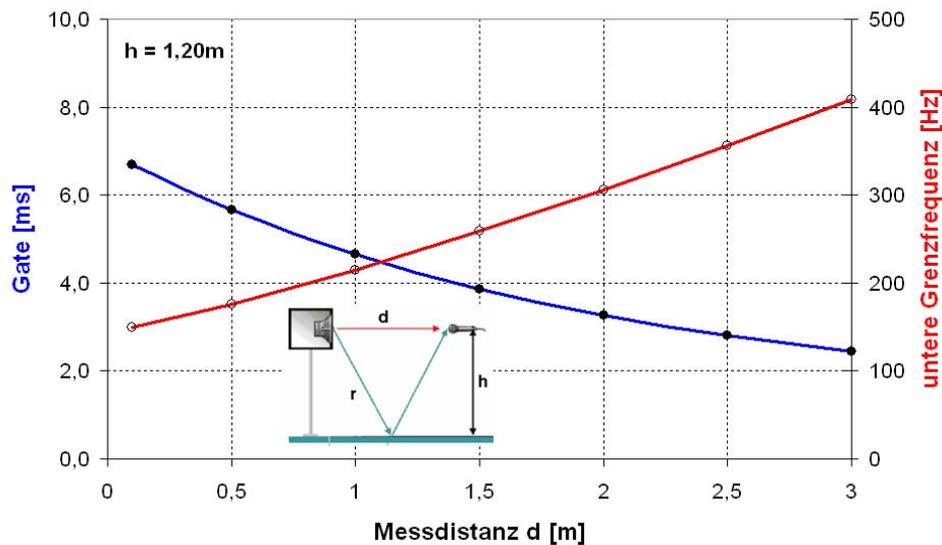
Im Folgenden nun Hinweise zu einigen der Variablen, die bei der Messung beachtet bzw. kontrolliert werden sollen.

#### Messumgebung

Lautsprecher sollen in der gewählten Hörumgebung den Anforderungen des Hörers genügen. Daher wäre es folgerichtig, bei der Lautsprecherentwicklung auch unter diesen Bedingungen zu messen. Im Falle üblicher Hörabstände (1,5 bis 4,0 m) und Raumabmessungen (12 - 40 m<sup>2</sup>) muss

man sich jedoch darüber im Klaren sein, dass die so erzielten akustischen Messergebnisse die Summe aus Lautsprecher und Raum sind.

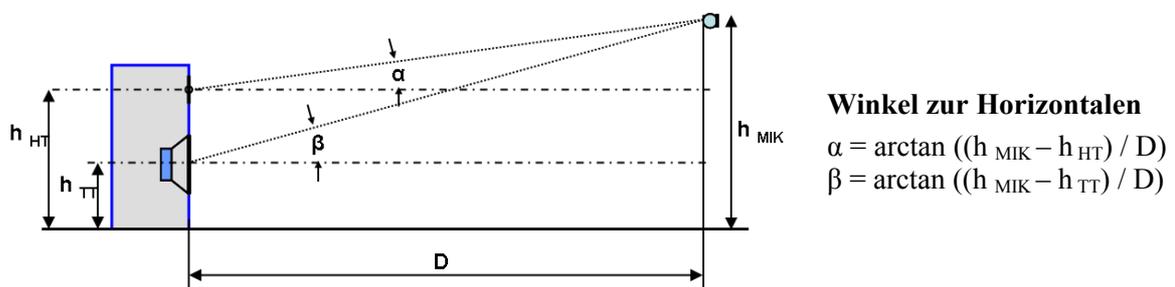
Wenn wir uns zunächst auf die Entwicklung eines Lautsprechers unabhängig vom Raum - also im Freifeld - beschränken, so wissen wir aus Abschnitt 6.1, dass der Messraum uns einige Knüppel in den Weg legt. Deckenhöhen von 2,50 m schränken das uns zur Verfügung stehende reflexionsfreie Zeitfenster ein und bestimmen somit die untere Frequenzgrenze (s. Bild 6.3.1) und Frequenzauflösung. Übliche Hallradien von unter einem Meter besagen, dass bei Wahl von größeren Messabständen keine Freifeldbedingungen mehr zu erwarten sind und demzufolge der Raumeinfluss dominant wird.



**Bild 6.3.1:** Fensterlänge bzw. untere Grenzfrequenz als Funktion der Messdistanz für eine Raumhöhe H von 2,40m ( $h = H/2$ )

**Messaufbau - Winkelfehler**

Zu diesen bereits bekannten Einschränkungen, kommen zusätzliche, die durch die Messanordnung einfließen. Bild 6.3.2 zeigt die Geometrie einer normalen Hör- / Messsituation für eine Zweigebox.

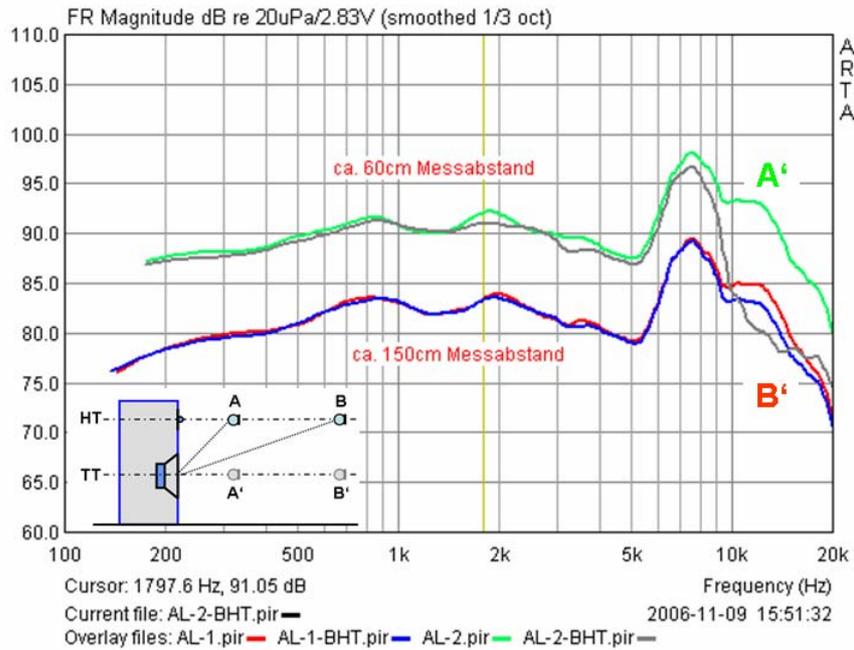


**Bild 6.3.2:** Geometrie einer normalen Hör- / Messsituation

Für eine reale Messung würde man allerdings das Mikrofon nicht ohne Not außerhalb beider Lautsprecherachsen positionieren. Warum, werden wir im Laufe der folgenden Ausführungen sehen.

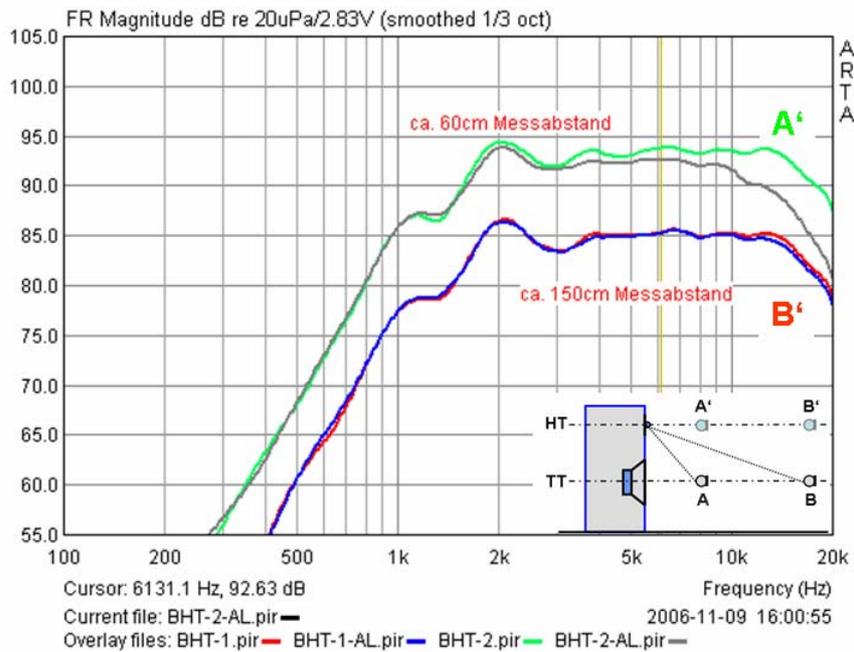
In **Bild 6.3.3a** sind zwei Messpositionen unterschiedlichen Abstands für eine Zweigebox dargestellt. Das Mikrofon befindet sich auf Achse des Hochtöners, der Tieftöner wird jeweils von

der Position A und B gemessen. Als Referenz wird jeweils die Messung des Tieftöners auf Achse gezeigt (A', B'). Das Ergebnis ist nicht unbedingt eine Überraschung: Je kürzer der Messabstand, desto größer wird der Messwinkel für den Tieftöner und demzufolge die Abweichung vom Frequenzgang auf Achse. Gehen wir mit diesen Frequenzgängen in ein Simulationsprogramm und simulieren für andere Abstände, so ergeben sich zwangsläufig Fehler.



**Bild 6.3.3a:** Tieftöner jeweils auf Achse (A'=grün, B'=rot) und auf Achse HT (A=grau, B=blau)

Bild 6.3.3b zeigt die Messungen für den Hochtöner. Es wird deutlich, dass bei 60cm Messabstand bereits ab 1,5 kHz Winkelfehler auftreten.



**Bild 6.3.3b:** Hochtöner jeweils auf Achse (A'=grün, B'=rot) und auf Achse TT (A=grau, B=blau)

Hingegen bei 150 cm Messabstand kann der Winkelfehler - für die hier gezeigten Bedingungen - toleriert werden, da die Abweichungen von der Referenz auf Achse erst bei ca. 10 kHz beginnen, also 1,5 bis 2 Oktaven oberhalb üblicher Übergangsfrequenzen.

Zwecks Abschätzung des Winkelfehlers für andere Messparameter wird in Bild 6.3.4 der Zusammenhang zwischen Chassis- und Messabstand sowie dem jeweiligen Messwinkel gezeigt.

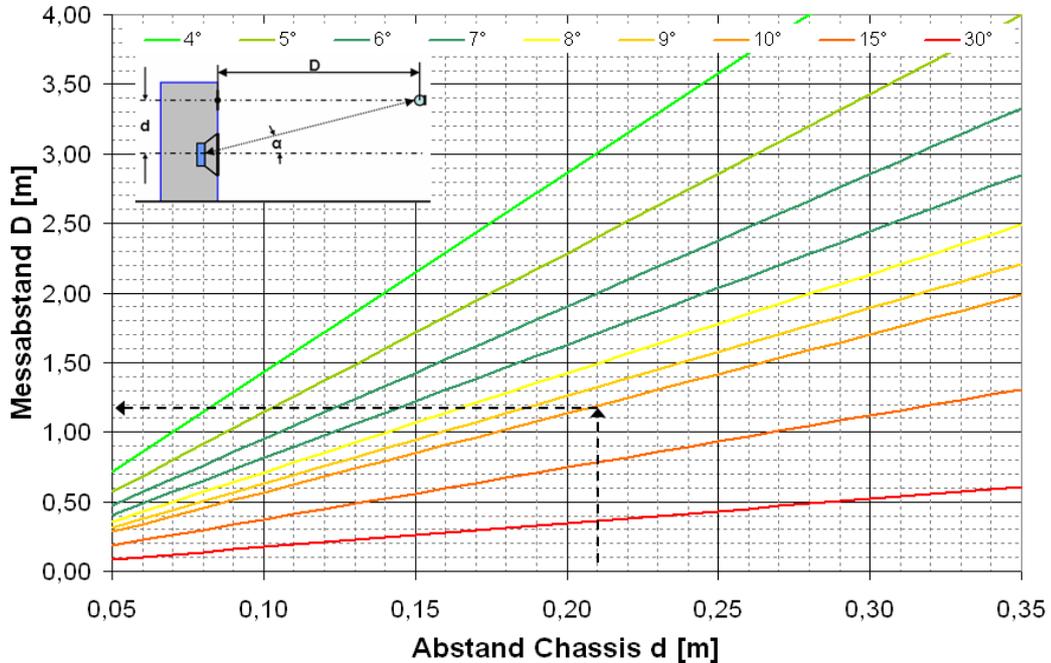


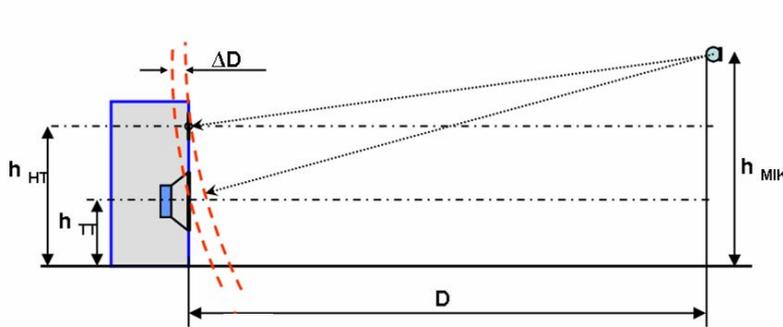
Bild 6.3.4: Messabstand als Funktion von Winkel und Chassisabstand

**Beispiel:** Wie groß muss der Messabstand  $D$  mindestens sein, wenn bei einem Abstand  $d$  von 21 cm zwischen den zwei Lautsprecherchassis der Messwinkel  $\alpha$  nicht größer als  $10^\circ$  sein soll? Wenn wir uns bei 0,21 m Chassisabstand den Schnittpunkt mit der  $10^\circ$ -Linie suchen, ergibt sich ein Mindestmessabstand mit ca. 1,18 m.

Wir sehen, diese Messanordnung verlangt zur Vermeidung von Winkelfehlern einen großen Messabstand, was dann allerdings schnell dem Anspruch auf Einhaltung der Freifeldbedingungen zuwider läuft.

### Geometrische Laufzeitunterschiede

Widmen wir nun einem weiteren Punkt unsere Aufmerksamkeit, welcher sich ebenfalls aus der Messanordnung ergibt. Bild 6.3.5 zeigt, dass neben unterschiedlichen Messwinkeln auch unterschiedliche Messabstände bzw. Laufzeiten für den Schall zu berücksichtigen sind



#### Entfernung Mikrofon – LS

$$D_{HT} = \text{Sqrt}((h_{MIK} - h_{HT})^2 + D^2)$$

$$D_{TT} = \text{Sqrt}((h_{MIK} - h_{TT})^2 + D^2)$$

#### Wegunterschied

$$\Delta D = (D_{TT} - D_{HT})$$

#### Laufzeitunterschied

$$\Delta t = \Delta D / 344 \text{ m/s}$$

Bild 6.3.5: Phasenverschiebung durch unterschiedliche Laufzeit

Nachfolgende Tabelle zeigt in den rot markierten Spalten die Messbedingungen für die Beispiele aus Bild 6.3.3a und Bild 6.3.3b. Bei 60 cm ergibt sich eine Wegdifferenz  $\Delta D$  von 1,85 cm, was einer Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  von 0,054 ms entspricht. Beim Messabstand von 150 cm reduziert sich die Wegdifferenz auf 0,75 cm bzw. eine Laufzeitdifferenz von 0,022 ms.

D	0,6 m	1,5 m	2 m	4 m	33 m
$h_{HT}$	0,95 m				
$h_{TT}$	0,8 m				
$h_{MIK}$	0,95 m				
$\alpha$	0,00 °	0,00 °	0,00 °	0,00 °	0,00 °
$\beta$	14,04 °	5,71 °	4,29 °	2,15 °	0,26 °
D HT	0,600 m	1,500 m	2,000 m	4,000 m	33,0000 m
D TT	0,618 m	1,507 m	2,006 m	4,003 m	33,0003 m
$\Delta D$	1,847 cm	0,748 cm	0,562 cm	0,281 cm	0,034 cm
$\Delta t$	0,054 ms	0,022 ms	0,016 ms	0,008 ms	0,001 ms

Die Laufzeitdifferenz ist einer Verzögerung (Delay) gleichzusetzen, was einer mit der Frequenz kontinuierlich zunehmenden Phasenverschiebung entspricht:

$$d\Phi [\text{°}] = \text{Delay [m]} * \text{Frequenz [Hz]} / \text{Schallgeschwindigkeit [m/s]} * 360\text{°}$$

Für den Fall einer üblichen Übergangsfrequenz von 3000 Hz entspricht das Delay von 1,847 cm einer Phasenverschiebung von

$$d\Phi [\text{°}] = 0,01847 \text{ [m]} * 3000 \text{ [Hz]} / 344 \text{ [m/s]} * 360\text{°} = 57,98\text{°}$$

relativ zum Hochtöner. Die Simulation in Bild 6.3.6 vermittelt einen Eindruck, welchen Einfluss diese 1,847 cm unter den genannten Bedingungen auf idealisierte Lautsprecher mit Linkwitz Riley Filtern 2. Ordnung, haben.

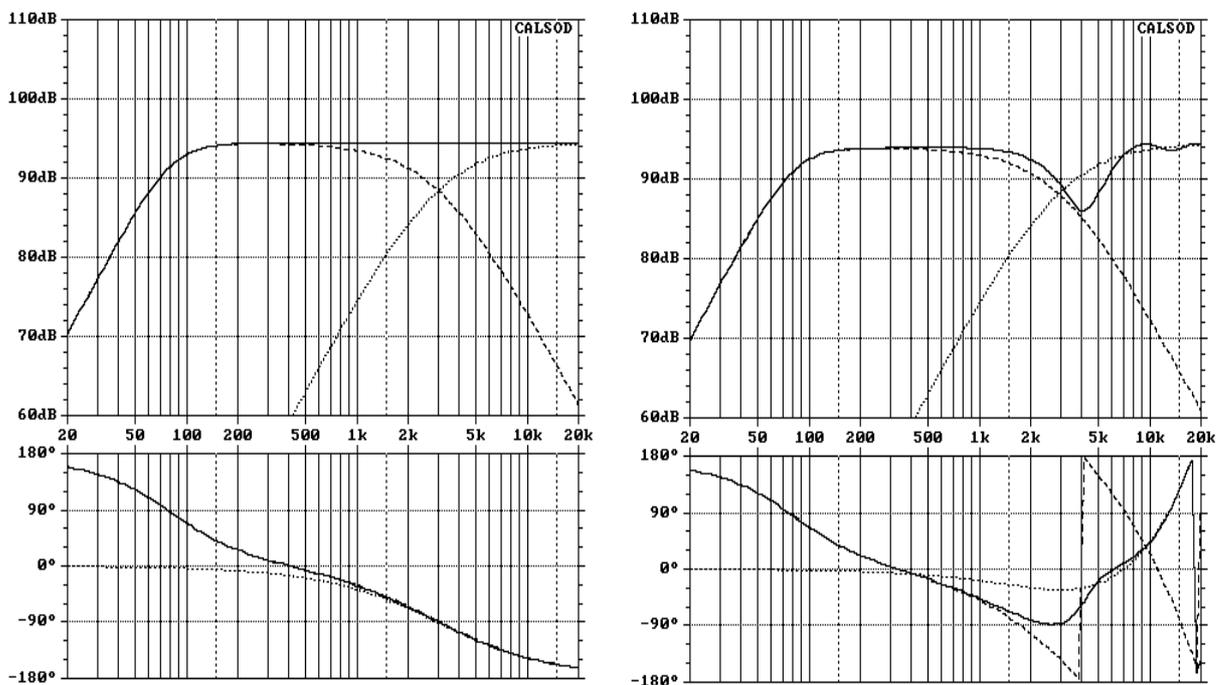


Bild 6.3.6: Auswirkung von Laufzeitunterschieden (links ohne, rechts mit Delay)

### Der Schallentstehungsort (SEO)

Bislang sind wir davon ausgegangen, dass der Schallentstehungsort bei Lautsprecherchassis auf der Ebene der Schallwand liegt. Leider entspricht das nicht ganz der Realität.

Nach Anregung durch ein Signal lenkt die Lautsprechermembran, getrieben durch die Schwingspule, aus und produziert Luftschall. Diese Auslenkung ist nicht bei allen Frequenzen für alle Membranabschnitte gleich (kolbenförmige Abstrahlung), sondern es kommt zu Verformungen und Resonanzen in der Membran. Diese Vorgänge erfordern eine gewisse Zeit, bis sie sich vom Ort der Krafteinleitung, der Schwingspule, zu den einzelnen Membranabschnitten fortgepflanzt haben und dann dort als Schall abgestrahlt werden. Die Laufzeit hängt sowohl von den Abmessungen der Membran als auch von den Eigenschaften der verwendeten Membranmaterialien ab. Es ist leicht vorzustellen, dass dieser Vorgang frequenz- und ortsabhängig sein wird. Ferner lässt sich einfach zeigen, dass abweichend vom Modell der Punktschallquelle, bei einem realen Lautsprecher nicht alle Membranabschnitte gleich weit vom Mikrofon entfernt sind.

Bei einem realen Lautsprecher ist also nicht zu erwarten, dass er sich wie eine Punktschallquelle verhält. Der so genannte Schallentstehungsort (SEO) wird nicht als Fixpunkt auszumachen sein, sondern frequenzabhängig wandern. Einer der häufigsten Vorschläge, die Lage der Schwingspule als SEO anzunehmen, dürfte demnach nicht ganz zutreffend sein. Insgesamt handelt es sich um äußerst komplexe Zusammenhänge, die in diversen Veröffentlichungen immer wieder untersucht wurden. Auch in den Handbüchern von Simulations- oder Lautsprechermesssoftware wird man fündig. Die erteilten Ratschläge zur Ermittlung des so genannten Schallentstehungsortes (SEO) decken dabei das Spektrum von groben Näherungen bis zu wissenschaftlichen Abhandlungen ab.

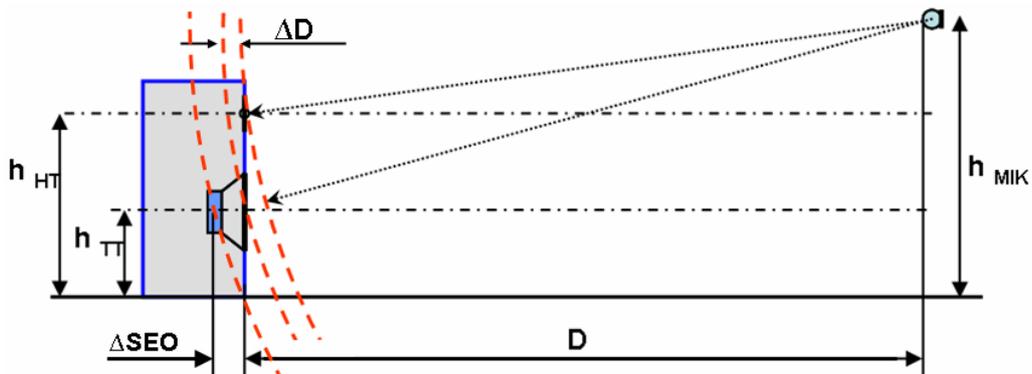


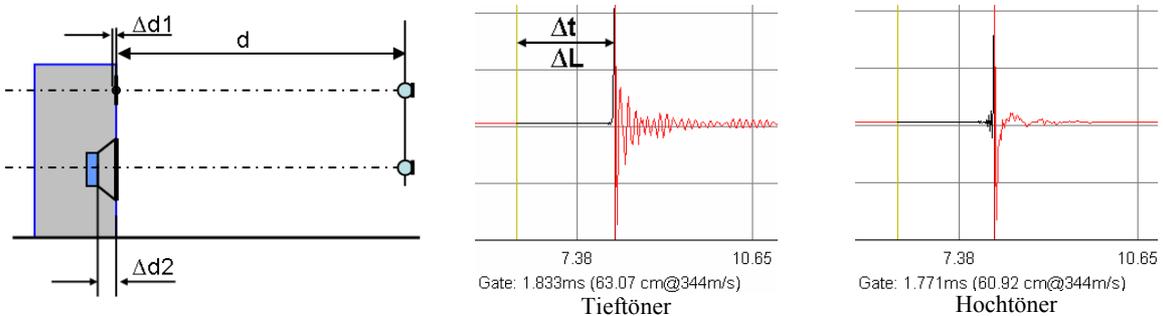
Bild 6.3.7: Phasenverschiebung durch unterschiedliche Laufzeit mit Berücksichtigung des SEO

Die in der Literatur genannten Möglichkeiten und Methoden zur Bestimmung des SEO sollen dem interessierten Leser natürlich nicht vorenthalten werden [17] – [21], dennoch sollten wir nicht vergessen, dass

1. der SEO nur ein Aspekt unter anderen ist, der bei der Aufbereitung von Messdaten für Simulationsprogramme zu beachten ist
2. es bei der Simulation nicht auf die absoluten Werte des SEO ankommt, sondern auf die relativen Unterschiede zwischen den eingesetzten Chassis.
3. auch die Frequenzweiche einen nicht unerheblichen Einfluss auf das Zeitverhalten hat.

**Methoden zur Ermittlung des SEO**

Eine einfache Methode zur Bestimmung des SEO ist in Bild 6.3.8 dargestellt. Das Mikrofon wird auf Achse des zu messenden Lautsprechers (hier Tieftöner) im Abstand  $d$  positioniert. Der Abstand vom Mikrofon bis zur Ebene der Schallwand (Bezugsebene) ist mit einem Bandmaß möglichst genau zu messen. In unserem Beispiel sind es genau 60,0 cm.



**Bild 6.3.8:** Ermittlung des SEO (Methode Abstand – Impulsmaximum)

Nun messen wir mit ARTA die Impulsantwort im Zweikanalmode und bestimmen daraus die Laufzeit bzw. den Abstand bis zum Impulsmaximum. Sofern im Menüpunkt View die Option Gate Time aktiviert ist, kann der Abstand direkt unter dem Diagramm abgelesen werden (s. Bild 6.3.8, rechts).

Tieftöner

$$\Delta t = 1,833 \text{ ms} \rightarrow d_{\text{IMP}} = 1,833 * 34,4 = 63,07 \text{ cm}$$

$\Delta \text{SEO} = d - d_{\text{IMP}} = 60,0 - 63,07 = -3,07 \text{ cm} \rightarrow$  Der SEO des Tieftöners liegt 3,07 cm hinter der Schallwandebene.

Hochtöner

$$\Delta t = 1,771 \text{ ms} \rightarrow d_{\text{IMP}} = 1,771 * 34,4 = 60,92 \text{ cm}$$

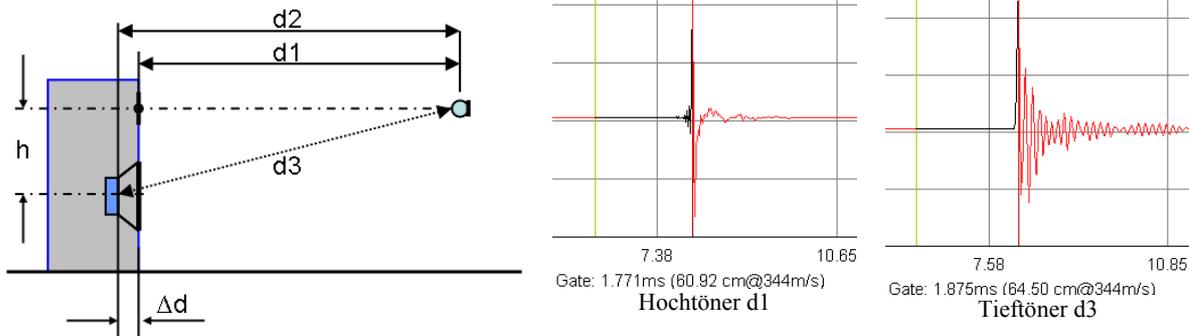
$\Delta \text{SEO} = d - d_{\text{IMP}} = 60,0 - 60,92 = -0,92 \text{ cm} \rightarrow$  Der SEO des Hochtöners liegt 0,92 cm hinter der Schallwandebene.

Die beiden SEO differieren somit um 2,15cm.

	<p><b>Anmerkung 1:</b> Ab Version 1.4 wurde ARTA um die Overlay-Funktion für Impulsantworten erweitert. Damit können zwei Impulsantworten verglichen werden und die Laufzeitunterschiede direkt mittels Cursor und Marker ermittelt werden.</p> <p>In diesem Zusammenhang ist auch die Manipulationsmöglichkeit des <b>Markers</b> mittels der <b>rechten Shift-Taste</b> sowie Pfeiltasten zu erwähnen, denn sie erlaubt eine bessere Positionierung des Markers.</p> <p><b>Anmerkung 2:</b> Ab Version 1.4 bietet ARTA im FR2-Mode eine automatische Abstandsermittlung</p>
--	---

Joseph D'Appolito [2] schlägt eine Methode zur Ermittlung der Differenz zwischen zwei SEO vor, die zwei Messungen und ein wenig Mathematik erfordert. Die Messgeometrie ist in Bild 6.3.9 dargestellt. Beide Lautsprecher werden von einer Mikrofonposition gemessen und aus den Impulsantworten - analog zum obigen Beispiel - die Abstände d1 und d3 ermittelt. Dann berechnet sich d2 (das ist der Abstand, der sich ergeben würde, wenn der Tieftöner an der Stelle des Hochtöners gewesen wäre) wie folgt:

$$d2 = \sqrt{d3^2 - h^2} \quad \text{und} \quad \Delta d = d2 - d1$$

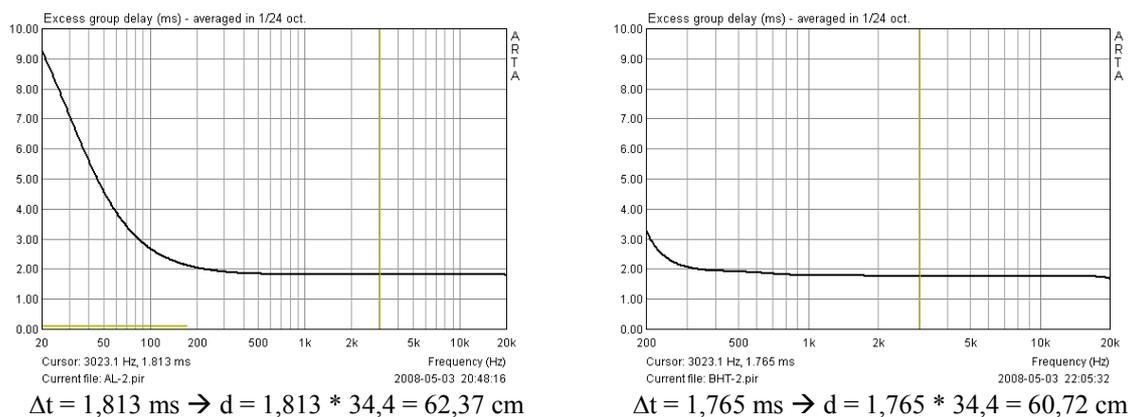


**Bild 6.3.9:** Ermittlung des SEO (Methode D'Appolito))

Mit d1=60,92 cm und d3=64,50 cm ergibt sich bei einem Abstand h=15,0cm d2=62,73 und damit differieren die SEO bei dieser Methode um Δd =1,81cm.

Wie bereits im Kapitel 6.2 erwähnt wird die Auflösung dieser Methoden durch die Samplingrate der Soundkarte bestimmt (48kHz = 7,2mm, 96kHz = 3,58mm).

Eine dritte Methode ist mittels der Funktion Group Delay darstellbar. Hierzu werden bei den Impulsantworten die Raumreflexionen gefenstert und anschließend als Group Delay dargestellt (siehe Bild 6.3.10). Dann wird der Cursor auf die gewählte Übergangsfrequenz gesetzt und das Delay unter dem Diagramm abgelesen.



**Bild 6.3.10:** Ermittlung des SEO (Methode Group Delay)

Bei dieser Methode ergibt sich eine Differenz der SEO von 1,65 cm. Wenn die beiden Group Delay Verläufe mittels der Overlay Funktion in einem Chart dargestellt werden, wird die Methode etwas anschaulicher (Bild 6.3.11)

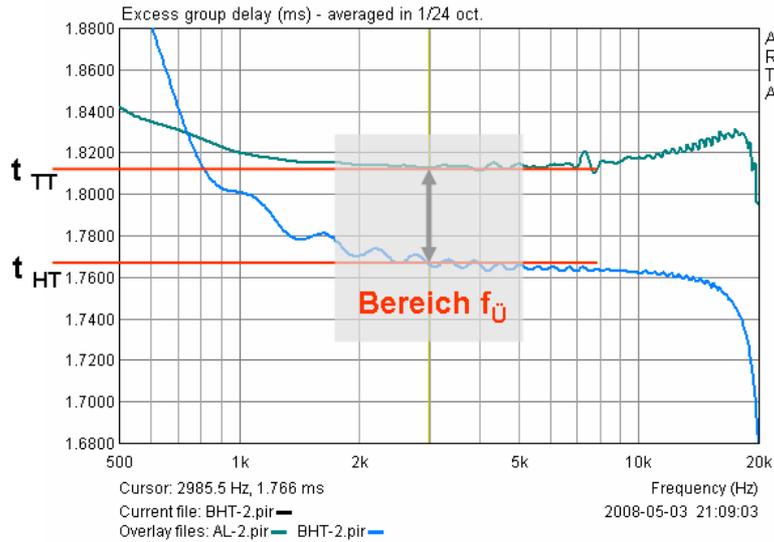


Bild 6.3.11: Ermittlung des SEO (Methode Group Delay)

Weitere Methoden zur Ermittlung des SEO - z.B. mittels einer Annäherung an den Minimum Phase Verlauf oder Einbindung von Simulationsprogrammen - sind der Literatur [17] – [21] zu entnehmen. Wer alles ausprobieren möchte, sollte sich etwas Zeit nehmen.

Für diejenigen, die sich bis zu dieser Stelle vorgearbeitet haben die Ernüchterung. Selbst die sorgfältige Ermittlung und Beachtung aller oben beschriebenen Variablen führt nicht direkt zur perfekten Weiche, denn auch die Frequenzweiche selbst nimmt Einfluss auf das Zeitverhalten. So bringen Tiefpässe eine Signalverzögerung mit sich. Diese Verzögerung wird mit steigender Filterordnung und abnehmender Frequenz immer größer und kann bei tiefen Trennfrequenzen - im Vergleich zum geometrischen Versatz des SEO - dominant sein. Weichenentwicklung ist und bleibt also ein „Gesamtkunstwerk“

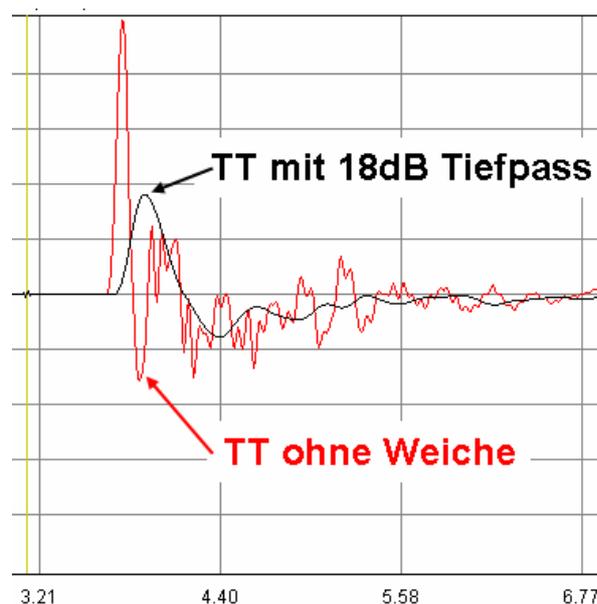


Bild 6.3.11: Signalverzögerung durch 18dB Tiefpass

## 6.4 Skalieren und Fügen von Nah- und Fernfeldmessungen

Für die Weiterverarbeitung in Simulationsprogrammen wird ein kompletter Frequenzgang (Amplitude und Phase) benötigt. Dazu werden eine Nahfeld- und eine Fernfeldmessung zusammengefügt (s. auch Kapitel Messung in reflektierender Umgebung).

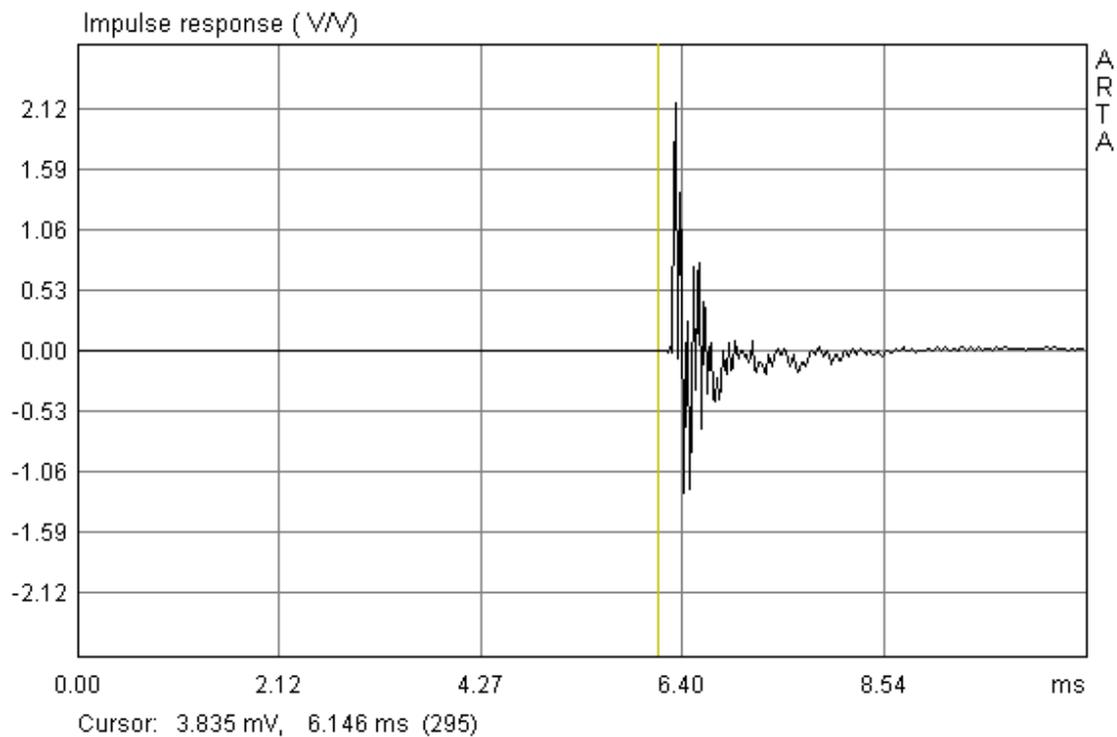
Für die Erzeugung des Gesamtfrequenzganges sind einige Schritte zu durchlaufen, die anhand der folgenden zwei Beispiele gezeigt werden. Für eine

- geschlossene 2 Liter Box mit einem Visaton FRS8-Breitbänder
- und eine 8 Liter Bassreflexbox mit einem 5“ Chassis

werden mit ARTA gemessene Frequenzgänge nachbearbeitet.

### 6.4.1 Closed Box

1) Messen oder Laden des Nahfeldfrequenzganges



**Bild 6.4.1:** Impulsantwort im Nahfeld

Setzen des Cursors (gelbe Linie) auf den Anfang des ersten Impulses, um eine korrekte Phasenbeziehung zu erhalten. Achtung, wenn der Cursor zu dicht an der Impulsspitze gesetzt wird, können auch Informationen verloren gehen. Es ist besser, etwas Abstand zu halten und anschließend die Differenz durch ein Delay zu korrigieren. Also den Cursor (linke Maustaste) ca. 1 ms vor dem ersten Impuls platzieren, den Marker (rechte Maustaste) genau auf das Impulsmaximum setzen und mit ‚Get‘ in der oberen Menüleiste das Delay übernehmen.

Delay for phase estimation (ms)



Werten Sie die Impulsantwort mittels  aus.

Stellen Sie im ‚Smoothed Frequency Resonse‘ über das Menü ‚View‘ die Ansicht ‚Magn+Phase‘ ein.

Im nächsten Bild ist der Frequenz- und Phasengang des Lautsprechers im Nahfeld zu sehen.

Bei einem Membrandurchmesser von ca. 6,4 cm ist der Nahfeldfrequenzgang bis ca. 900 Hz gültig (siehe Bild 6.4.2). Um das deutlich zu machen, wurde der Cursor bei 900 Hz gesetzt.

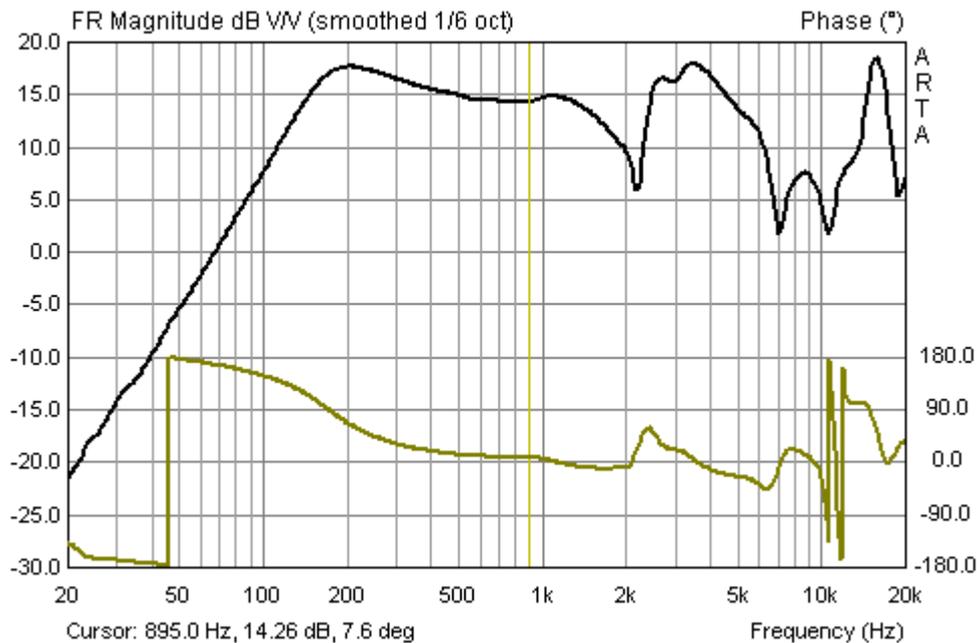


Bild 6.4.2: Frequenzgang im Nahfeld. „Gültigkeitsbereich“ durch Cursor gekennzeichnet.

2) Korrektur des Nahfeldfrequenzganges auf den Messabstand des Fernfeldes. Hier bietet ARTA zwei Möglichkeiten:

- A) Im ‚Smoothed Frequency Response‘ über das Menü ‚Edit‘ → ‚Scale Level‘

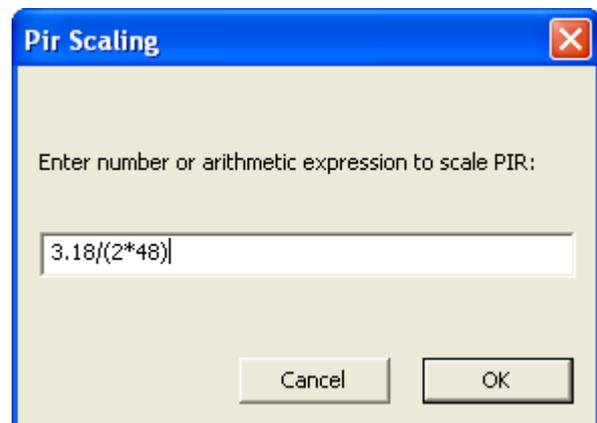
Der Korrekturwert für den Pegel (2 Pi) berechnet sich mit

$$\text{Korrektur (FF)} = 20 \cdot \log(a / 2d)$$

a = Membranradius, d = Messabstand

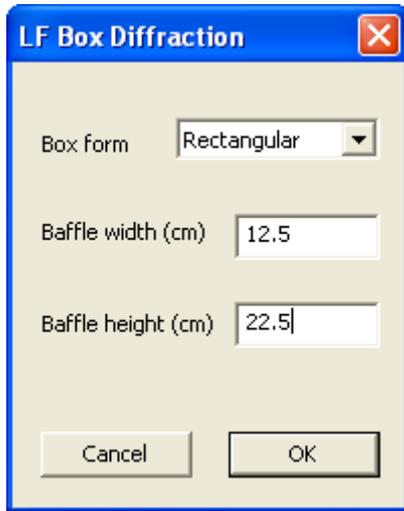
mit a = 3,18 cm und d = 48 cm ergibt Korrektur (FF) = -29,6 dB

- B) Im ARTA-Hauptmenü über ‚Edit‘ → ‚Scale‘ in der Zeitebene



### 3) Durchführung der Baffle Step Korrektur

Ein besonderes Feature von ARTA ist die Korrektur des so genannten „Baffle Steps“ (näheres hierzu kann in der ARTA-Application Note Nr. 4 nachgelesen werden [IV]).



hierzu kann in der ARTA-Application Note Nr. 4 nachgelesen werden [IV]).

Dazu wird unter 'Edit → LF box diffraction', die links gezeigte Dialogbox geöffnet:

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

Nach Betätigung von OK sollte Bild 7.2b zu sehen sein. Diese Kurve wird als Overlay gespeichert.

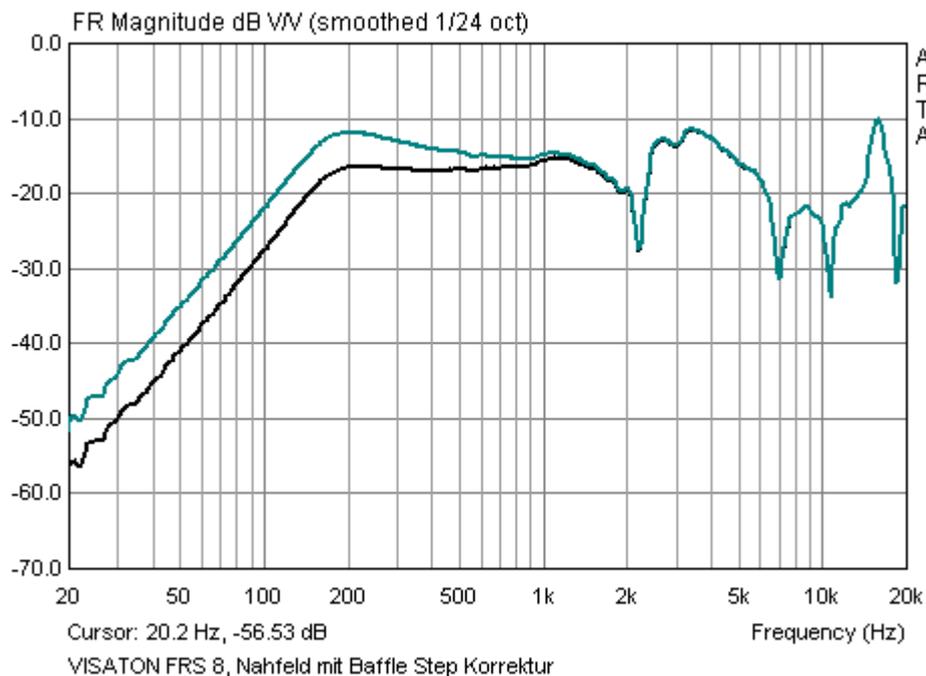


Bild 6.4.3: Frequenzgang im Nahfeld mit Baffle Step Korrektur (schwarz)

### 4) Laden oder Messen des Fernfeldfrequenzganges

Jetzt öffnen wir das File mit der Impulsantwort des Fernfeldfrequenzganges und setzen das „Gate“ (gelbe Linie = linke Maustaste, rote Linie = rechte Maustaste). Sehr schön zu sehen sind die dicht zusammen liegenden Reflexionen von Boden und Decke (Lautsprecher steht in etwa auf halber Raumhöhe).

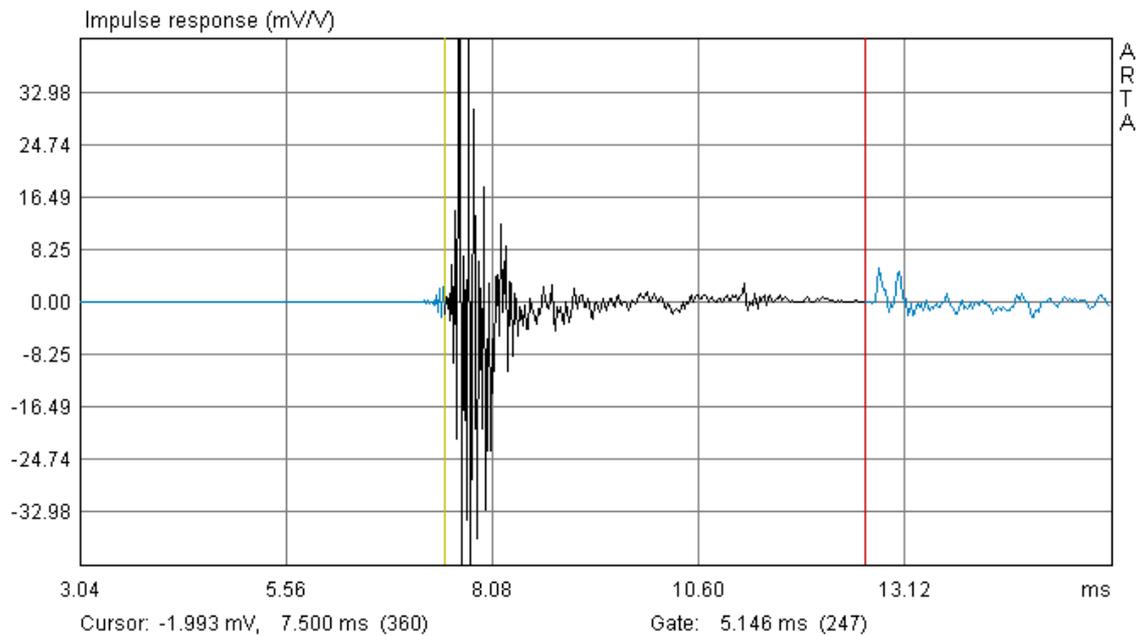


Bild 6.4.4: Impulsantwort Fernfeld (48 cm) mit Gate

Unter dem Diagramm wird die Länge des Gates in ms angezeigt. Kurzer Crosscheck: 5,146 ms entsprechen 1,77 m Schalllaufzeit. Das stimmt exakt mit den theoretischen Überlegungen aus dem Beispiel im vorangehenden Kapitel überein.

Nach der Auswertung mittels  erhalten Sie folgende vorläufige Kombination aus Nah- und Fernfeldfrequenzgang (Bild 6.4.5). Es ist zu sehen, dass die Pegelanpassung recht gut funktioniert hat.

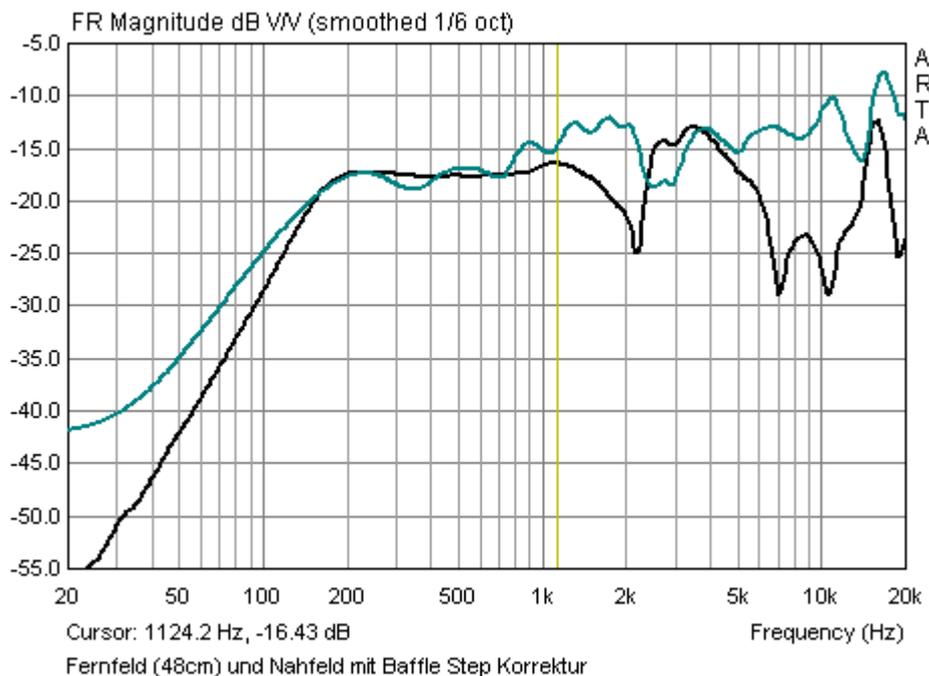


Bild 6.4.5: „Rohfrequenzgang“ Nah- und Fernfeld

Jetzt bestimmen Sie die Frequenz, an der der Übergang oder besser der Schnitt erfolgen soll. Im hier gezeigten Beispiel bietet sich eine Frequenz von ca. 240 Hz an.

Edit	View	Smoothing	Overlay
Copy			
Colors			
Cut below cursor			
Cut above cursor			
Scale level			
Subtract overly			
Subtract from overlay			
Power average overlays			
Merge overlay below cursor			
Merge overlay above cursor			

Jetzt setzen wir den Cursor (gelbe Linie) auf die gewünschte Übergangsfrequenz und gehen ins Menü ‚Edit‘.

Mit dem Befehl ‚Merge overlay below cursor‘ wird der als Overlay definierte Nahfeldfrequenzgang links des Cursors an den Fernfeldfrequenzgang angefügt und der Fernfeldfrequenzgang links des Cursors gelöscht (s. Bild 6.4.6).

Wenn Sie im Menü ‚Overlay‘ alle noch vorhandenen Overlays löschen, sehen Sie den verbleibenden Gesamtfrequenzgang.

Insgesamt sieht der Übergang recht sauber aus, das gilt auch für die Phase.

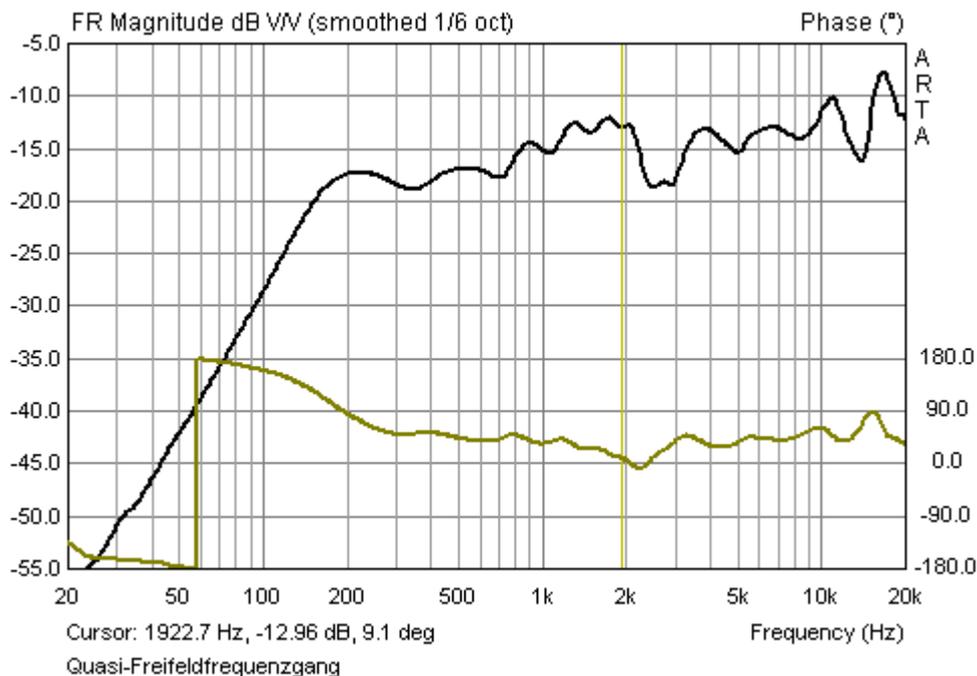


Bild 6.4.6: Gesamtfrequenzgang (Quasi-Freifeld)

#### 5) Export des Summenfrequenzganges

Mit dem Menü **File** → ‚Export ASCII‘ können Sie den zusammengefügten Frequenzgang für die weitere Bearbeitung in Simulationsprogrammen exportieren.

Dabei gibt es zwei Möglichkeiten:

- Export als ASCII-File mit Kommentaren zur Messung
- Export als FRD-Format (ASCII ohne Kopfzeile und Kommentare)

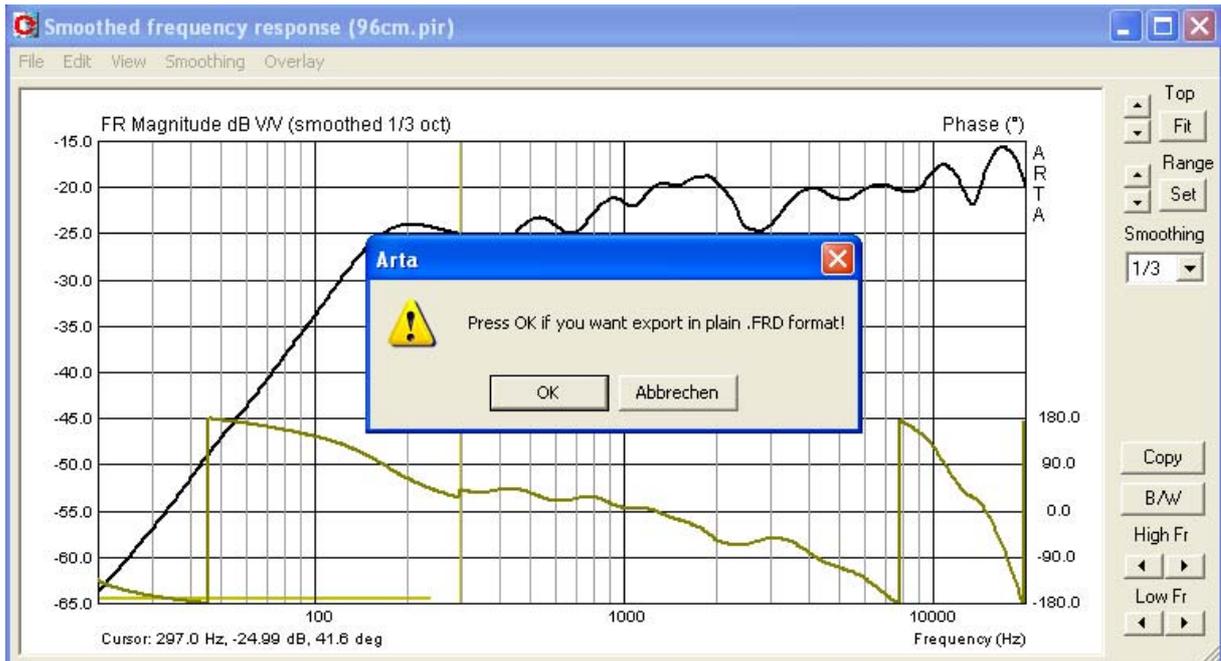
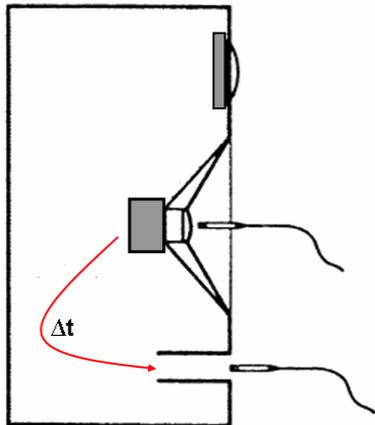


Bild 6.4.7: Export des Gesamtfrequenzganges

Wenn Sie den ASCII-Export wünschen, wählen Sie in der oben gezeigten Abfrage ‚Abbrechen‘, für den FRD-Export wählen Sie ‚OK‘.

### 6.4.2 Bassreflexbox

Der Vollständigkeit halber schauen wir uns noch eine kleine Bassreflexbox im Nahfeld an. Hier haben wir zwei Schallquellen zu berücksichtigen, die Lautsprechermembran und den Reflextunnel. Bis auf diese Erweiterung läuft das Zusammenfügen des Nah- und des Fernfeldfrequenzganges analog zum oben gezeigten Beispiel.



Im gewählten Beispiel beträgt der Durchmesser des Reflextunnels ( $D_p$ ) bzw. der effektive Durchmesser der Lautsprechermembran ( $D_D$ ):

$$D_p = 4,80 \text{ cm}$$

$$D_D = 10,20 \text{ cm}$$

Bild 6.4.8 zeigt die Positionierung des Messmikrofons für die Membran und den Reflextunnel. Wenn Messfehler  $< 1 \text{ dB}$  sein soll, darf der Messabstand nicht größer sein als (siehe [03] oder Kapitel 6.2):

$$\text{Reflextunnel} \rightarrow 0,26 \text{ cm}$$

$$\text{Membran} \rightarrow 0,56 \text{ cm}$$

Bild 6.4.8: Positionierung des Messmikrofons

Bild 6.4.9 zeigt die Impulsantworten der Membran (schwarz) und des Reflextunnels (rot). Der Impuls des Reflextunnels kommt mit ca. 0,72 ms (24,72 cm) Verzögerung am Mikrophon an.

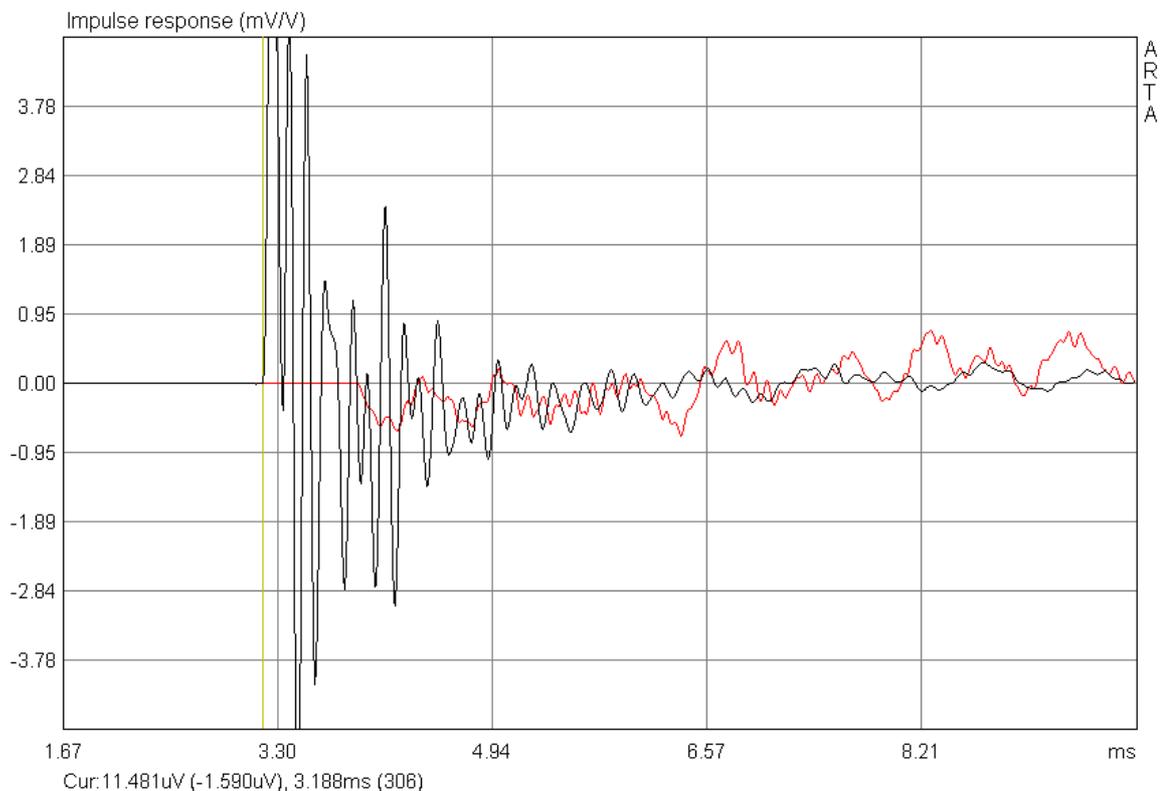


Bild 6.4.9: Impulsantwort von Membran und Reflextunnel

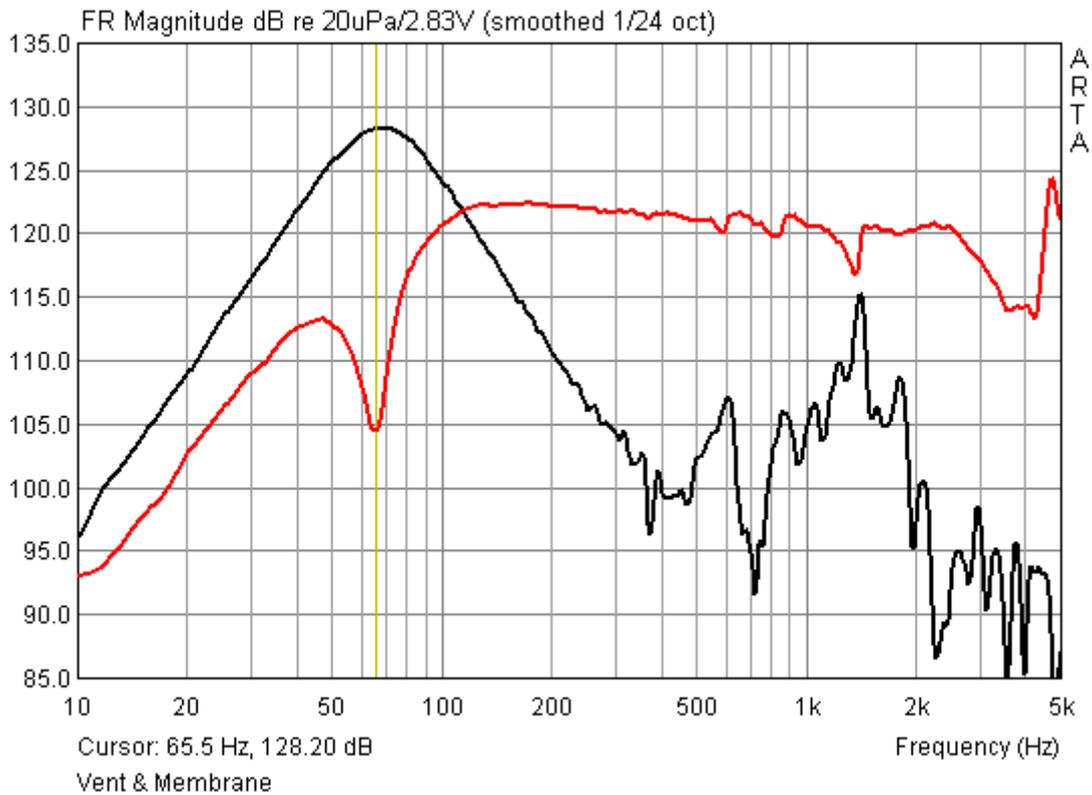


Bild 6.4.10: Membran und Reflextunnel im Nahfeld ohne Pegelkorrektur

Bild 6.4.10 zeigt die Impulsantwort der Membran und des Bassreflextunnels im Nahfeld. Gemäß Bild 6.2.7 kann die Nahfeldmessung bei dem verwendeten 5“-Chassis ( $R_D=5,1$  cm) bis etwa 500 Hz verwendet werden. Auf das Ausblenden der höheren Frequenzen wurde hier verzichtet.

Die Positionierung des Mikrofons erfolgte gemäß Bild 6.4.8. Da Reflextunnel und Membran unterschiedliche Abstrahlflächen haben, müssen wir eine Pegelkorrektur vornehmen.

Berechnung des Korrekturfaktors

$$P_{NF} = P_D + (S_P / S_D)^{0.5} * P_P$$

Pegel  $P_{NF}$  = Nahfeld,  $P_D$  = Pegel Membran,  
 $P_P$  = Pegel Reflextunnel (= Port)

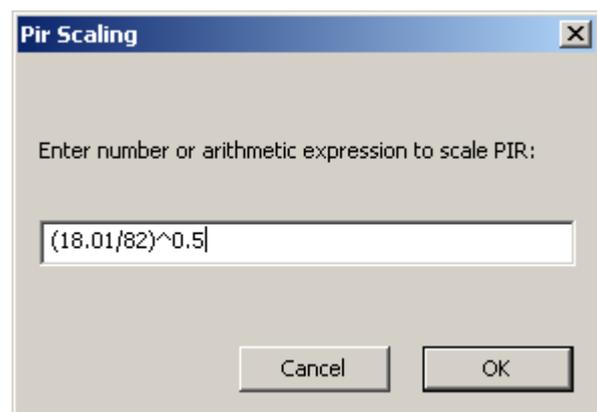
Flächen Port / Membran:

$$S_p = 18,01 \text{ cm}^2$$

$$S_D = 82,00 \text{ cm}^2$$

$S_D$  = Membran,  $S_p$  = Reflextunnel

Bild 6.4.11: Eingabe der Skalierungswerte



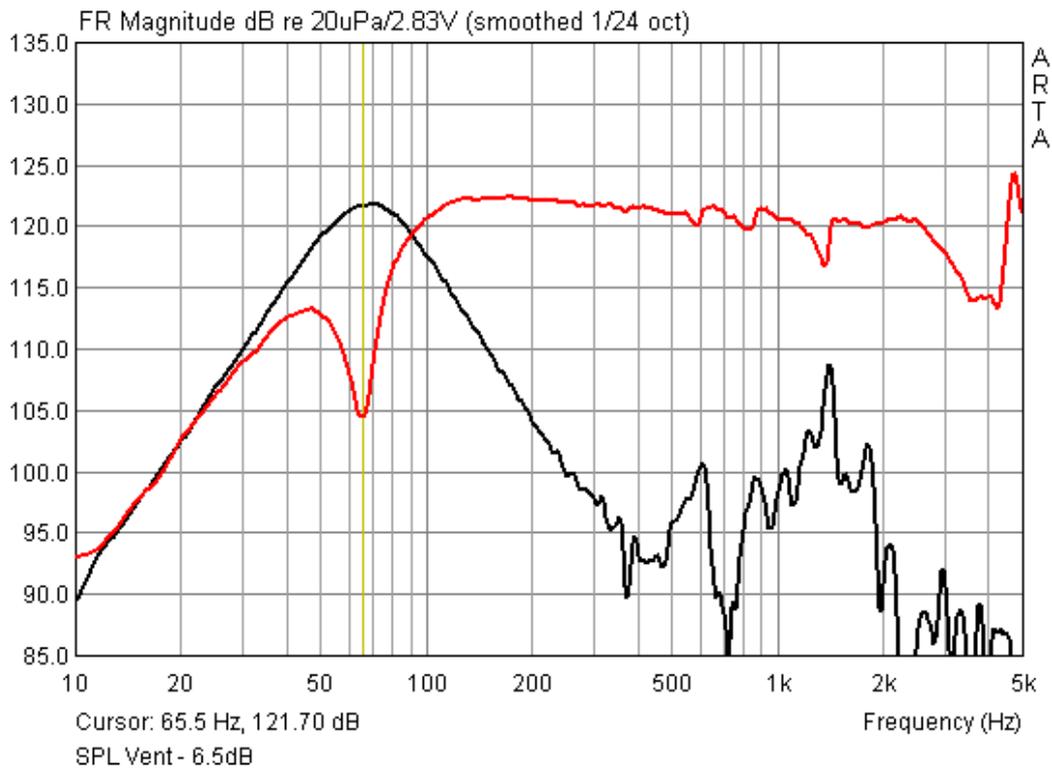


Bild 6.4.12: Membran und Reflertunnel im Nahfeld mit Pegelkorrektur

Bild 6.4.12 zeigt den pegelkorrigierten Frequenzgang des Reflexrohres zusammen mit dem Frequenzgang der Membran. Es ist sehr schön zu sehen, dass das Reflexrohr auch außerhalb des gewünschten Arbeitsbereiches Schall abstrahlt.

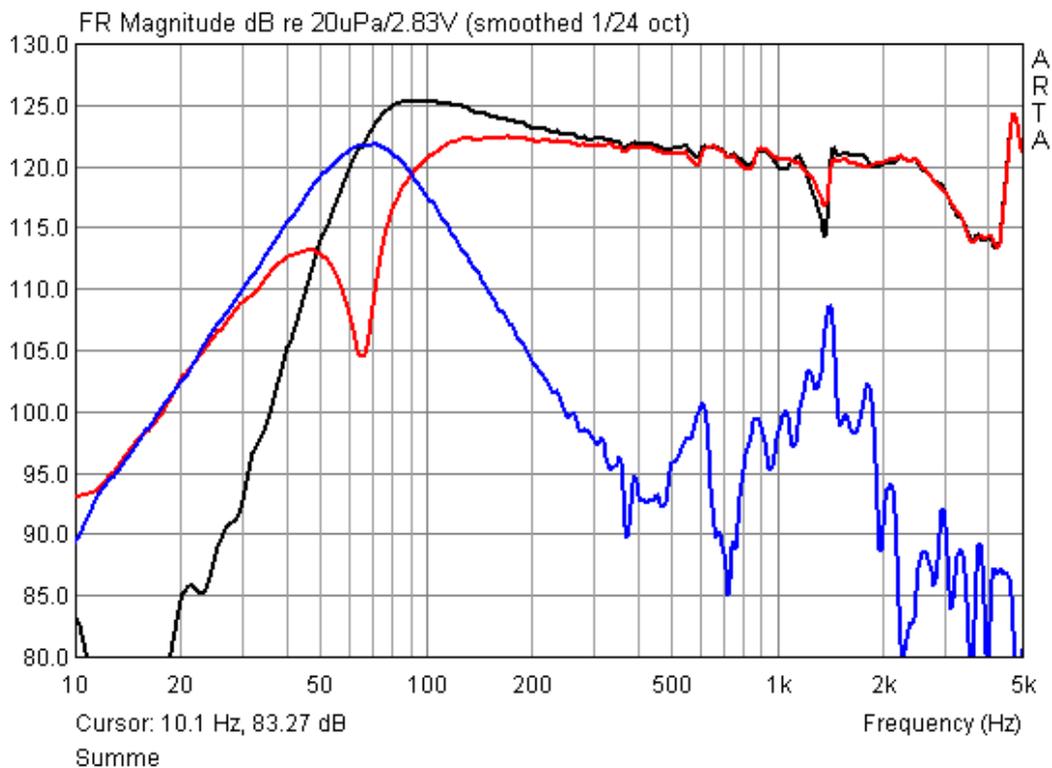


Bild 6.4.13: Summenfrequenzgang (schwarz) von Membran und Reflexrohr

Bild 6.4.13 zeigt den mit **“Load and Sum”** ermittelten Gesamtfrequenzgang im Nahfeld. Er kann bis ca. 500 Hz verwendet werden.

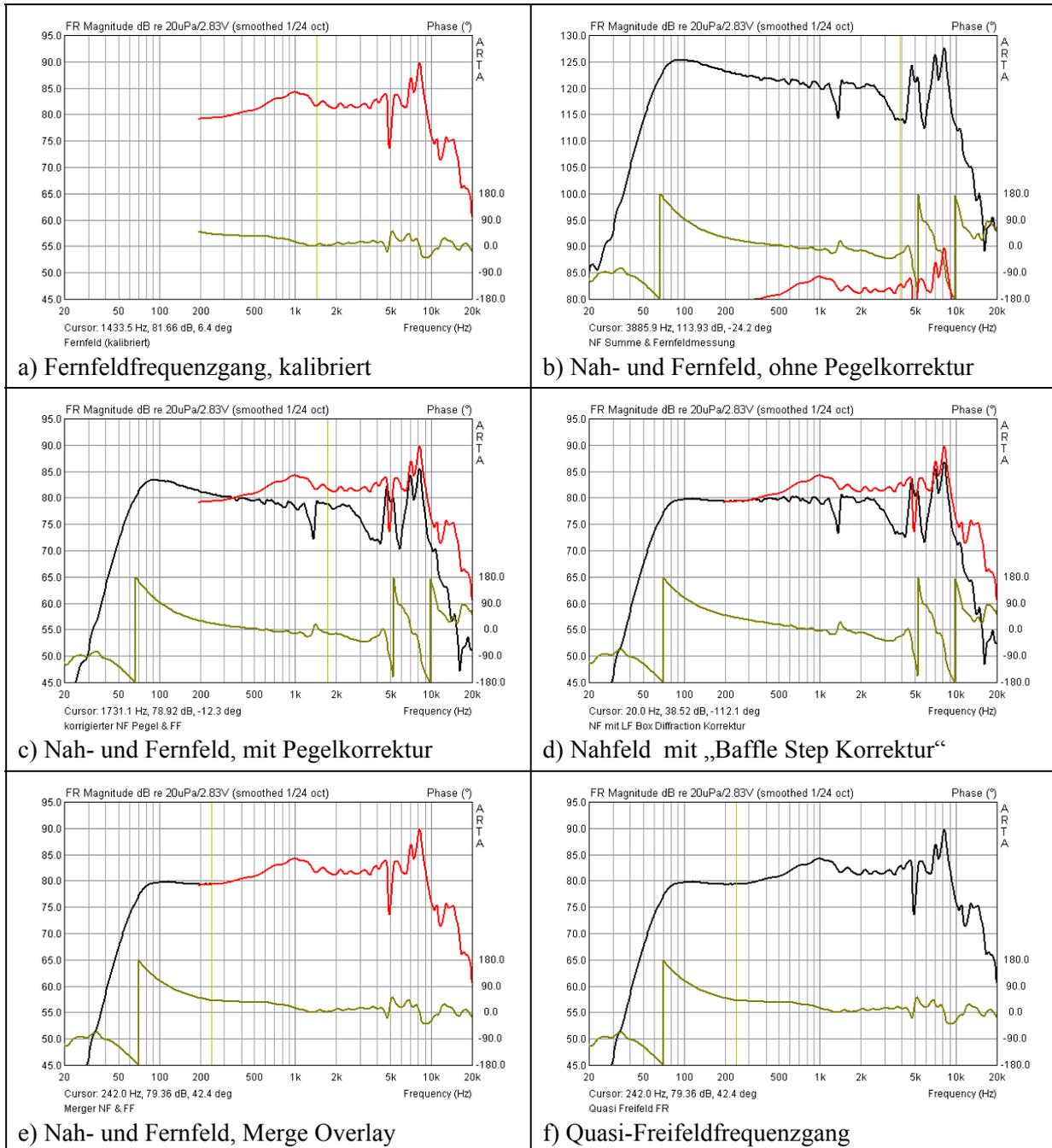


Bild 6.4.14 Entwicklung des Quasi-Freiefeldfrequenzganges für eine Bassreflexbox

Zur Vervollständigung des „Quasi-Freiefeldfrequenzganges“ fehlt jetzt noch die Anpassung an die Fernfeldmessung. Bild 6.4.14a bis Bild 6.4.14f zeigen den gesamten Ablauf in Einzelschritten. Die Pegelanpassung - dargestellt im Teilbild c - kann gemäß der im Abschnitt 6.4.1 beschriebenen Methode mit abschließender „optischer“ Feinanpassung erfolgen. Hierbei ist zu bedenken, dass der Nahfeldfrequenzgang mittels der **„LF Box Diffraction Funktion“** korrigiert werden muss (Teilbild d). Anschließend werden Nah- und Fernfeldfrequenzgang mit der **„Merge Overlay Funktion“** - in diesem Beispiel bei ca. 240 Hz - zusammengefügt (Teilbild e und f).

### Pegelanpassung im Bereich gleicher Volumenflüsse

Auf diese Methode wurde ich von Fabian Reimann aufmerksam gemacht. Vielen Dank Fabian!

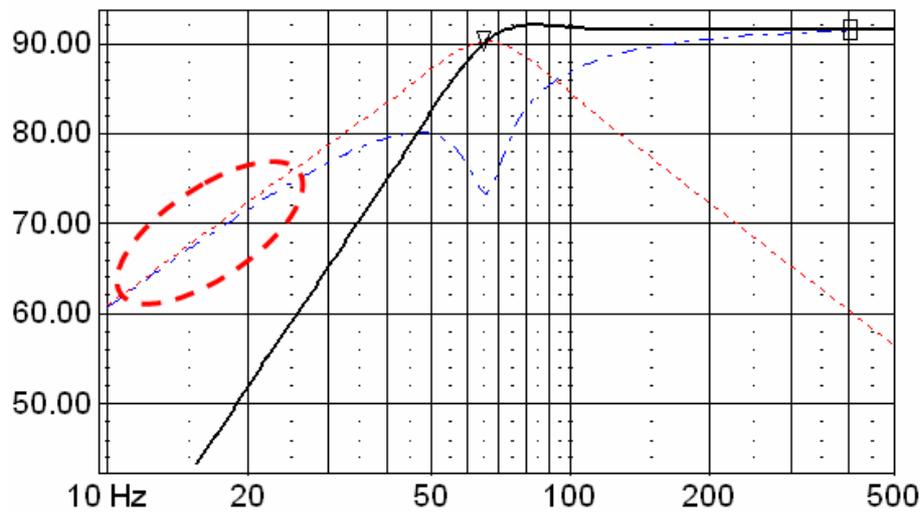


Bild 6.4.15: LspCAD-Simulation

Das Verfahren geht davon aus, dass bei Frequenzen weit unterhalb der Abstimmfrequenz Volumenflüsse und damit auch die Pegel annähernd gleich sind (siehe Bild 6.4.15). Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass es – insbesondere bei tief abgestimmten Boxen - schwierig werden kann, unterhalb der Abstimmfrequenz noch saubere Verläufe zu messen (siehe auch Kapitel 6.0.2, 6.0.3).

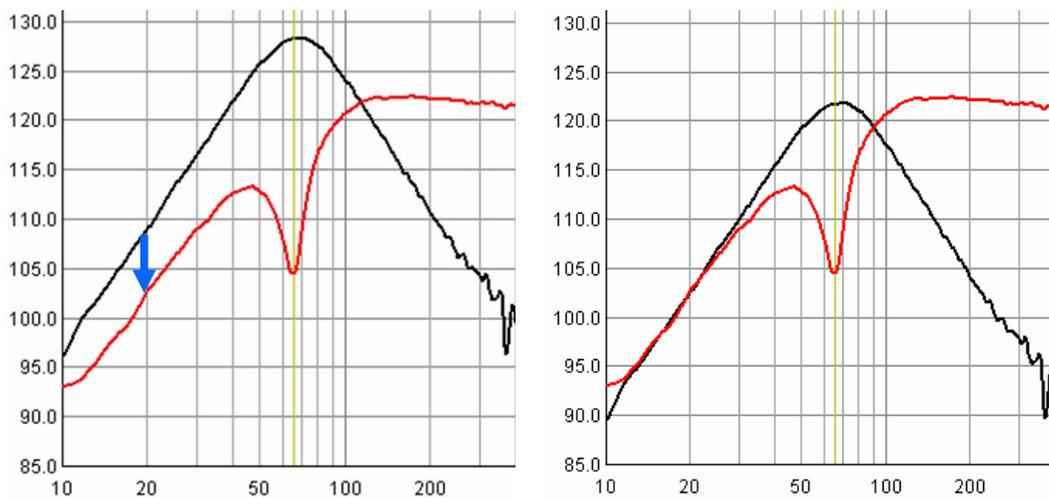
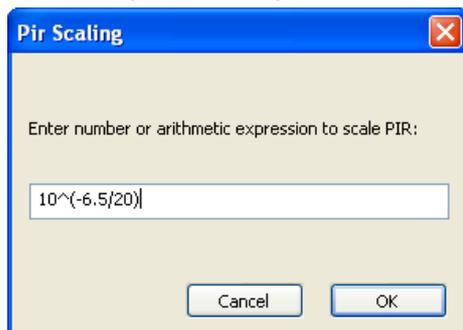


Bild 6.4.16: Volumenflussmethode, Umsetzung in ARTA

Demzufolge ist der Pegel des Reflaxtunnels soweit zu reduzieren (Bild 6.4.16, links, blauer Pfeil), bis er im untersten Frequenzbereich mit dem Pegel der Membran übereinstimmt (s. Bild 6.4.16, rechtes Teilbild).



Im gewählten Beispiel beträgt die erforderliche Reduzierung ca. -6,5 dB. Somit ist der Pegel des Reflaxtunnels um  $10^{(-6.5/20)}$  mittels „Pir Scaling“ zu korrigieren. Der Rest des Verfahrens folgt der weiter oben beschriebenen Standardprozedur.

## 6.5 Load and Sum

Die Funktion „Load and Sum“ ist im aktuellen Handbuch etwas kurz beschrieben und zusätzlich nur schwer zu finden. Dass man in ARTA mit Overlay beliebig viele Einzelfrequenzgänge zwischenspeichern kann, wurde schon beschrieben (siehe Bild 6.5.1).

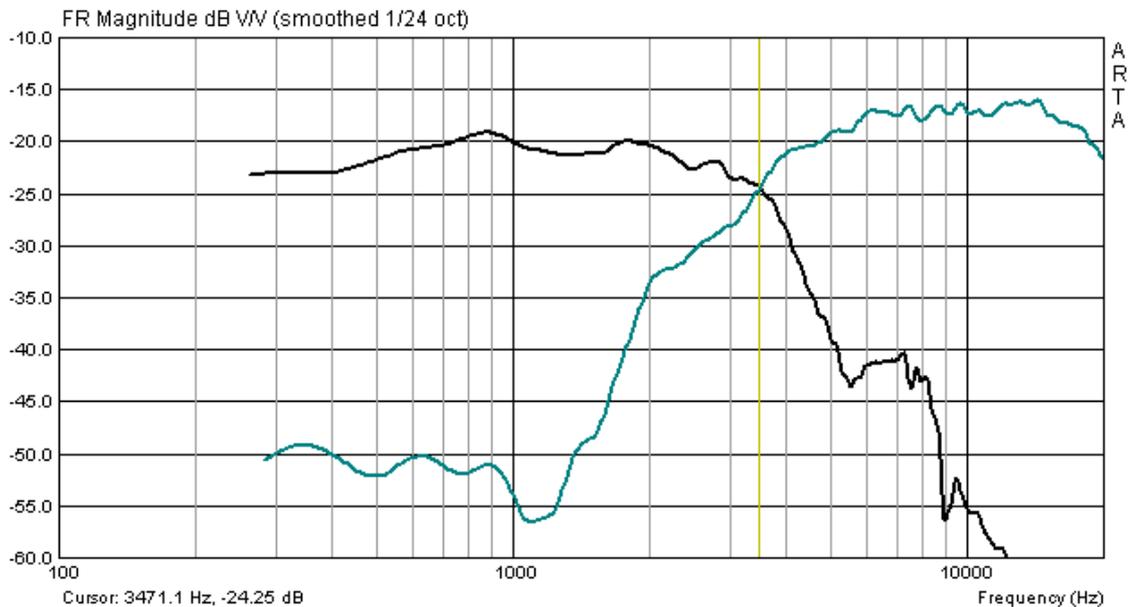


Bild 6.5.1: Darstellung von 1 bis n Einzelfrequenzgängen mit ARTA

Was aber, wenn wir aus gemessenen oder importierten Einzelfrequenzgängen einen Summenfrequenzgang bilden wollen?

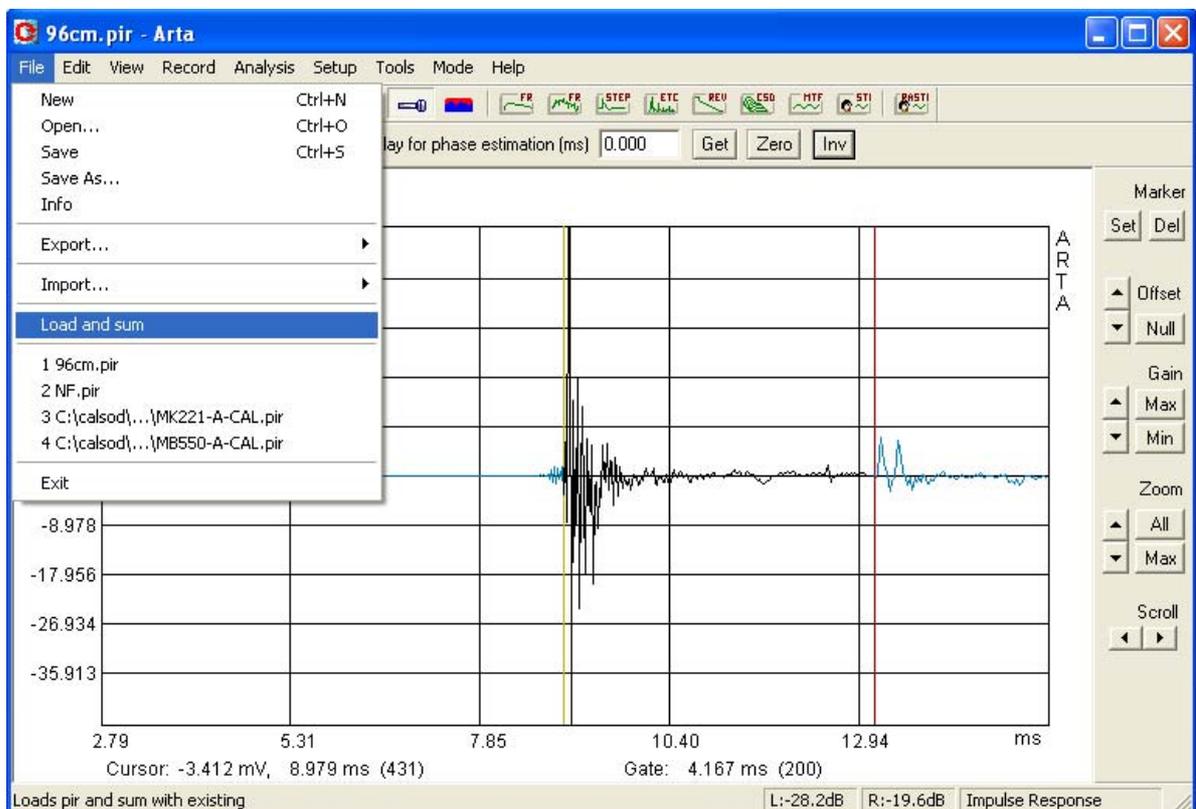


Bild 6.5.2: Das ARTA-File-Menü

Es gibt zwei Möglichkeiten:

- Daten als ASCII exportieren und die Summierung in einem Simulationsprogramm vornehmen
- Mit „Load and Sum“ direkt in ARTA

„Load and Sum“ –zu finden im File-Menü - lädt ein bereits gespeichertes PIR-File und summiert es zum aktuellen Signal im Speicher. Man kann also mit ARTA Signale im Zeitbereich aufsummieren. Das hört sich zunächst nicht so spannend an, es ist aber dennoch eine nützliche Funktion, die einem das Leben z.B. bei der Entwicklung von Weichen erleichtern kann.

Im Detail funktioniert es genau wie im Original-Handbuch beschrieben:

- Messen oder Laden des ersten PIR-Files (z.B. HT)
- ein bereits gespeichertes PIR-File mit „Load and Sum“ laden (z.B. TT)
- Summenimpuls mit  auswerten.

Das Ergebnis sollte die Summe der Einzelfrequenzgänge sein (s. Bild 6.5.3).

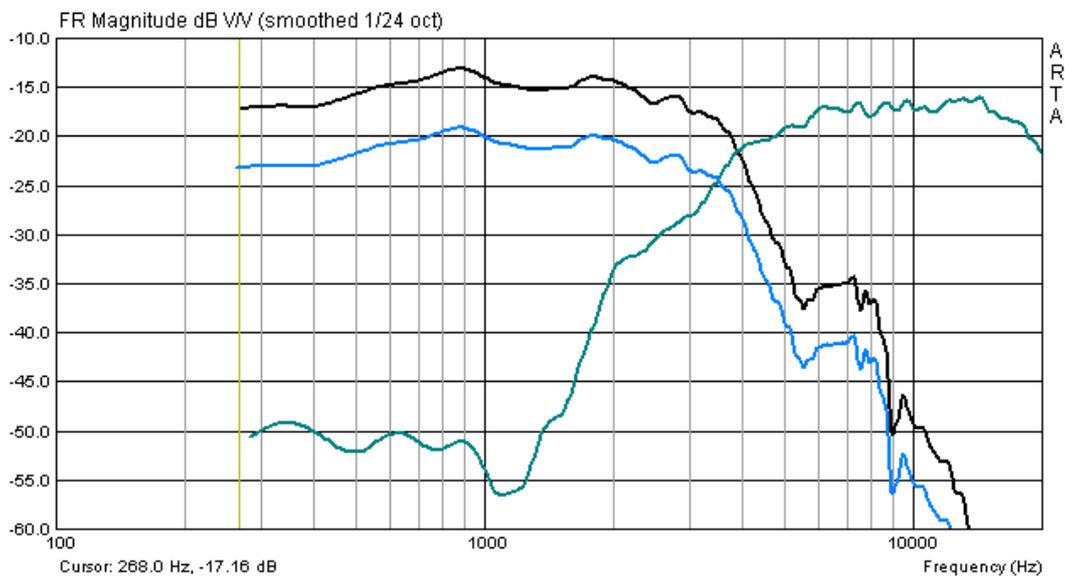


Bild 6.5.3: „Load and Sum“ mit zwei Einzelfrequenzgängen

Ups, was ist das? Das sollte eigentlich anders aussehen! Das ist dadurch zu erklären, dass ARTA den neu geladenen Impuls immer auf die Daten im Speicher aufsummiert. Also aufpassen, nicht immer ist der Fehler sofort zu sehen.

Wie sollte es mit Sicherheit funktionieren? Auch hier hilft das File-Menü (s. Bild 8.6).

Mit „New“ wird der Speicher gelöscht und dem jungfräulichen Start steht nichts mehr im Wege:

- File A (z.B. TT) normal mit „Open“ laden
- File B (z.B. HT) mit „Load and Sum“ laden
- Auswerten, fertig (s. Bild 8.4)

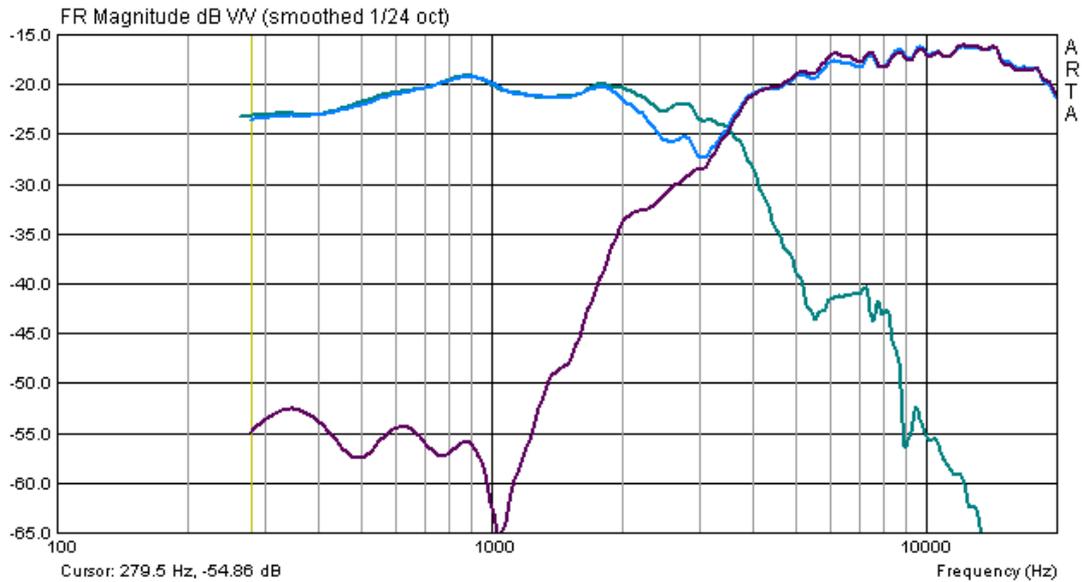


Bild 6.5.4: Summierung mit ARTA (Speicher vorher gelöscht)

Ups zum Zweiten. Anscheinend wurde nicht auf die richtige Polung geachtet.

Wie kann nun z.B. der Hochtöner umgepolt werden? Same Procedure!

- Mit „New“ den Speicher löschen,
- File B (HT) normal laden und mit „INV“ die Phase invertieren.



- File A (TMT) mit „Load and Sum“ laden
- Auswerten, fertig (s. Bild 6.5.5)

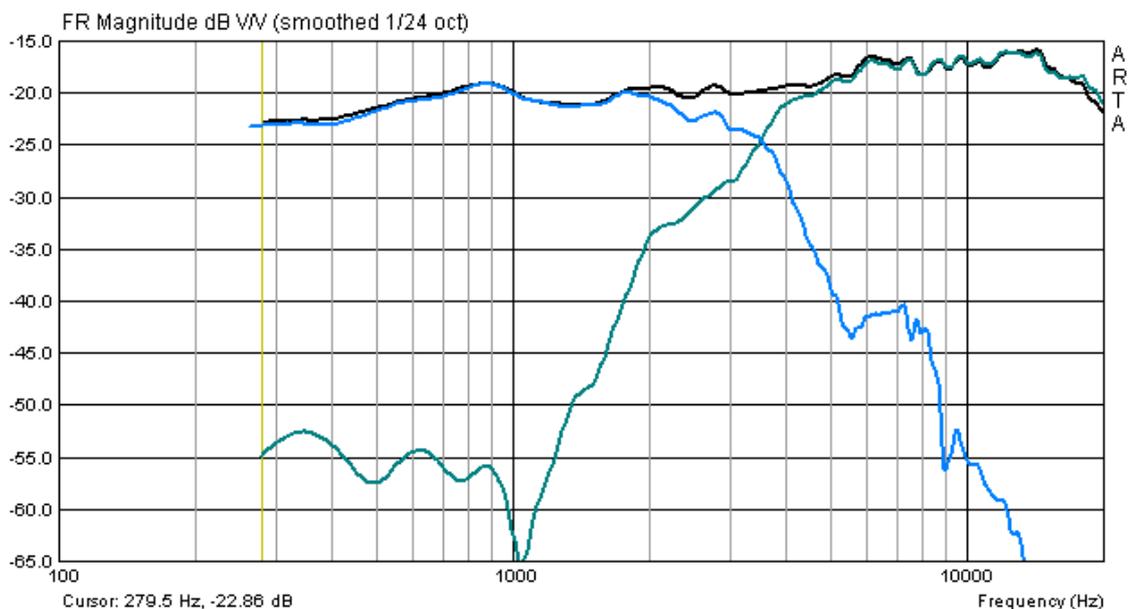
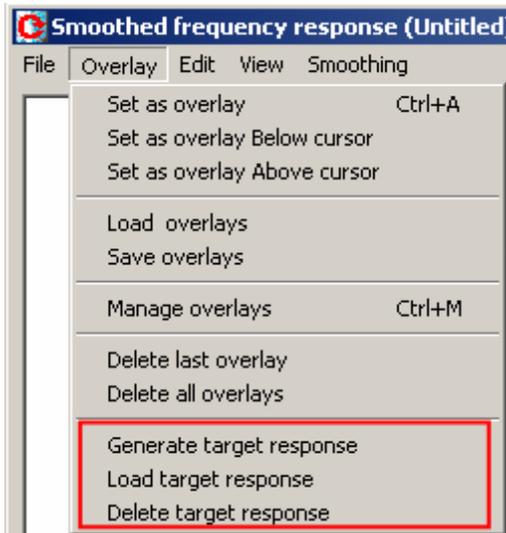


Bild 6.5.5: Load and Sum mit invertierter Phase (HT)

## 6.6 Arbeiten mit Targets

Targets - oder auch Zielfunktionen - sind in vielen Situationen des Messalltags hilfreich, z.B. bei der Entwicklung von Frequenzweichen, der Erklärung von Schallwandeffekten oder der Bestätigung von Simulationen durch Messungen.



Targets stehen in ARTA in der Ansicht „IMP → Smoothed Frequency Response“ sowie in „FR1“ und „FR2“ zur Verfügung und sind dort jeweils im Menü „Overlay“ zu finden (siehe links).

Es können mittels „Generate target response“ gängige Standardfilterfunktionen generiert werden, oder mit „Load target response“ ein beliebiger Funktionsverlauf als Fremddatei geladen werden. Es werden die Formate txt und frd akzeptiert. Die Funktion „Delete Target Response“ löscht alle angezeigten Targets.

### Standardfilterfunktionen als Target

Das Menü zur Abbildung von Standardfilterfunktionen „Target Filter Response“ wird über „Generate Target Response“ erreicht (siehe Bild 6.6.1). Mittels „Reference passband

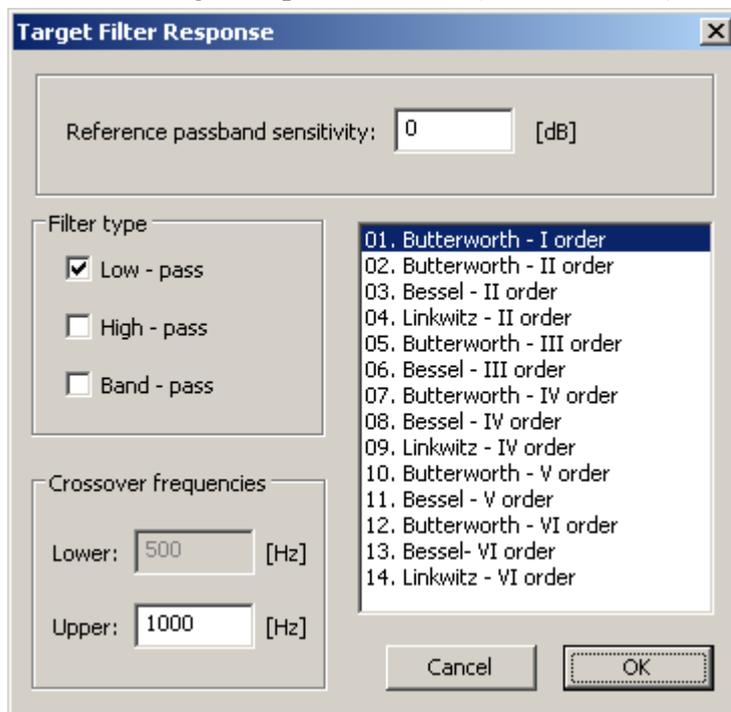
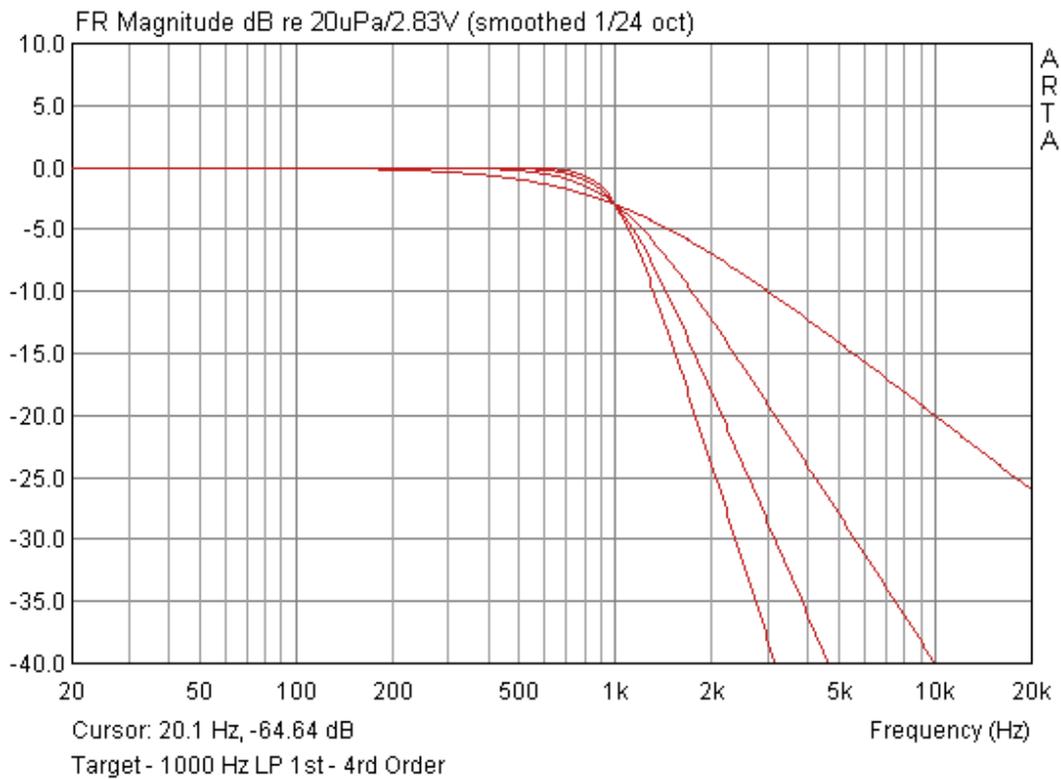


Bild 6.6.1: Menü „Target Filter Response“

sensitivity“ wird der Pegel der Targetfunktion festgelegt.

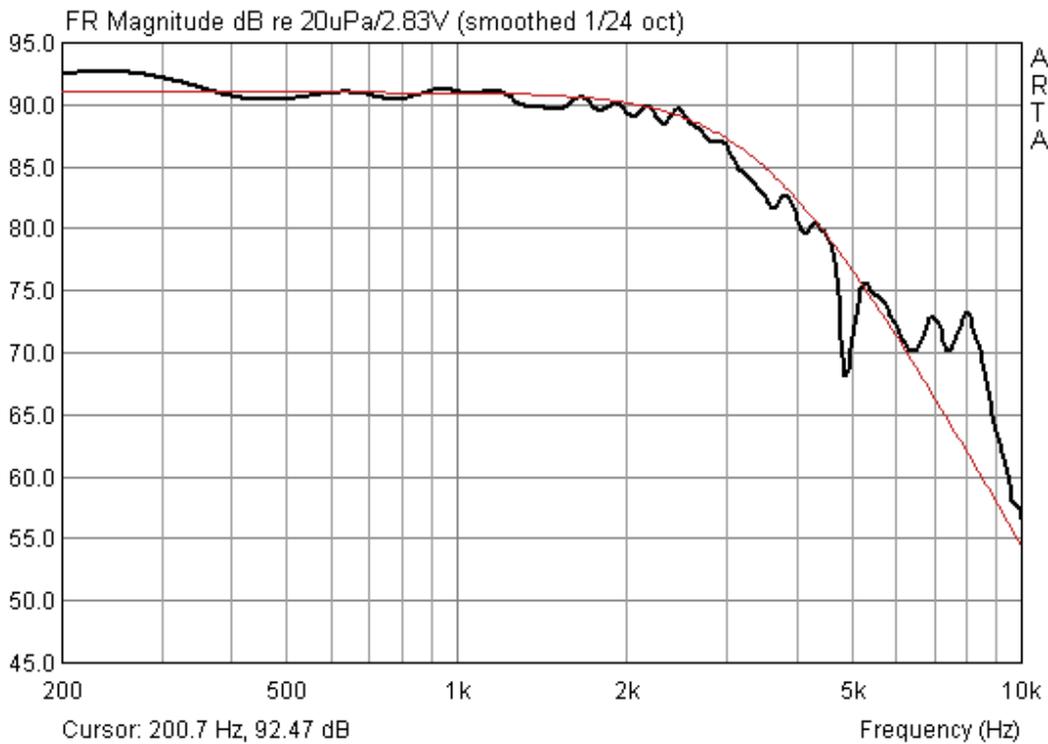
Über die Wahl von „Filter type“ (High-, Low-, Band Pass), der Filterart (Butterworth, Bessel, Linkwitz) inklusive der Filterordnung und der Übergangsfrequenzen (**Crossover Frequencies**) wird die Target-Funktion bestimmt. Durch Bestätigung von „Ok“ wird die Target-Funktion geplottet.

Der Vorgang kann beliebig oft wiederholt werden (siehe Bild 6.6.2), alle generierten Targets bleiben erhalten, bis sie aktiv mit „Delete target response“ gelöscht werden. Eine selektive Löschung einzelner Kurven ist nicht möglich.



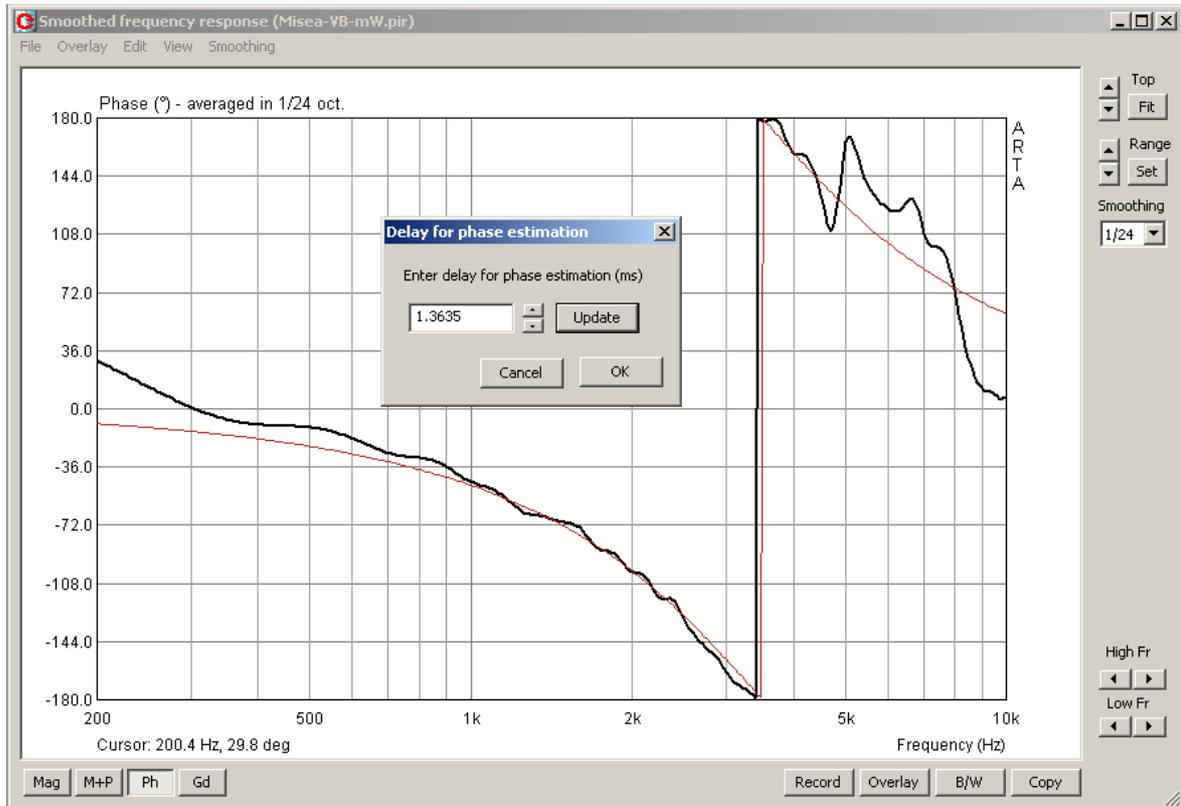
**Bild 6.6.2:** Beispiel-Targets: Filterfunktionen verschiedener Ordnung

Standardfilterfunktionen können bei der Entwicklung von Frequenzweichen als Orientierungshilfe nützlich sein. Man gibt die gewünschte Zielfunktion vor und versucht sich über die Variation der Filterbauteile dieser anzunähern (s. Bild 6.6.3).



**Bild 6.6.3:** Target und gemessener Frequenzgang eines Weichenzweiges

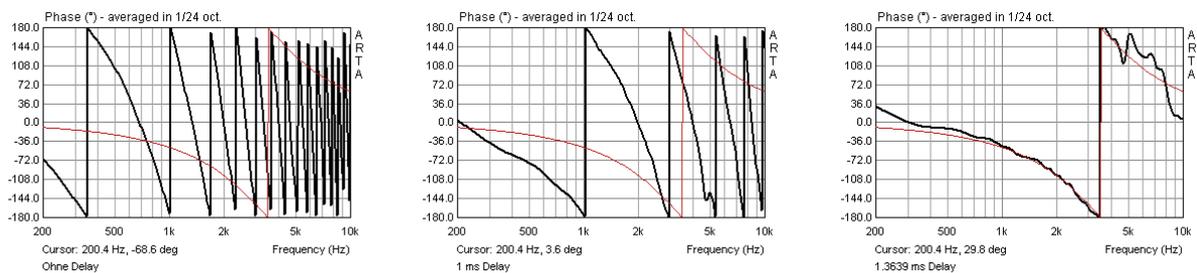
Im Messmodus „FR1“ und „FR2“ kann dieses auch „online“ erfolgen. Insbesondere bei Verwendung variabler Induktivitäten und Kapazitäten ist das Verfahren sehr effektiv.



**Bild 6.6.4:** Target und gemessener Phasengang eines Weichenzweiges

Die Targetfunktion ist nicht nur auf den Frequenzgang sondern auch auf den Phasengang anwendbar (s. Bild 6.6.4). In diesem Kontext kann noch eine weitere interessante Möglichkeit von Targetfunktionen in Verbindung mit der Funktion „**Delay for Phase Estimation**“ aufgezeigt werden (zu finden unter Edit → Delay for Phase Estimation).

Durch Einfügen eines Delays kann die gemessene Phase an die Targetfunktion angenähert werden (s. Bild 6.6.5). Die Originalmessdaten werden dadurch nicht verändert, beim Datenexport wird das eingefügte Delay jedoch berücksichtigt.

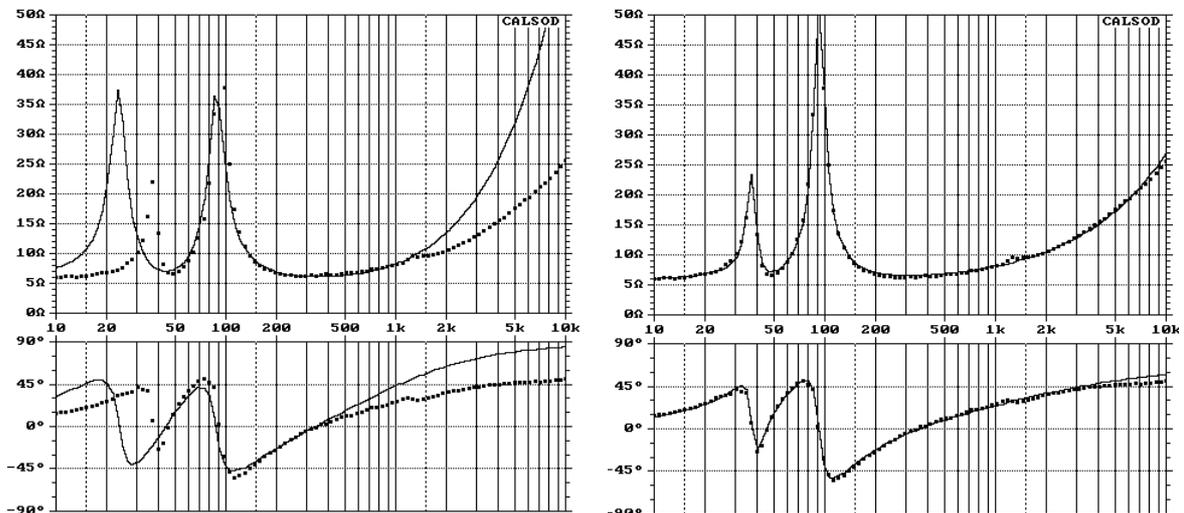


**Bild 6.6.5:** Targetphase und gemessener Phasenverlauf mit 0.0ms, 1.0ms und 1.3639ms Delay

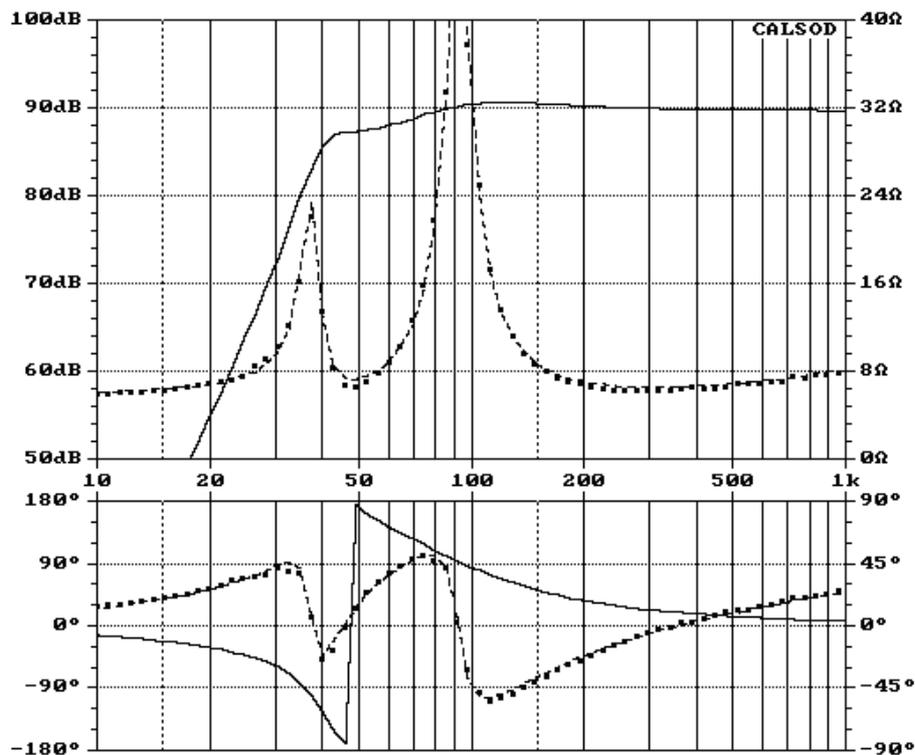
### Beliebige Targetfunktionen

Wenn die gewünschte Zielfunktion nicht über die Standardfilterfunktionen abbildbar ist, so können beliebige Funktionen über „**Load Target Response**“ importiert werden. Soweit bekannt, werden alle Exporte aus Simulationsprogrammen mit der Endung „.txt“ bzw. „.frd“ akzeptiert.

Im ersten Beispiel soll die Simulation einer Bassreflexbox mit CALSOD durch Messung verifiziert werden. Die Simulation beinhaltet eine Besonderheit, die Lautsprecher- und Gehäuseparameter werden aus der Impedanzmessung des Prototyps ermittelt. Withold Waldman hat das Verfahren 1993 anlässlich der AES Convention in München vorgestellt und in CALSOD implementiert [28]. Bild 6.6.6 zeigt den Impedanzverlauf vor und nach der Parameteroptimierung mit CALSOD (Messung ·····, Simulation —).

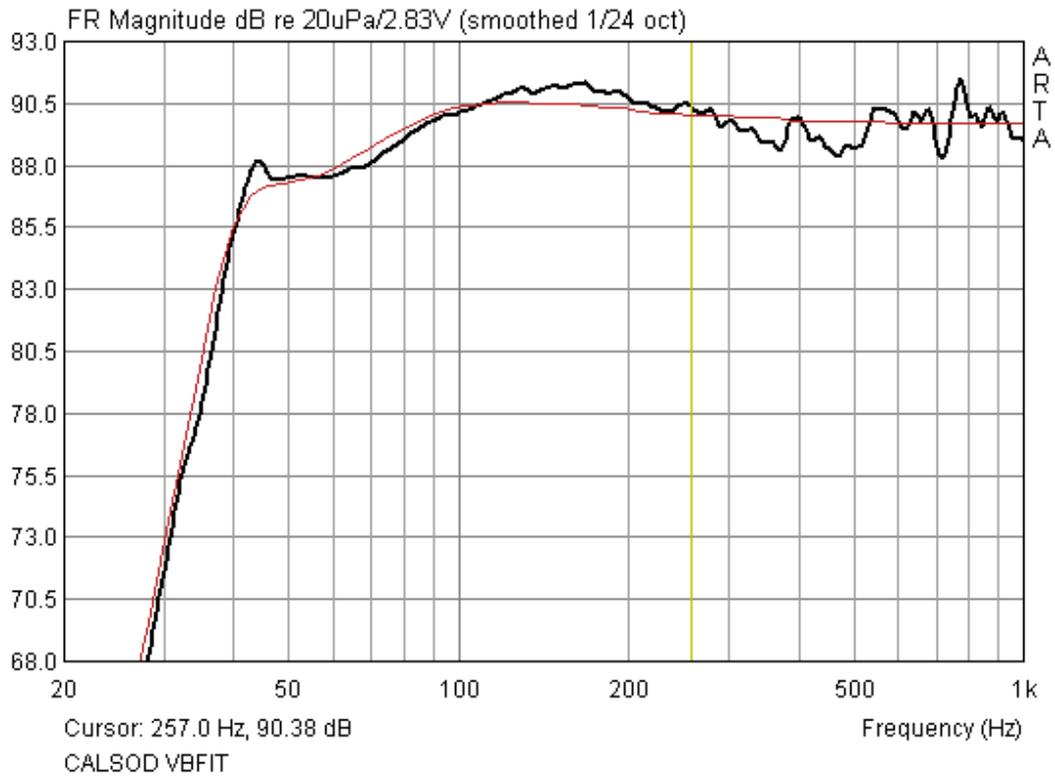


**Bild 6.6.6:** Ermittlung der TSP aus dem Impedanzverlauf einer Bassreflexbox mit CALSOD. Vor (links) und nach der Parameteroptimierung (rechts).

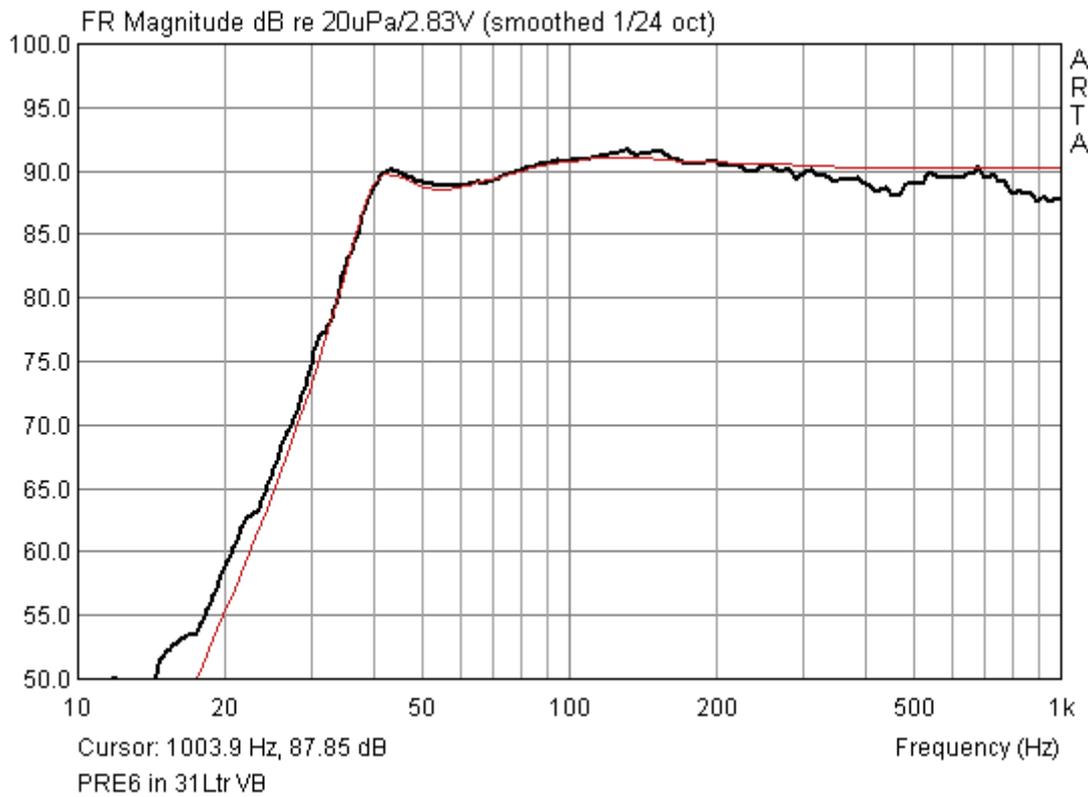


**Bild 6.6.7:** Aus ermittelten Parametern berechneter Frequenzgang

Bild 6.6.7 zeigt den berechneten Frequenzgang für den gemessenen Prototyp. Die dafür erforderlichen Parameter wurden aus dem Impedanzgang berechnet. Bild 6.6.8 und Bild 6.6.9 zeigen den Vergleich zwischen Messdaten (schwarz) und den Simulationsdaten (rot) für zwei unterschiedliche Gehäusegrößen und Abstimmungen.

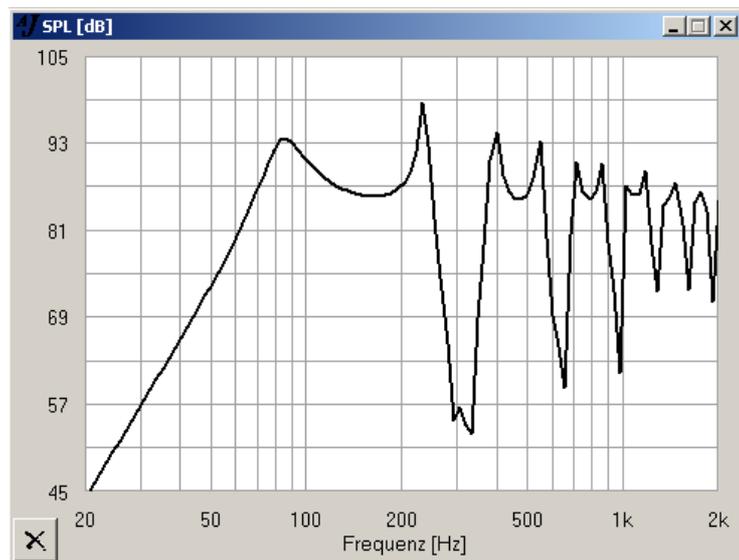


**Bild 6.6.8:** Vergleich Simulation (rot) mit Messung (schwarz) für VB=18 ltr



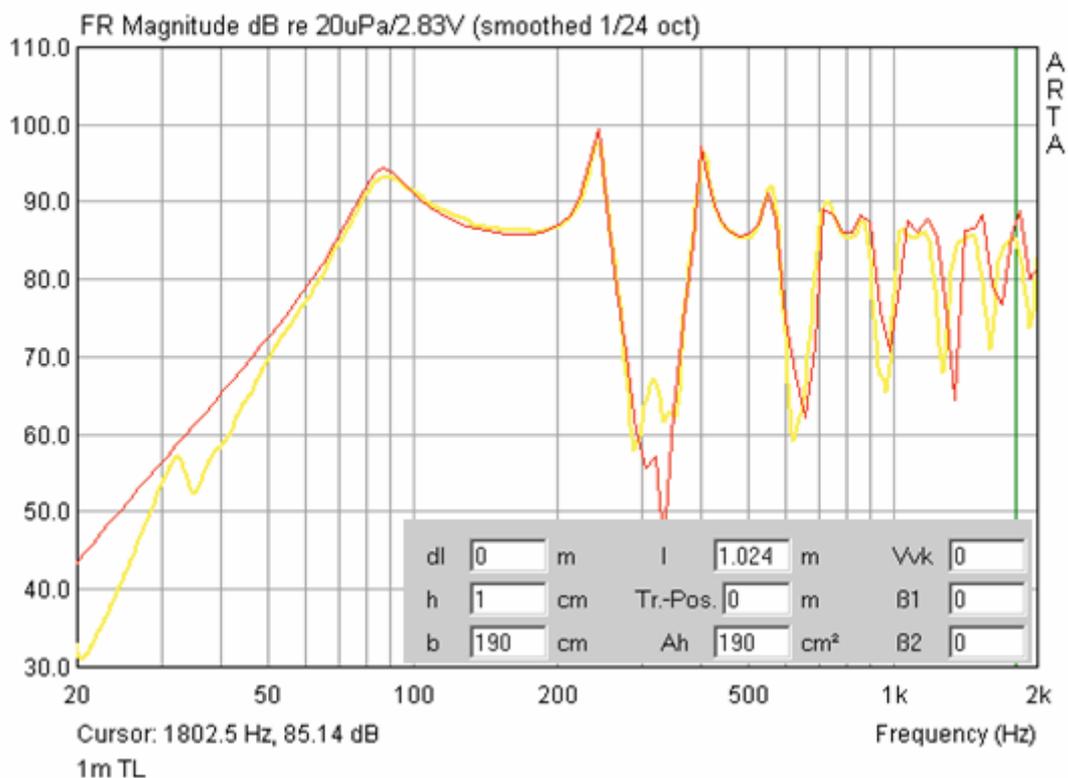
**Bild 6.6.9:** Vergleich Simulation (rot) mit Messung (schwarz) für VB=31 ltr

Im zweiten Beispiel soll die Simulation einer 1m langen Transmission Line (TL) durch Messung verifiziert werden. Die Simulation wurde mittels AJHorn 5.0 ([www.aj-systems.de](http://www.aj-systems.de)) von Armin Jost vorgenommen und die Daten anschließend exportiert (s. Bild 6.6.10).



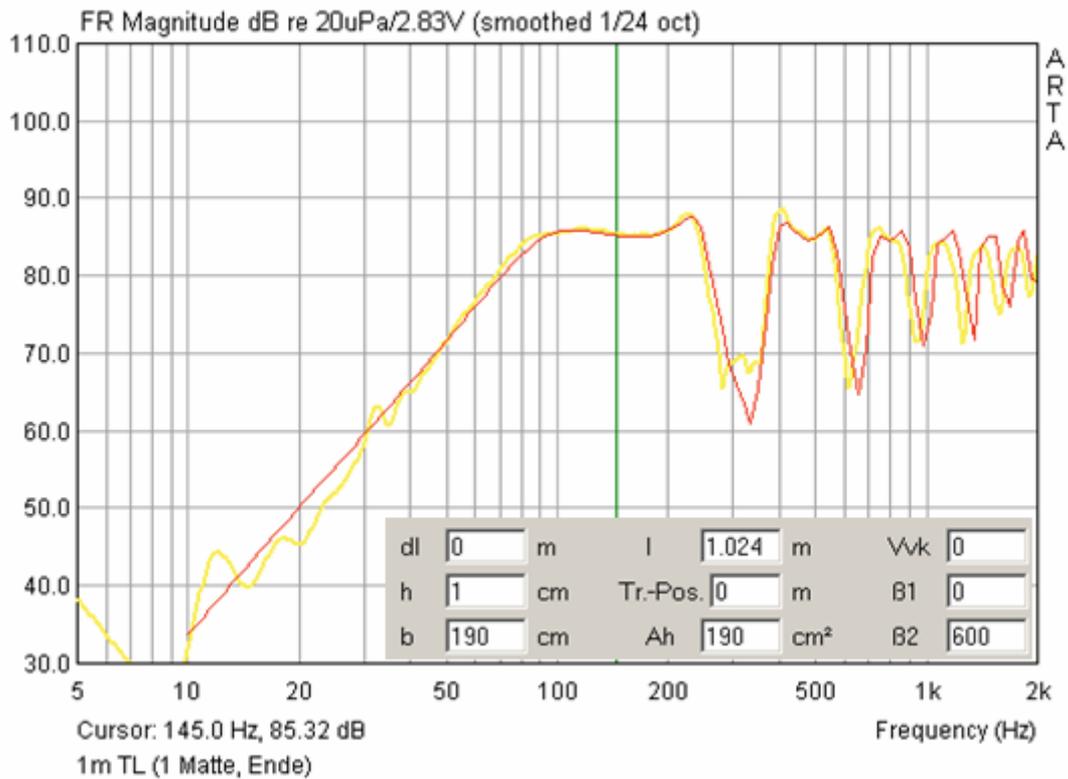
**Bild 6.6.10:** Simulation einer 1m langen TL mit AJH

Die Nahfeldmessungen an Membrane und am Ende der TL wurden unter Anwendung der Volumenflussmethode zusammengefügt (s. Kapitel 6.4.2).



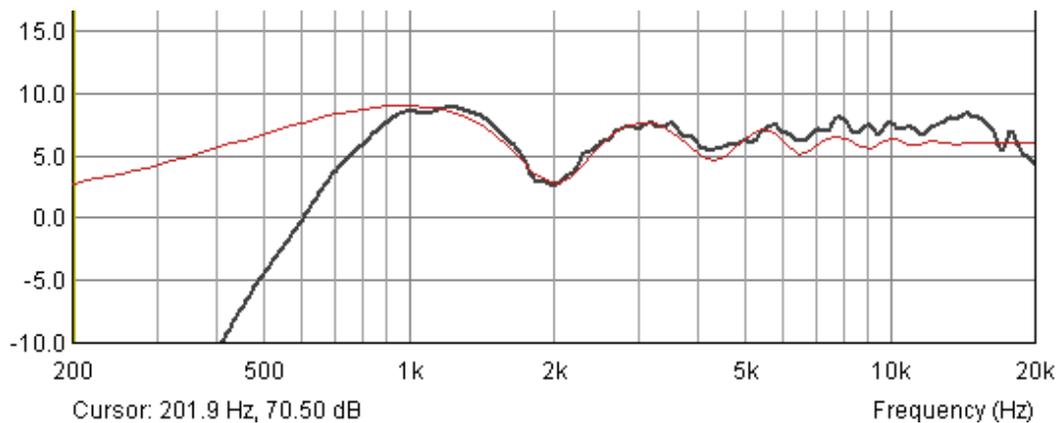
**Bild 6.6.11:** Importierte Targetfunktion (rot) vs. Messung (gelb)

Bild 6.6.11 zeigt Messung und Simulation in einem Diagramm mit erstaunlich guter Übereinstimmung. In Bild 6.6.12 wird der Einfluss einer Dämpfung am Ende der TL untersucht. Im Bild sind die in AJH eingestellten Parameter ausgewiesen.



**Bild 6.6.12:** Einfluss einer Dämpfung am Ende der TL

Im dritten Beispiel soll die Simulation des Einflusses einer Schallwand mit EDGE ([www.tolvan.com/edge](http://www.tolvan.com/edge)) messtechnisch verifiziert werden. Auch EDGE bietet eine Exportfunktion für die simulierten Daten an.



**Bild 6.6.13:** Einfluss der Schallwand: EDGE Simulation (rot), Messung (grau)

Im Bild 6.6.14 wird eine kleine Spielerei vollzogen, die Messdaten (blau) wurden mit den Daten der EDGE Simulation (grün) korrigiert. Die rote Kurve stellt dann den Schalldruckverlauf ohne Schallwandeffekte dar, was in etwa der Messung auf einer Normschallwand entspricht. Sie gilt allerdings nur für die im Beispiel realisierte Messposition!

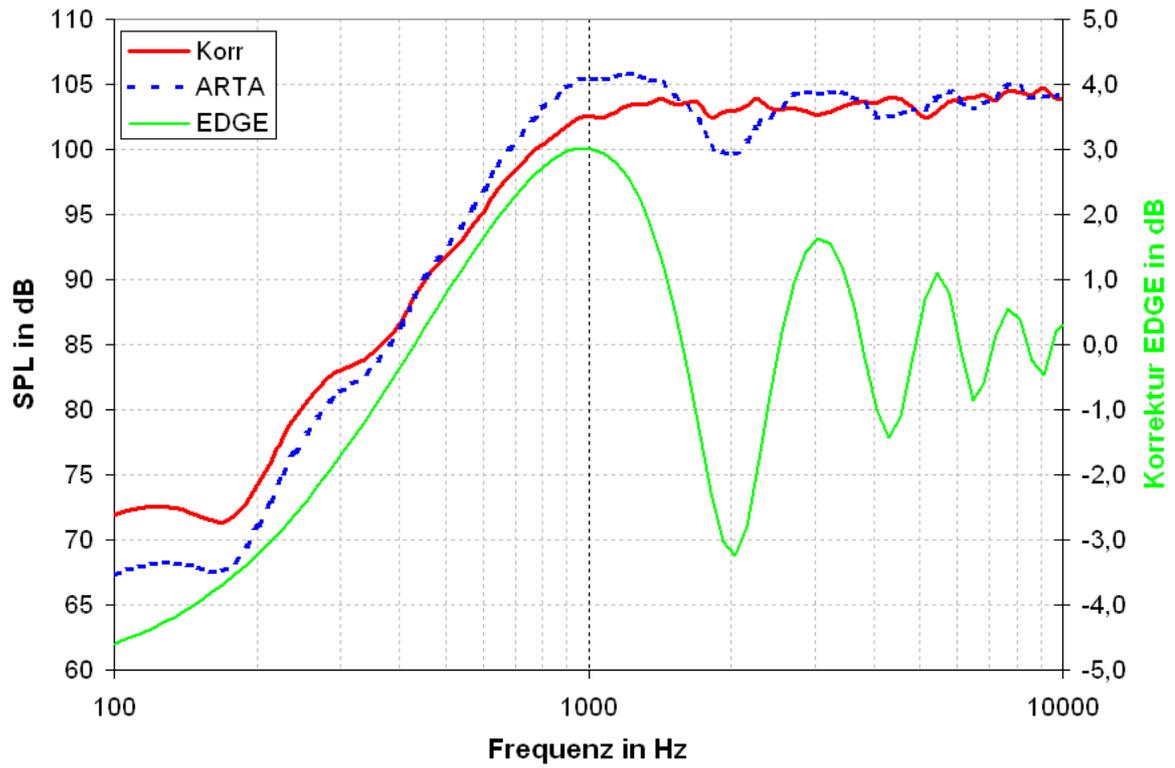


Bild 6.6.14: Korrektur des Schallwandeinflusses für die Messposition

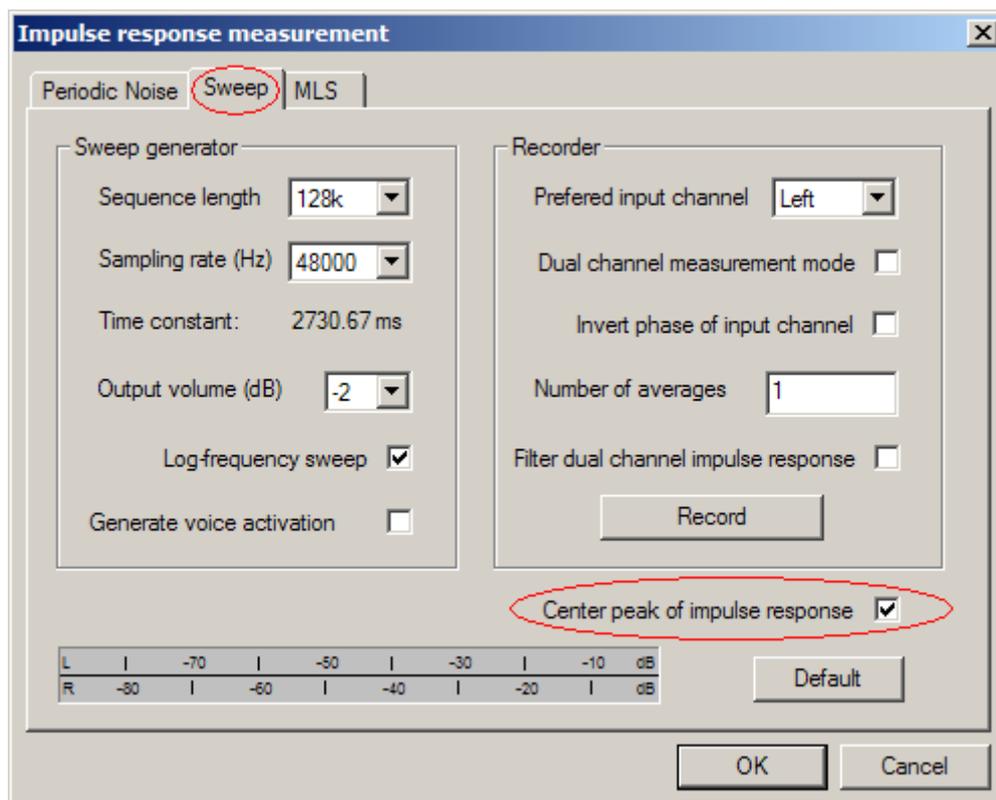
## 7. Sondermessungen und Beispiele

### 7.1 Messen von harmonischen Verzerrungen mit Gleitsinus

Mittels einer von Farina [13] vorgestellten Methode kann Gleitsinus zur schnellen simultanen Ermittlung von Frequenzgang und harmonischen Verzerrungen genutzt werden. Es ist jedoch keine voll erprobte Methode, denn sie liefert Ergebnisse, in denen nicht alle anderen Verzerrungstypen, Reflexionen oder durch Rauschen induzierte Artefakte von den harmonischen Teilen isoliert sind. Dennoch ist die Methode sinnvoll, denn sie ermöglicht eine schnellere Einsichtnahme in die Struktur und Frequenzcharakteristik von harmonischen Verzerrungen, als es mit anderen Methoden möglich ist. Zur Erzielung guter Ergebnisse sollten die Messungen in Räumen mit geringem Nachhall und wenig impulshaltigen Störgeräuschen durchgeführt werden [15].

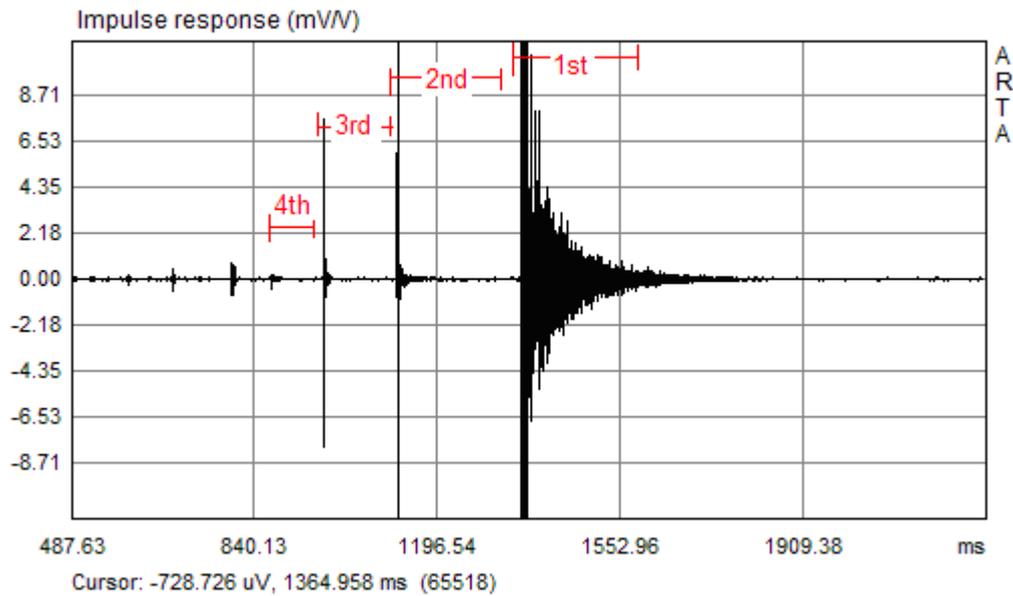
Im Folgenden wird die Ermittlung von Frequenzgang und harmonischen Verzerrungen mittels der automatisierten Methode beschrieben, die ab ARTA-Version 1.3 implementiert ist. Für die Messung hat der Anwender folgende Schritte durchzuführen:

1. Im Sweep-Mode die Einkanalmessung aktivieren (Dual channel measurement mode deaktivieren)
2. Setzen der Checkbox 'Center peak of impulse response' (Bild 7.1.1)



**Bild 7.1.1:** ARTA Setup Menü für die Messung der Impulsantwort mit Gleitsinus

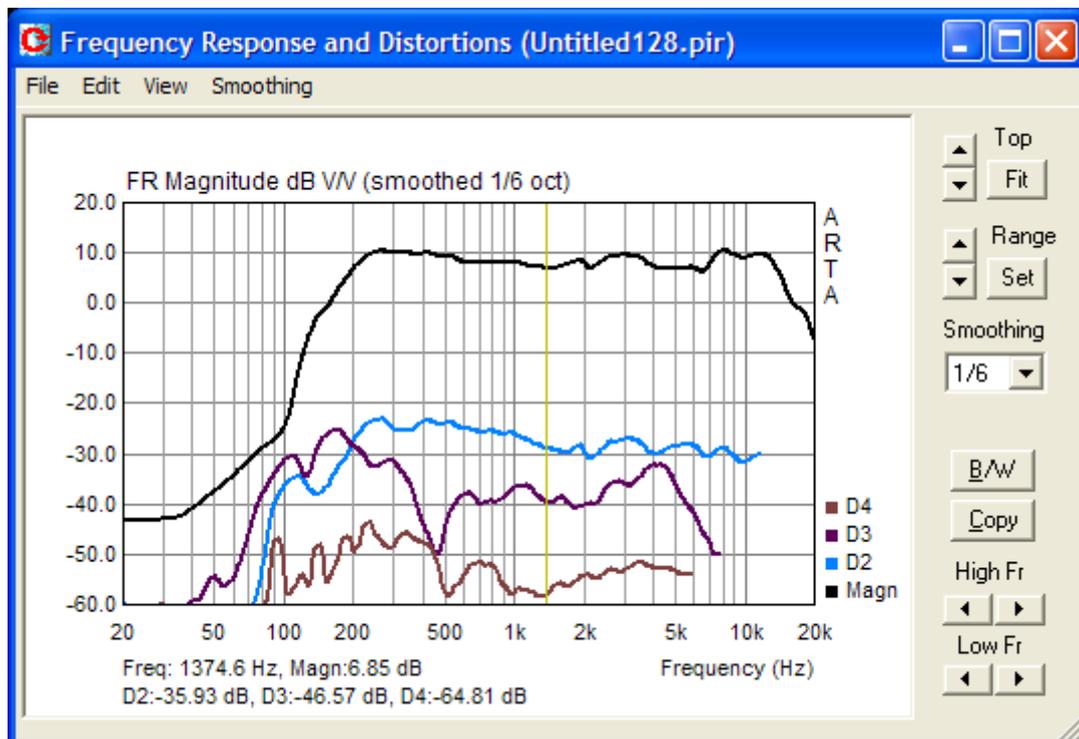
3. Durchführung der Messung (Record). Die Länge der Anregungssequenz muss mindestens 64k oder größer sein. Die gemessene Impulsantwort sollte dann in etwa aussehen wie in Bild 7.1.2 gezeigt.



**Bild 7.1.2:** Vergrößerte Impulsantwort (IR). Die rot gekennzeichneten Abschnitte zeigen die Gates für die lineare IR und die verzerrungsinduzierten IR für die zweite, dritte und vierte Harmonische.

4. Den Cursor einige Samples vor den Peak der Impulsantwort setzen (weniger als 250 Samples) und
5. die Tastenkombination **Shift+F12** drücken.

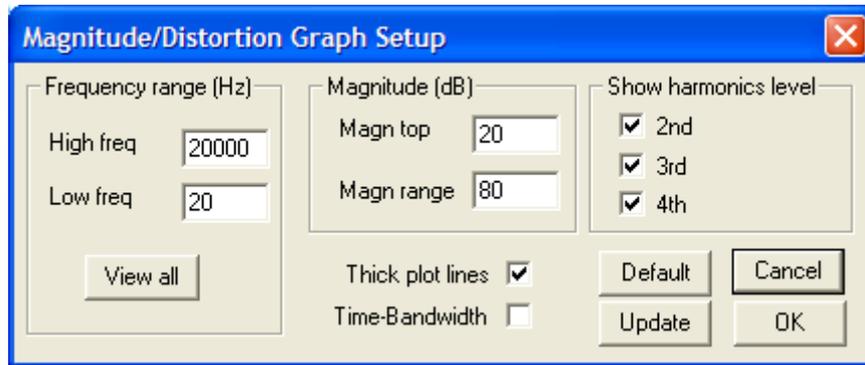
Daraufhin arbeitet ARTA automatisch die Auswertungsprozedur ab und zeigt die Ergebnisse in dem neuen Analysefenster „**Frequency Response and Distortions**“ (Bild 7.1.3).



**Bild 7.1.3:** 'Frequency Response and Distortions' Fenster

Die obere Kurve zeigt den Frequenzgang und die unteren Kurven zeigen die harmonischen Verzerrungen 2, 3 und 4 Ordnung.

Die Manipulation der Grafik ist vergleichbar mit der von ARTA im “Smoothed Frequency Response” Fenster. Das vollständige Setup-Menü erhält man durch das Kommando ‘View->Setup’ oder durch einen rechten Mausklick in der Grafik. Das öffnet die Dialogbox ‘Magnitude/Distortion Graph setup’ wie in Bild 7.1.4 gezeigt.



**Bild 7.1.4:** Dialogbox für das Grafik-Setup

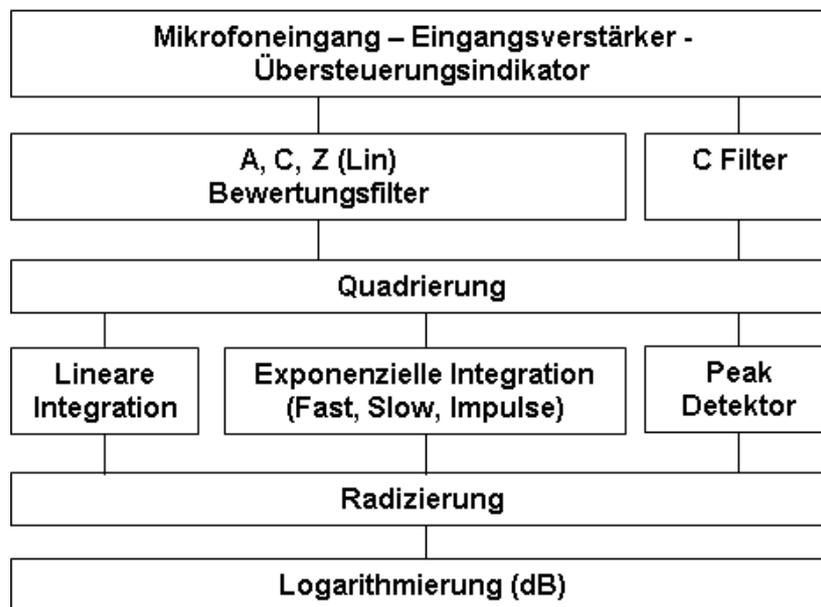
Weitere Details sind der ARTA Application Note Nr. 7 zu entnehmen [VII]. Zur Verzerrungsmessung mit STEPS siehe [Kapitel 9.2](#).

**Anmerkung:** Ab Version 1.4 können die Messdaten zur weiteren Bearbeitung in anderen Programmen exportiert werden. Wie üblich steht ein ASCII- und ein CSV-Export zur Verfügung.

## 7.2 Schallpegelmessung mit ARTA

Musik wird oft nicht als schön empfunden, weil sie stets mit Geräusch verbunden. Dieses Zitat von Wilhelm Busch kommt zum Leidwesen von Lauthören - oder deren Nachbarn - in Mietwohnungen nur allzu oft zum Tragen. Was nun in welchen Umständen laut bzw. leise ist, ist in Richtlinien, Technischen Anleitungen und Normen festgelegt (z.B. Richtlinie 2003/10/EG oder DIN 15905-5: Veranstaltungstechnik - Tontechnik - Teil 5: Maßnahmen zum Vermeiden einer Gehörgefährdung des Publikums durch hohe Schallemissionen elektroakustischer Beschallungstechnik).

Die Messung von Schallpegeln sowie der dafür erforderliche Ausrüstung ist in der Norm IEC 61672-1:2002 definiert. Ab der Version 1.4 ist in ARTA ein virtueller Schallpegelmessers integriert, auf Neudeutsch auch **Sound Pressure Level Meter** oder **SPL Meter** genannt. Der Aufbau bzw. die Funktionsweise des ARTA Schallpegelmessers ist in Bild 7.2.1 dargestellt



**Bild 7.2.1:** Blockdiagramm des integrierenden Schallpegelmessers

Das vom Mikrophon kommende Signal geht über den Eingangsverstärker zum Übersteuerungsindikator, der den Status des Eingangsverstärkers oder des A/D Wandlers der Soundkarte anzeigt.

Von dort aus geht das Signal in das Bewertungsfilter A, C oder Z (siehe IEC 61627-1 oder Bild 7.2.2), wobei Z für „unbewertet“ oder „linear“ steht. Diese Bewertungsfilter werden für RMS-Pegelmessungen genutzt, im Fall von Peak-Pegelmessungen wird nur das C-Bewertungsfilter genutzt.

In der nächsten Stufe wird das Signal quadriert und geht dann in den Integrator bzw. den Peak-Detektor. Anschließend wird das Signal radiziert und logarithmiert und schlussendlich im Display als Schallpegel in dB angezeigt.

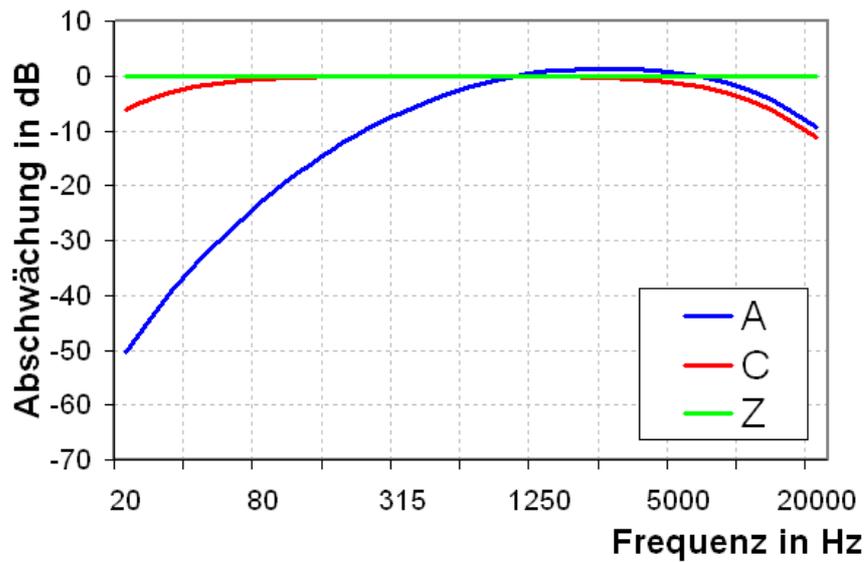


Bild 7.2.2: Bewertungsfiler A, C, Z

Der Schallpegelmesser in ARTA wird mit dem Befehl „Tools → SPL Meter“ aktiviert. Damit wird ein Fenster geöffnet wie in Bild 7.3.3 gezeigt.

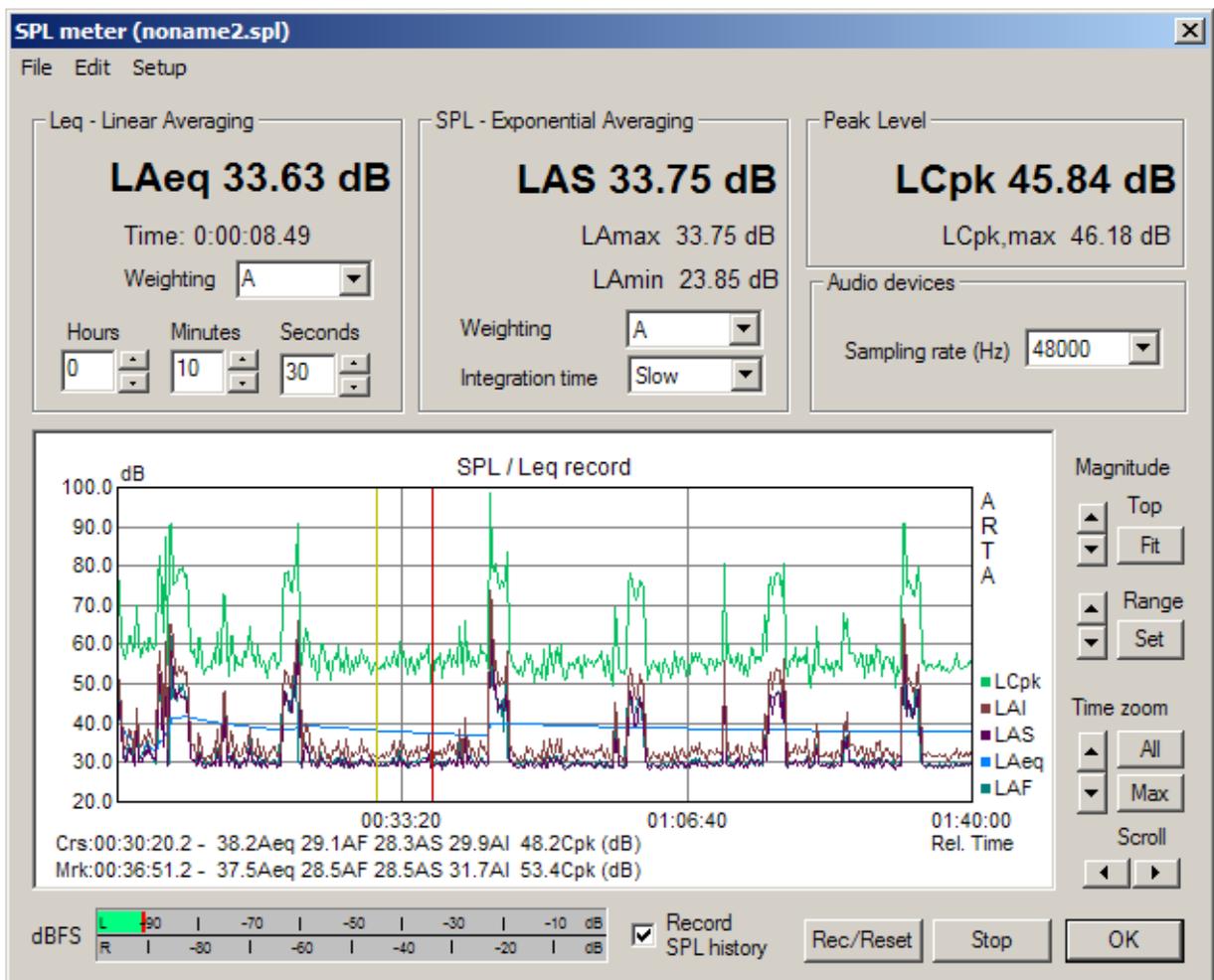


Bild 7.2.3: SPL Meter Fenster in ARTA

Die Bedienelemente im SPL Meter Fenster haben folgende Bedeutung / Funktion:

**Leq – Linear Averaging:**

- LAeq** aktueller Wert des Leq in Großbuchstaben.
- Time** Zeit relative zum Beginn der Messung.
- Weighting** Wahl des Bewertungsfilters A, C or Z (lin).
- Hours, Minutes and Seconds** Definition der Dauer der Messung (es sind maximal 24 Stunden, 59 Minuten und 59 Sekunden erlaubt).

**SPL – Exponential Averaging:**

- LAS** aktueller Wert des zeitgewichteten SPL (mit Bewertungsfilter A).
- LAmx** maximaler Wert des zeitgewichteten SPL für die gesamte Messzeit.
- L Amin** minimaler Wert des zeitgewichteten SPL für die gesamte Messzeit.
- Weighting** Wahl des Bewertungsfilters A, C or Z (lin).
- Integration time** Wahl der Zeitbewertung F (Fast), S (Slow) oder I (Impulse).

**Peak Level**

- LCpk** aktueller Peak-Pegel (C-bewertet, Zeitintervall 1s).
- LCpk,max** maximaler Peak-Pegel (C-bewertet, für die gesamte Messzeit).

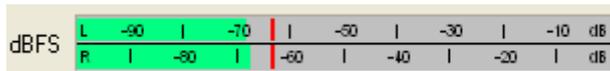
**Audio Devices**

- Sampling rate** Wahl der Sampling Frequenz (44100, 48000 or 96000Hz).

**Rec/Reset** startet die Messung oder setzt alle Werte auf Null (Reset).

**Stop** stoppt die Messung.

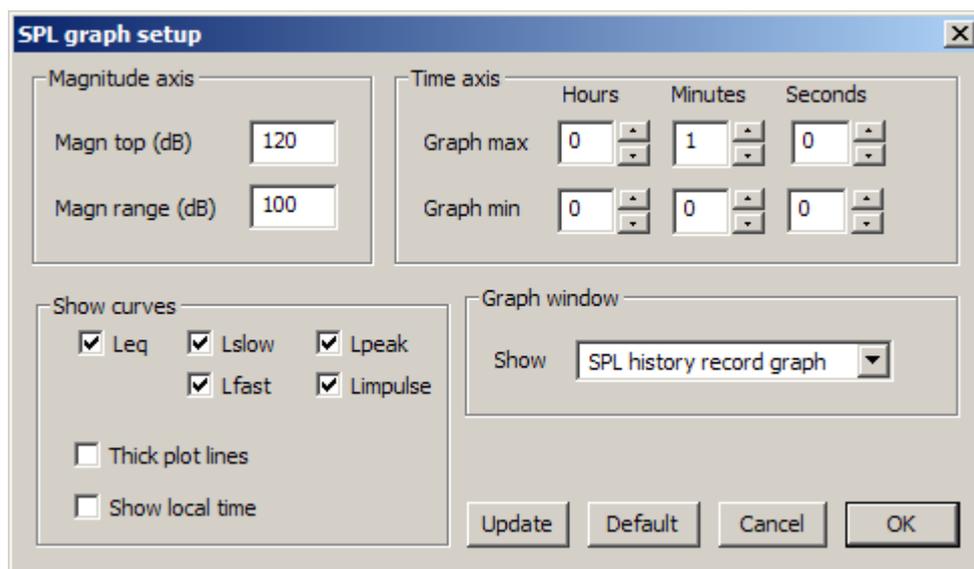
**OK** schließt das „SPL Meter“ Fenster.



**Peak meter dBFS** zeigt den aktuellen Peak-Arbeitspegel relativ zum Wert der Vollausteerung der Soundkarte in dBFS.

**Record SPL history** aktiviert die Datenaufzeichnung im Grafikmode (Pegelschreiber). Es werden 5 Werte aufgezeichnet: Leq, LSlow, LFast, Lpeak und Limpulse.

Die Manipulation der Grafik funktioniert sinngemäß wie in anderen Arbeitsbereichen von ARTA. Die Feinjustierung der Grafik erfolgt im Menü '**SPL graph setup**' wie in Bild 7.3.4 gezeigt.



**Bild 7.2.4:** SPL Graph Setup

Die Bedienelemente haben folgende Bedeutung / Funktion:

**Magnitude axis**

- Magn top (db)** setzt den Höchstwert der Y-Achse
- Magn range (dB)** setzt den Wertebereich der Y-Achse

**Time axis**

- Graph max** – Definition der oberen Zeitgrenze
- Graph min** – Definition der unteren Zeitgrenze
- Alle Angaben in relativen Zeitwerten (keine Uhrzeit eingeben).

**Show curves**

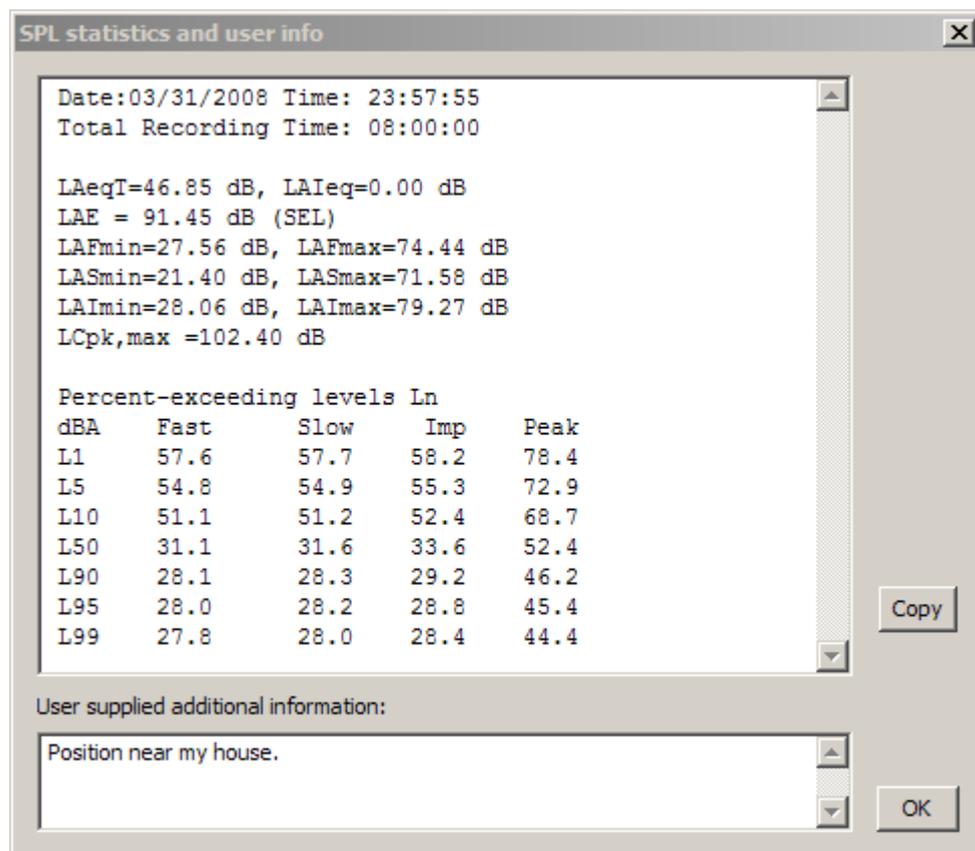
- Leq, LSlow, LFast, LPeak, LImpulse** aktiviert/deaktiviert die zu schreibenden Kurven.
- Thick plot lines** – aktiviert Linienart, dick.
- Show local time** – schaltet die Zeitachse auf Uhrzeit.

**Graph window**

- Show** Selektion der Anzeigeart für Daten. Aktiviert entweder den Grafik-Mode oder den jeweils gewählten SPL-Wert in sehr großen Buchstaben.

**Update** - Update der Grafik nach Wahl neuer Parameter.

**Default** – Setzen der Default Werte.



**Bild 7.2.5:** SPL Statistik

Das Hauptmenu beinhaltet folgende Befehle:

---

### File

**Save SPL history file** – speichern der SPL-Daten als .spl File.

**Open SPL history file** – laden von .spl Files.

**Export ...** – Exportiert Daten in Textformat

**ASCII (1s logged)** - Exportiert Leq, SPL and Lpeak in Sekundenabschnitten

**ASCII (100ms logged)** - Exportiert SPL(Fast) in 100ms-Abschnitten

**CSV (1s logged)** - Exportiert Leq, SPL and Lpeak in Sekundenabschnitten im CSV Format

**CSV (100ms logged)** - Exportiert SPL(Fast) in 100ms-Abschnitten im CSV Format

**File statistics and user Info** – SPL Statistik und vom Benutzer eingegebene Informationen zum aktuellen .spl file (siehe Bild 7.3.5). Mit Copy werden die Daten in das Clipboard kopiert.

### Edit

**Copy** - Kopiert die Grafik ins Clipboard

**B/W background color** - Umschalten auf Schwarz/Weiß

### Setup

**Calibrate audio device** - Öffnet das Kalibriermenü

**Setup audio devices** - Öffnet das Setup-Menü für die Soundkarte

### 7.3 Detektieren von Resonanzen

Resonanzen, egal ob Raum-, Gehäuse- oder Membranresonanzen sind in aller Regel unerwünschte Erscheinungen. Da deren Entstehung leider nicht zu verhindern ist, können die klangschädlichen Auswirkungen nur gezielt minimiert werden. Das setzt allerdings voraus, dass zumindest die Lage und darüber hinaus die Güte der Resonanz bekannt sind. In einigen Fällen ist das mit einfachen Mitteln zu erreichen, in anderen Fällen ist schon etwas mehr Aufwand erforderlich. Einige grundsätzliche Überlegungen sind in **Detection of audible Resonances** [24] ausgeführt. Hier sollen lediglich einige Messbeispiele zum Einstieg vorgestellt werden.

#### Raumresonanzen

Der messtechnischen Detektierung von Raumresonanzen (Moden) sollten idealer Weise theoretische Überlegungen vorgeschaltet sein. Für rechteckige Räume berechnen sich die Moden nach folgender Formel:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{B}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{H}\right)^2}$$

$f$  = Frequenz der Mode in Hz,  $c$  = Schallgeschwindigkeit 344 m/s bei 21°C  
 $n_x$  = Ordnung der Mode Raumlänge,  $n_y$  = Ordnung der Mode Raumbreite,  
 $n_z$  = Ordnung der Mode Raumhöhe ( $n_x, n_y, n_z = 0,1,2,3,\dots$ )  
 $L, B, H$  = Länge, Breite und Höhe des Raums in Meter

Im folgenden Beispiel für einen Raum mit den Abmessungen  $L= 5,00\text{m}$ ,  $B=3,90\text{m}$ ,  $H=2,20\text{m}$  wurden die Raummoden berechnet. Vergleichen Sie Rechnung und Messung bezüglich der Lage der Raumresonanzen (Bild 7.3.1).

34,2Hz	44,0 Hz	55,8 Hz	68,6 Hz	78,0 Hz	81,5 Hz	85,2 Hz	87,9 Hz	89,5 Hz	95,8 Hz
102,9Hz	103,8Hz	111,5Hz	111,9Hz	112,8Hz	117,5Hz	122,4Hz	129,1Hz	131,9Hz	135,4Hz

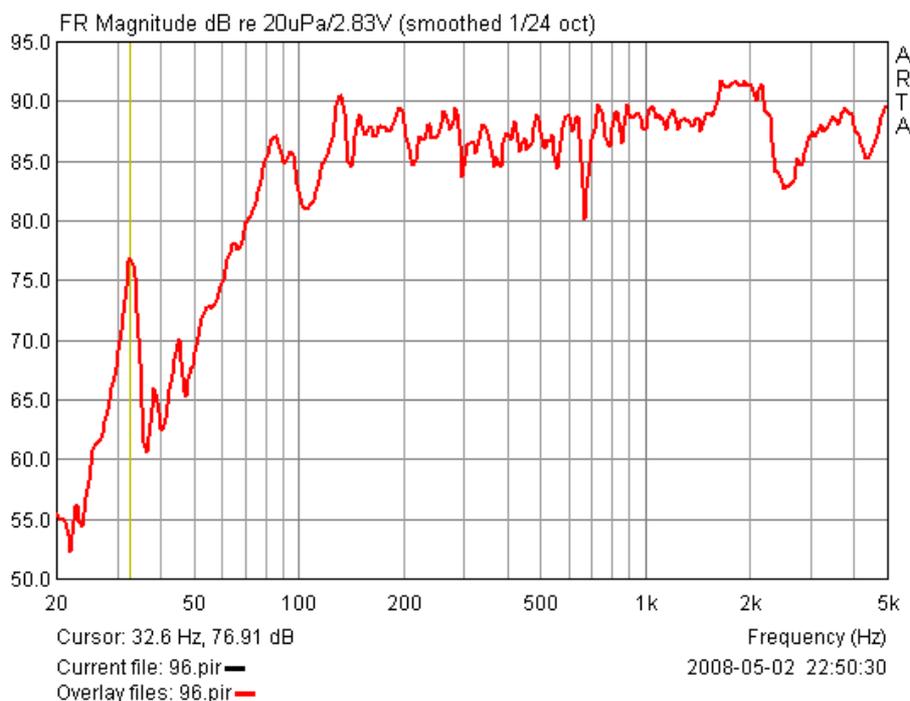


Bild 7.3.1: Messung eines Lautsprechers im Raum

Wenn neben der Lage der Resonanz auch die Güte bzw. die Dauer des Abklingvorganges bestimmt werden soll, so ist das mittels CSD oder Burst Decay möglich.

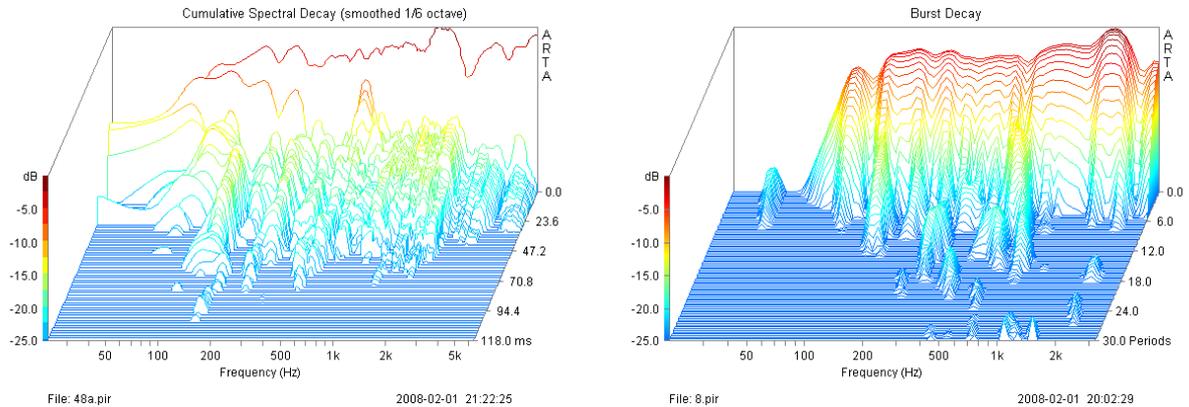


Bild 7.3.2: CSD und Burst Decay zur Ermittlung von Raumresonanzen

Bild 7.3.2 zeigt die Auswertung für in Bild 7.3.1 gezeigtes Beispiel bei einer Abtastfrequenz (Sampling Rate) von 48kHz. Im Burst Decay sind die Resonanzen unabhängig von der Abtastfrequenz im Bereich < 200 Hz gut zu identifizieren, im CSD hingegen ist eher Rätselraten angesagt.

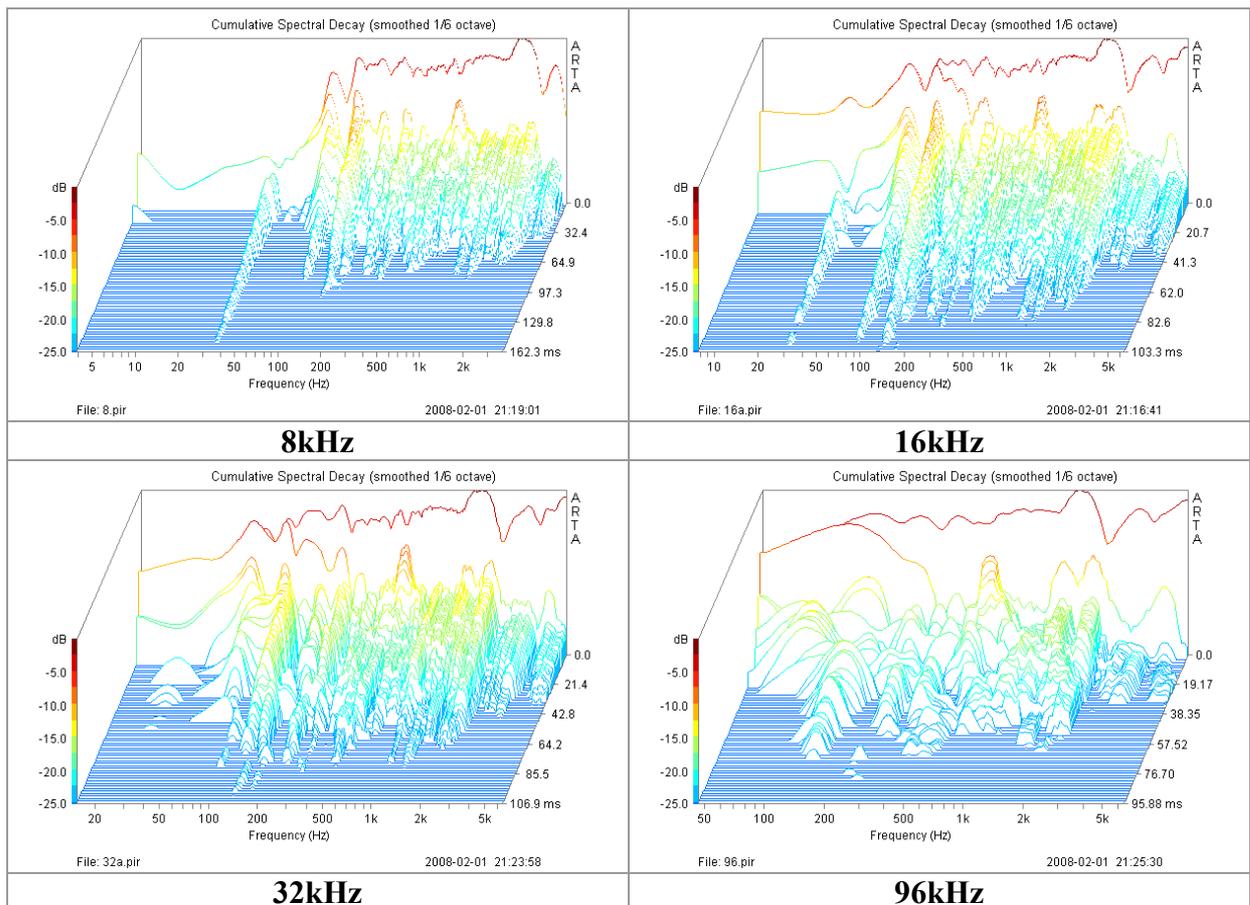


Bild 7.3.3: CSD mit unterschiedlichen Abtastfrequenzen

Das Problem kann durch erniedrigen der Abtastfrequenz gelöst werden. Bild 7.3.3 zeigt, dass die tieffrequente Auflösung mit sinkender Abtastfrequenz zunimmt. Bei 8 und 16 kHz sind die untersten Moden bzgl. Lage und Abklingdauer gut zu identifizieren.

Lautsprechergehäuse

Für Lautsprechergehäuse gilt oben gesagtes bzgl. der Moden gleichermaßen, denn sie stellen ja nichts anderes als „kleine Räume“ dar, lediglich die Frequenzen verschieben sich in höhere Bereiche.

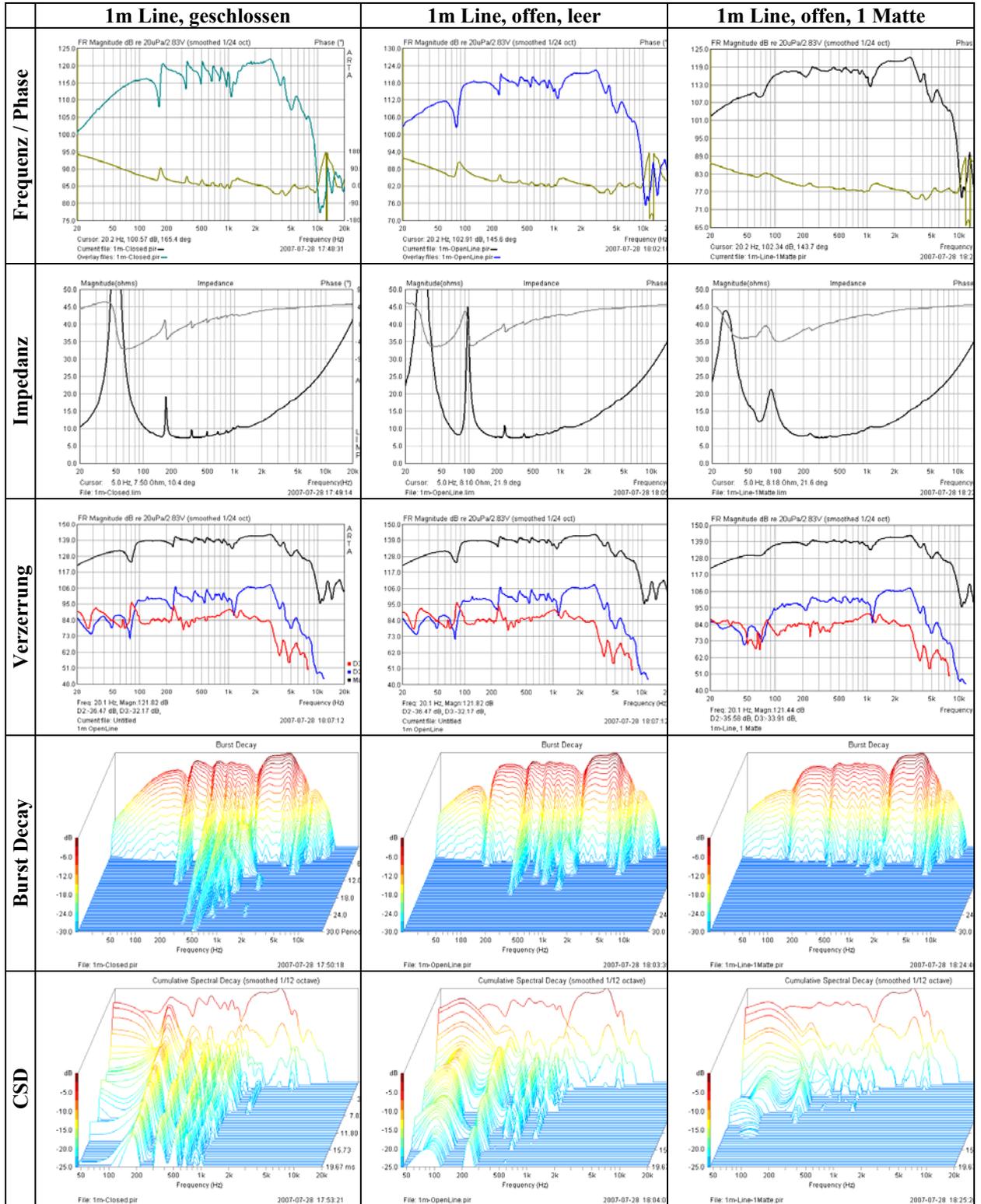
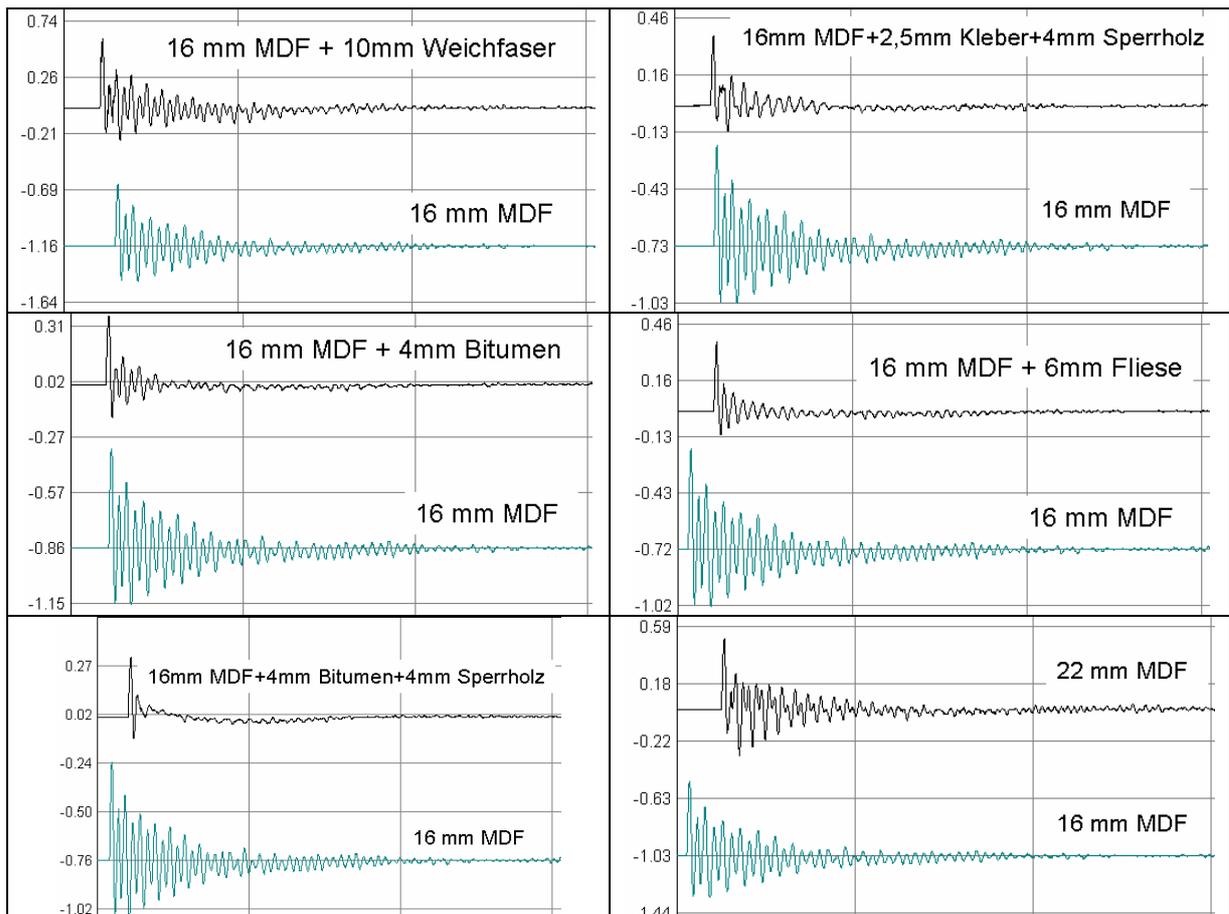


Bild 7.3.4: Resonanzdetektierung bei unterschiedlichen Lautsprechergehäusen

Bild 7.3.4 zeigt Messungen an einer 1m langen Transmissionline im offenen (Mitte) sowie im geschlossenen Zustand (links). Zusätzlich wurde eine Messung mit einer leichten Dämpfung der Line durchgeführt (rechts). Alle gezeigten Messungen (Frequenz, Phase, Impedanz, Klirr, Burst Decay, CSD) reagieren auf Resonanzen, als besonders sensitiv erweist sich die Impedanzmessung.

Das nächste Beispiel zeigt die Nachauswertung einer **Materialstudie**, die von Thomas Ahlersmeyer [23] durchgeführt wurde. Die kompletten Ergebnisse können an angegebener Stelle im Detail studiert werden, hier wird lediglich eine Auswertung der WAV-Dateien mit ARTA gezeigt. Zwecks Vermittlung eines Auszugs aus dem Versuchsprogramm, werden zunächst die Impulsantworten für die gemessenen Materialkombinationen gezeigt.



**Bild 7.3.5:** Abklingverhalten verschiedener Materialkombinationen [23]

Bild 7.3.5 zeigt die Messreihe für 16mm MDF mit verschiedenen „Beschichtungen“. Im unteren Bereich der Teilbilder ist jeweils die 16mm MDF-Platte als Referenz (grün) zu sehen. Bitte beachten Sie die unterschiedlichen Maßstäbe beim Gesamtvergleich der Materialien.

Bild 7.3.6 zeigt eine andere Aufbereitung dieser Messfiles (Frequenzgang, Burst Decay, Bursts Decay Sonogramm). In der linken Bilderreihe ist 16mm MDF als Referenz rot gekennzeichnet. Im Burst Decay (Mitte) sowie im Sonogramm (rechts) kommt sehr gut die Wirksamkeit der unterschiedlichen Maßnahmen heraus.

Dieses Programm wird demnächst mit einem Beschleunigungsaufnehmer fortgesetzt.

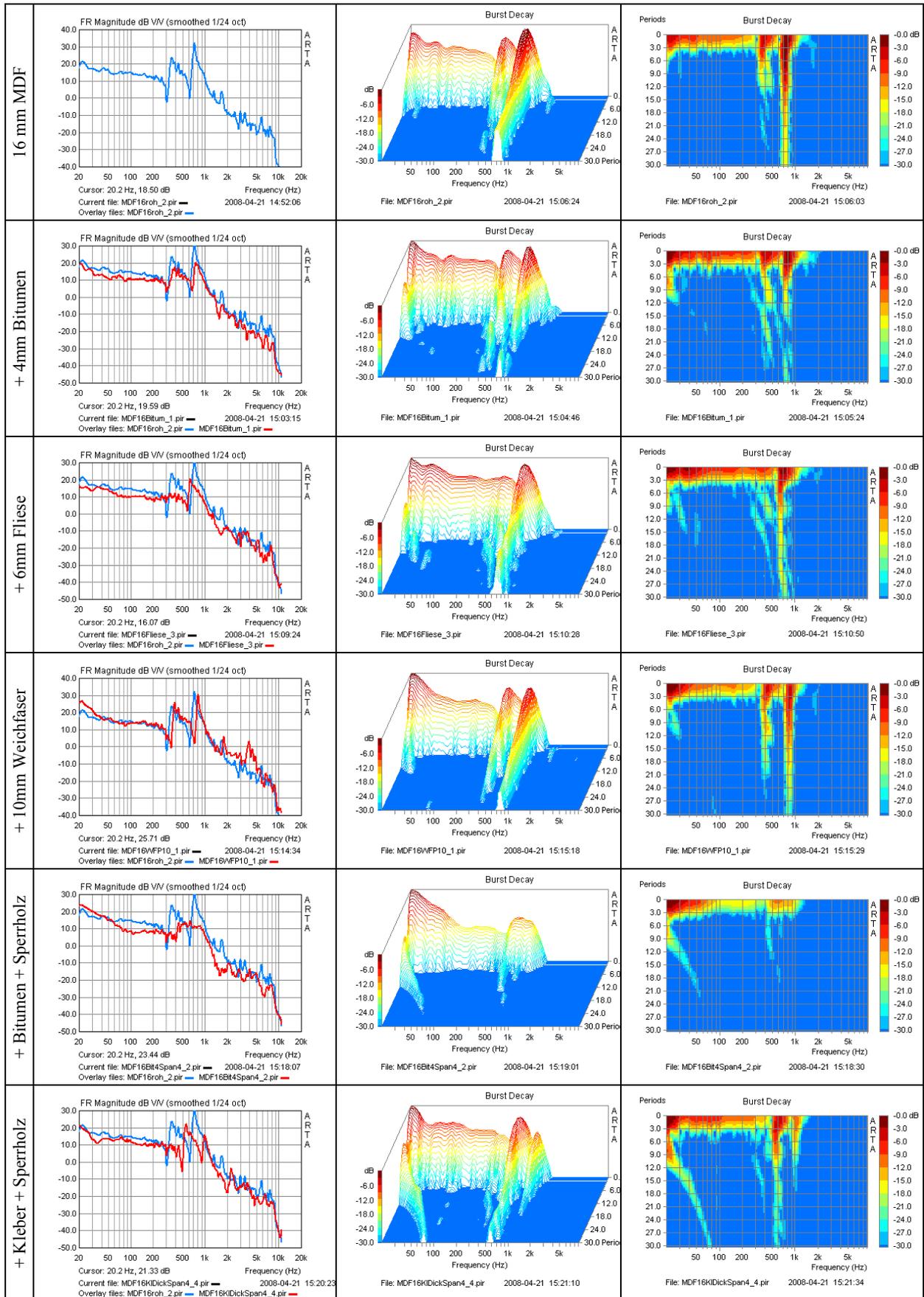
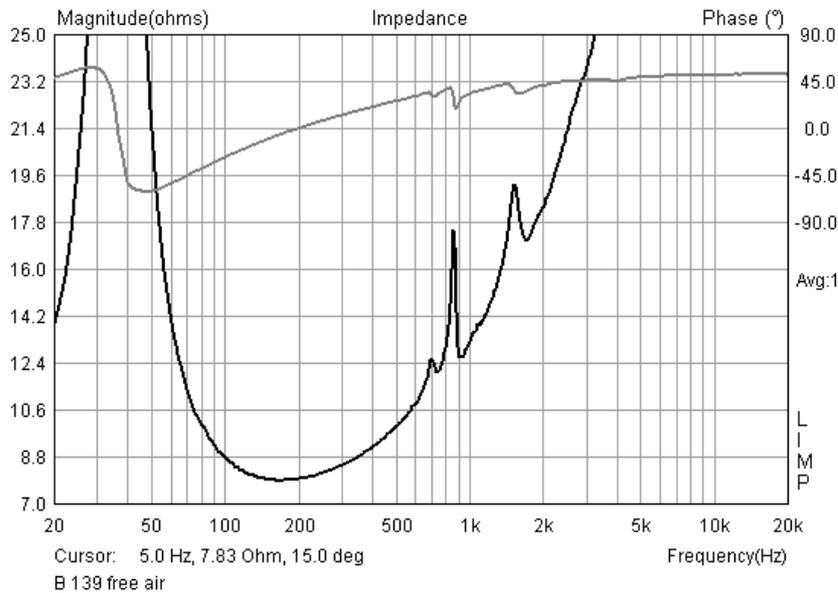


Bild 7.3.6: Abklingverhalten verschiedener Materialkombinationen [23]

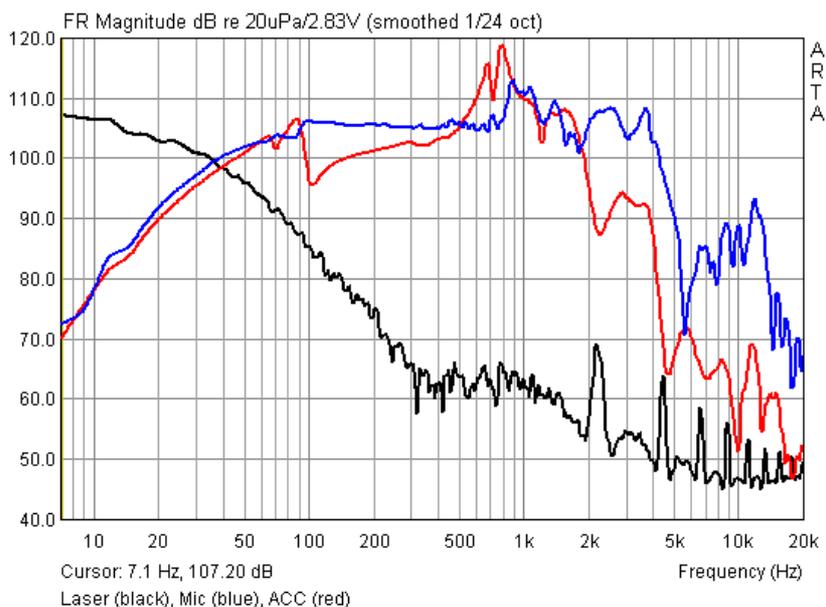
**Lautsprecher**

Bei Lautsprecherchassis sind die Membranresonanzen von besonderem Interesse. Die klassische Methode zur Detektierung ist die Impedanzmessung. Wie bereits weiter oben gezeigt, reagiert diese Methode sehr empfindlich. Um die Membranresonanzen von Gehäuseresonanzen zu trennen, wird hier natürlich „free air“ gemessen.



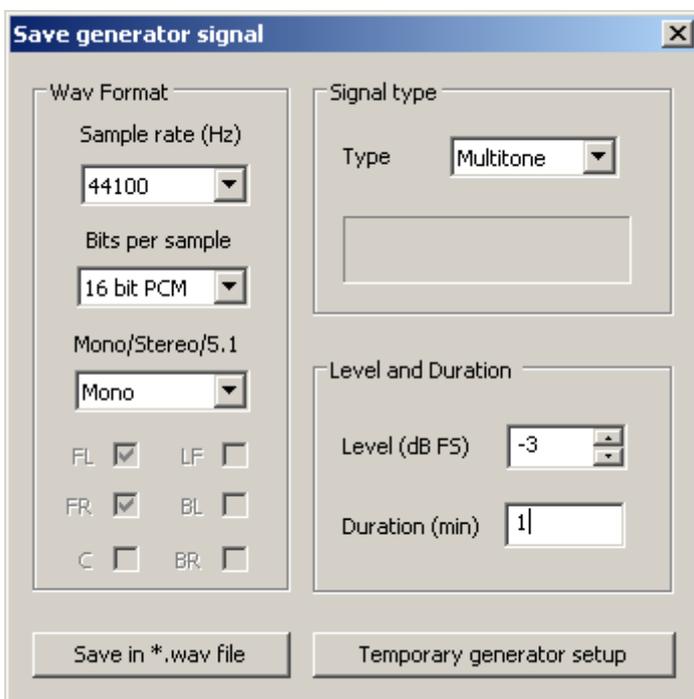
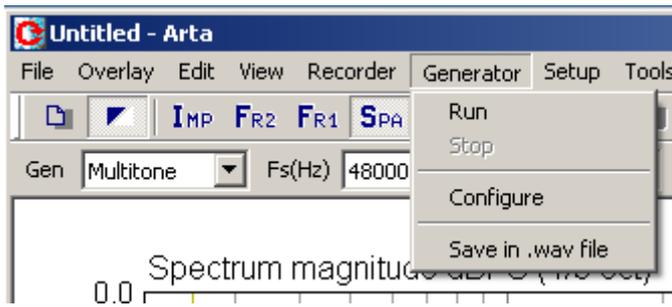
**Bild 7.3.7:** Impedanzverlauf eines Tieftöners

Bild 7.3.7 zeigt den Impedanzverlauf eines Klassikers, dem KEF B139. Es ist deutlich zu sehen, dass die Membran zwischen 700 Hz und 2 kHz Resonanzprobleme hat. Auch im Frequenzgang ist das deutlich zu sehen. Bild 7.3.8 zeigt Messungen mit unterschiedlichen Sensoren (Mikrofon (blau), Beschleunigungsaufnehmer (rot), Laser (schwarz)). Sowohl das Mikrofon als auch der Beschleunigungsaufnehmer ist zur Detektierung von Membranresonanzen geeignet.



**Bild 7.3.8:** Frequenzgang (blau), Membranauslenkung (schwarz) und -beschleunigung (rot)

## 7.4 Wav-Files zur externen Signalanregung mit ARTA erzeugen



... demnächst.

## 8. Umgang mit Messdaten, Datenfiles, Shortcuts etc.

Wer kennt das nicht: Schnell etwas überprüfen. Also messen, Daten speichern oder ausdrucken und fertig. Einige Zeit später fallen einem derartige Ausdrücke oder Datenfiles in die Hände und das große Grübeln beginnt: Wie war das damals? Wie war der Messabstand? Könnte ja aus der Impulsantwort ermittelt werden, wurde aber leider nicht abgespeichert. Wie waren die Randbedingungen, wie war dies, wie war jenes und zu guter Letzt, warum und in welchem Zusammenhang habe ich die Messungen damals überhaupt durchgeführt?

Was sagt uns das? Jede Messung sollte geplant und dokumentiert werden. D.h. das Ziel und der Zweck sollten definiert sein, es sollte klar sein, was die wesentlichen Einflussparameter sind bzw. worauf besonders zu achten ist und es sollte vorher überlegt sein, wie abgelegt bzw. dokumentiert wird. ARTA bietet bezüglich Dokumentation bzw. Rückverfolgbarkeit von Messungen eine Reihe von Funktionen an, die jedoch nur helfen, wenn sie angewendet werden!

Grundsätzlich wird empfohlen, von jeder Messung immer das jeweilige Urformat (PIR, LIM, HSW) zu speichern, denn nur aus diesem Format können alle weiteren Auswertungen gewonnen werden. Wenn direkt während der Messungen bereits ausgewertet wird, so hat es sich bewährt, die Resultate (z.B. Grafik) in ein parallel geöffnetes Textverarbeitungsdokument zu kopieren und sofort mit Kommentaren zu versehen.

### 8.1 Grafische Darstellungen in ARTA

ARTA bietet keine direkte Druckerausgabe, jedoch diverse Möglichkeiten, Diagramme oder Grafiken für die weitere Verwendung aufzubereiten bzw. zu formatieren. Die nächsten beiden Abschnitte sollen einen kurzen Überblick zu den Möglichkeiten von ARTA geben.

#### 8.1.1 Ausgabe und Formatierung von Diagrammen

Die Ausgabe normaler „Screenshots“ vom gesamten Fenster ist sehr einfach, durch die Tastenkombination **Ctrl+Druck** wird das Bild im Clipboard gespeichert und kann von dort in jede



Bild 8.1: Screenshot eines vollständigen Fensters

geöffnete Windows-Anwendung wie Word, Powerpoint etc. kopiert werden.

Um eine Kopie des „nackten“ Diagramms im Fenster zu bekommen, verwenden wir entweder die Tastenkombination **Ctrl+C**, das Menü **'Edit->Copy'** oder den **'Copy'** Button im aktuellen Fenster.

Im Hauptfenster wird der **'Copy'** Button als Icon  gezeigt.

Das Kommando öffnet - wie im Folgenden gezeigt - den Dialog **'Copy to Clipboard with Extended Information'**, die dem Anwender drei Möglichkeiten anbietet:

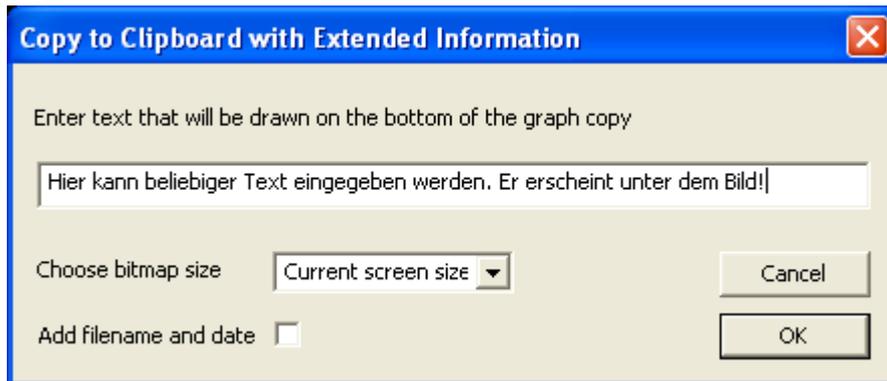


Bild 8.2: Copy-Menu zur Grafikausgabe

- 1) Im Eingabefeld am oberen Rand des Menüs kann zur Erläuterung der Messung beliebiger Text eingegeben werden. Er erscheint bei Ausgabe direkt unter der Grafik.
- 2) **'Add filename and date'** aktiviert die Ausgabe von File-Name, Datum und Zeit unter der Grafik.
- 3) Mit **'Choose bitmap size'** wird die Größe der auszugebenden Grafik bestimmt:

Current screen size - aktuelle Größe, Breite und Höhe sind variabel  
 Smallest (400 pts) - fest definierte Grafik mit 400 Punkten  
 Small (512 pts) - fest definierte Grafik mit 512 Punkten  
 Medium (600 pts) - fest definierte Grafik mit 600 Punkten  
 Large (800 pts) - fest definierte Grafik mit 800 Punkten  
 Largest (1024 pts) - fest definierte Grafik mit 1024 Punkten

Die Optionen mit fest definierter Größe weisen ein festes Verhältnis von Breite zu Höhe von 3:2 auf. Durch **'OK'** wird die Grafik ins Clipboard kopiert, **'Cancel'** bricht die Operation ab.

Bei Anwendung aller oben genannten Möglichkeiten zur Beeinflussung / Ergänzung einer Grafik sieht der Screenshot aus Bild 8.1 wie in Bild 8.3 gezeigt aus. In der Fußzeile sind jetzt Filename, Datum und Zeit sowie erläuternder Text zu sehen. Die Textgröße beträgt maximal 128 Zeichen.

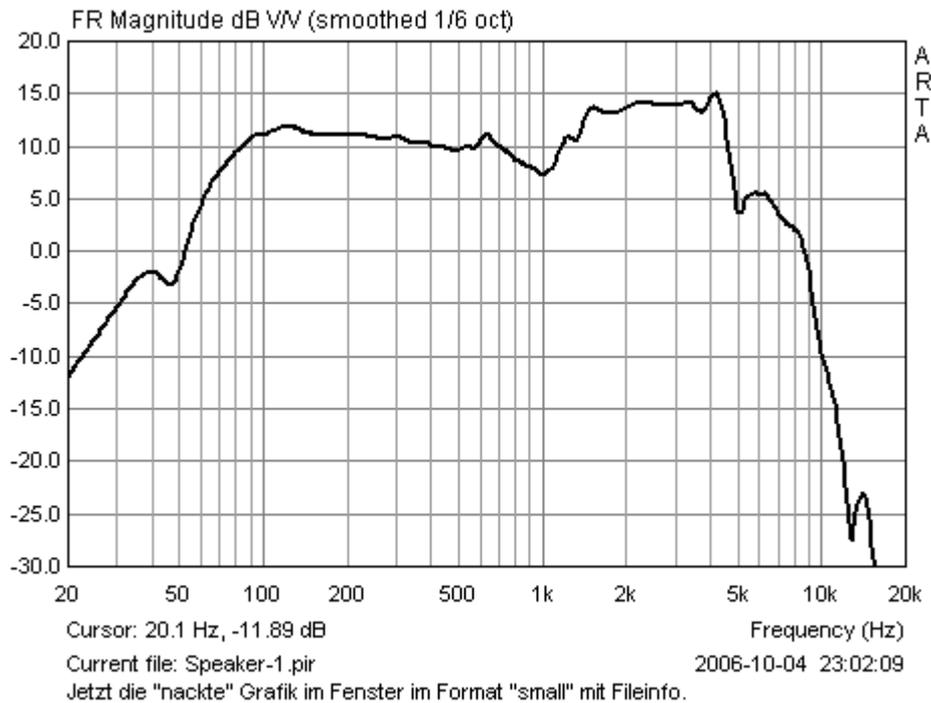


Bild 8.3: Grafik mit Information zum File sowie Erläuterungstext

### 8.1.2 Handhabung von Overlays

Im Fenster „**Smoothed frequency response**“ können die aktuelle Kurve oder auch die Targets für Filter als Overlay definiert werden. Eine weitergehende Manipulation von Overlays erfolgt im Menü gleichen Namens mit den folgenden Möglichkeiten:

- Set as overlay** - speichert die aktuelle Kurve als Overlay
- Set as overlay Below cursor** - speichert den Teil der Kurve links vom Cursor als Overlay
- Set as overlay Above cursor** - speichert den Teil der Kurve rechts vom Cursor als Overlay
- Save Overlays** - sichert File als Overlay
- Load Overlays** - lädt Overlay-File
- Manage Overlays** - aktiviert 'FR Overlay Manager' für die Editierung der Bezeichnungen
- Delete all** – löscht alle Overlays
- Delete last** - löscht das letzte Overlay
- Generate target response** – generiert Targets für Standardfrequenzweichen
- Load target response** – lädt beliebige Targetfiles als txt
- Delete target response** – löscht die Targets für Standardfrequenzweichen

Eine weitergehende Bearbeitung von Overlays kann der Maske '**FR Overlay Manager**' (siehe Bild 8.4) vorgenommen werden. Es wird durch den Befehl '**Overlay → Manage Overlays**' geöffnet.

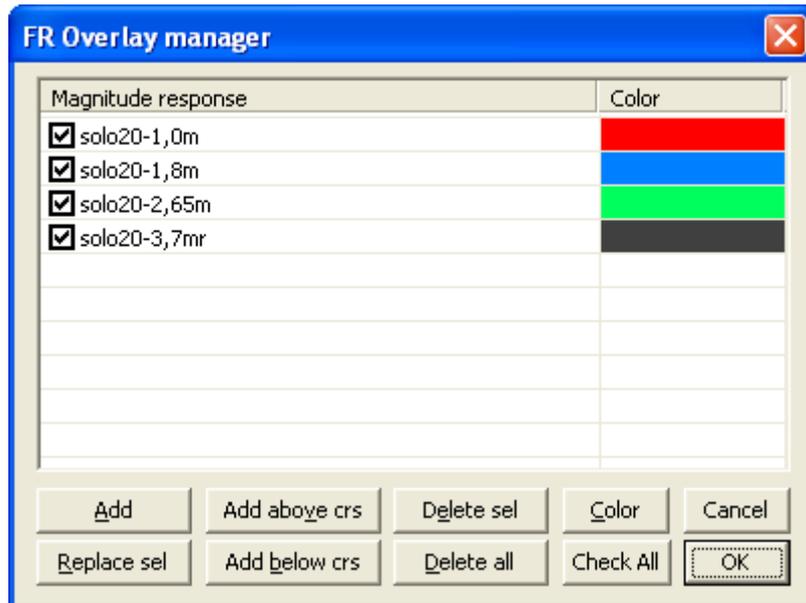


Bild 8.4: Menü „FR Overlay Manager“

Einige Befehle (**Add**, **Add above crs**, **Add below crs**, **Delete all**) sind uns bereits aus dem übergeordneten Menü bekannt, der Rest wird im Folgenden erläutert:

**Replace sel** – Ersetzt gewähltes Overlay durch aktuelle Kurve

**Delete sel** – löscht alle selektierten Overlays

**Color** – wechselt die Farbe für markierte Overlays über das Menü '**Overlay Colors**'.

Ein Mausklick auf die unten gelisteten Befehle löst folgende Reaktionen aus:

**Einfacher Klick** – wählt gewünschten Punkt aus

**Einfacher Klick auf Check Box** – macht Overlay sichtbar oder unsichtbar

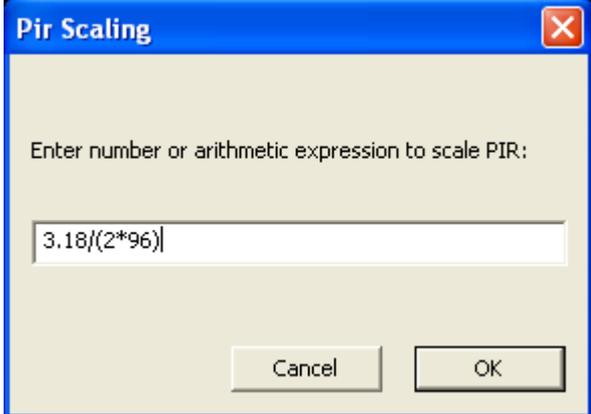
**Doppelklick** – aktiviert die Editierung der Overlay-Namen

Durch Betätigung von '**Check All**' können alle vorhandenen Overlays aktiviert werden.

Bitte beachten Sie, dass der zur Verfügung stehende Platz unter der Grafik limitiert ist. Wenn Sie z.B. sehr lange File-Bezeichnungen haben, so empfiehlt es sich, diese zu kürzen. Markieren Sie dazu mit dem Cursor die entsprechende Zeile und überschreiben den vorhandenen Text wie gewünscht.

## 8.2 Bearbeiten von Messdaten und Datenfiles

ARTA bietet einige Funktionen zur Dokumentation, Bearbeitung bzw. Manipulation von gemessenen Daten. Der Zugang zu den Funktionen erfolgt über drei Menüs. Es ist zu beachten, dass die Arbeitsweise von nahezu gleich lautenden Befehlen im Zeit- und Frequenzbereich unterschiedlich ist.

Zeitbereich	
	
<p><b>New</b> – löscht den Speicher</p> <p><b>Open</b> – öffnet PIR-Datenfiles</p> <p><b>Save</b> – speichert PIR-Datenfiles</p> <p><b>Save as</b> – speichert PIR-Datenfiles unter anderem Namen. Achtung, ARTA überschreibt Files ohne Rückfrage. Wenn Sie summiert oder skaliert haben, das veränderte PIR-File immer mit diesem Befehl speichern.</p> <p><b>Info</b> – viel Platz für Kommentare zur Messung.</p>	<p><b>Invert</b> – Invertiert die Impulsantwort (s. 8.1)</p>  <p><b>Rotate at cursor</b> – schneidet die Impulsantwort vor der Cursorposition ab.</p> <p><b>Scale</b> – Skaliert die Impulsantwort mittels beliebiger mathematischer Operationen (siehe Beispiel)</p>
	

<p><b>Export</b> – Export verschiedener Datenformate</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ASCII file</li> <li>MLSSA ASCII file</li> <li>.WAV file</li> </ul> <p><b>Import</b> – Import verschiedener Datenformate</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>.WAV file</li> <li>.TIM MLSSA file</li> <li>ASCII MLSSA file (.txt)</li> <li>ASCII file (.txt)</li> </ul> <p><b>Load and Sum</b> – Summierung von Impulsantworten (siehe 8.1)</p>	
--	--

Frequenzbereich	
<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> <p>Edit View Smoothing Overlay</p> <hr/> <p>Copy</p> <hr/> <p>Colors</p> <hr/> <p>Cut below cursor</p> <p>Cut above cursor</p> <hr/> <p>Scale level</p> <hr/> <p>Subtract overly</p> <p>Subtract from overlay</p> <hr/> <p>Power average overlays</p> <hr/> <p>Merge overlay below cursor</p> <p>Merge overlay above cursor</p> </div>	<p><b>Scale Level</b> – skaliert Frequenzgang auf gewünschten Pegel</p> <div style="border: 2px solid blue; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p style="text-align: center;"><b>Scale Magnitude</b> <span style="float: right;">✖</span></p> <p style="text-align: center;">Enter value in dB to scale magnitude</p> <p style="text-align: center;"> <input style="width: 80px;" type="text" value="-12.5"/> dB         </p> <p style="text-align: center;"> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="OK"/> </p> </div> <p><b>Subtract overlay</b> - Subtrahiert das Overlay vom aktuellen Frequenzgang</p> <p><b>Subtract from overlay</b> - Subtrahiert den aktuellen Frequenzgang vom Overlay</p> <p><b>Power average overlays</b> – Alle vorhandenen Overlays werden gemittelt.</p>

### 8.3 Scale und Scale Level

Im Folgenden finden Sie eine kleine Formelsammlung mit gängigen Rechen- und Anpassungsfunktionen:

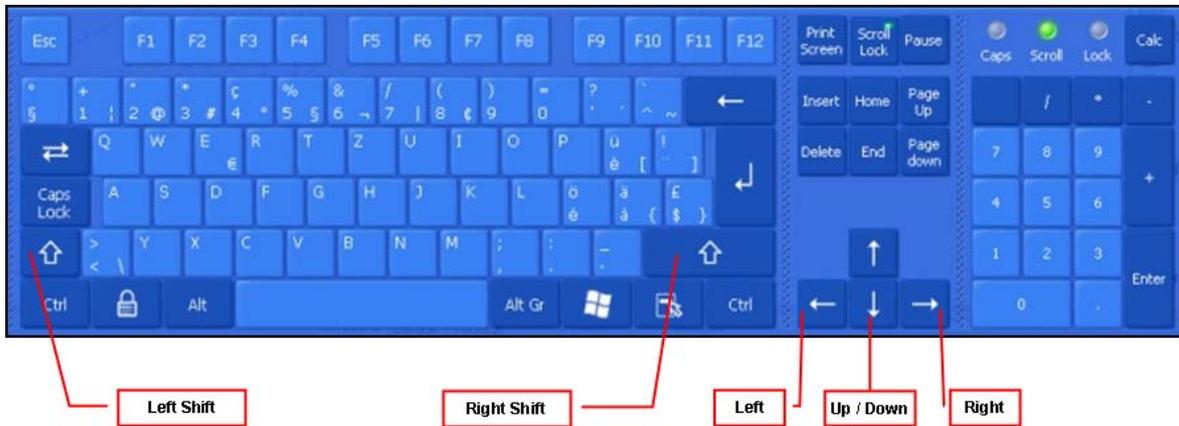
	Scale	Scale Level
Pegelnormierung auf $d_N$ im Fernfeld	$= d / d_N$	$= 20 \log (d / d_N)$
Nahfeldpegel $P_{NF}$ auf Fernfeldpegel $P_{FF}$ anpassen (Halbraum, 2 Pi)	$= (r / 2d)$	$= 20 \log (r / 2d)$
Nahfeldpegel $P_{NF}$ auf Fernfeldpegel $P_{FF}$ anpassen (Frei, 4 Pi)	$= (r / 4d)$	$= 20 \log (r / 4d)$
Pegelanpassung Reflexöffnung $P_P$ an Membran $P_D$ im Nahfeld	$= (S_P / S_D)^{0,5}$	$= 20 \log (S_P / S_D)^{0,5}$

#### Legende

- D = Messdistanz
- $d_N$  = Bezugsdistanz (1m ist die übliche Bezugsdistanz)
- $S_P$  = Fläche des Reflertunnels
- $S_D$  = Fläche der Membran
- R = Radius der Membran
- $P_{NF}$  = Pegel Nahfeld
- $P_{FF}$  = Pegel Fernfeld

## 8.4 Keyboard Shortcuts – ARTA effektiver Nutzen

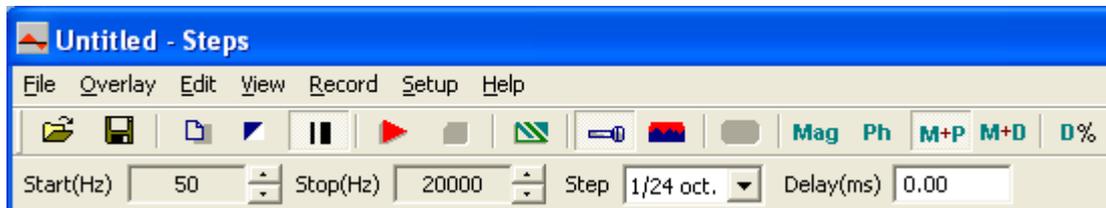
Wenn auch die Maus das am häufigsten eingesetzte Werkzeug am Schreibtisch ist, so ist sie nicht immer das effektivste. So genannte „**Keyboard Shortcuts**“ kürzen den mitunter umständlichen Weg durch mehrere Menüs ab. ARTA bietet einige dieser „Abkürzungen“.



Taste / Tastenkombination	Funktion
<b>Up und Down</b>	Ändert die auf dem Bildschirm angezeigte Verstärkung
<b>Ctrl+Up und Ctrl+Down</b>	Ändert das Offset (das Overlay bleibt unbeeinflusst)
<b>Left und Ctrl+Left</b>	Verschiebt die Grafik nach links
<b>Right und Ctrl+Right</b>	Verschiebt die Grafik nach rechts
<b>Left Shift+Left or Right</b>	Verschiebt den Cursor nach links oder rechts
<b>Right Shift+Left or Right</b>	Verschiebt den Marker nach links oder rechts (wenn vorhanden)
<b>PgUp und PgDown</b>	Verändert den Zoom Faktor
<b>Ctrl+S</b>	Sichert das aktuelle File
<b>Ctrl+O</b>	Öffnet ein File
<b>Ctrl+C</b>	Kopiert eine Grafik ins Clipboard (Anwenderdefiniert)
<b>Ctrl+P</b>	Kopiert das aktuelle Fenster ins Clipboard
<b>Ctrl+B</b>	Ändert die Hintergrundfarbe (Color / Black&White)
<b>Shift + F12</b>	Auswertung des Farina-Sweeps (s. Kapitel 7.1)
<b>2 x ALT+R</b>	Wiederholt eine Messung mit gleicher Einstellung
<b>ALT+M</b>	Zeigt das Magnitude Fenster (Frequenzgang)
<b>ALT+P</b>	Zeigt das Phasen Fenster (Phasengang)
<b>ALT+G</b>	Zeigt das Group Delay Fenster

## 9. Messen mit STEPS

STEPS ermöglicht die Messung des Frequenzganges und des Klirrverhaltens von Lautsprechern mittels gestuftem Sinus (Stepped Sine). Alle wesentlichen Befehle und Operationen für STEPS sind in der oberen Menüleiste enthalten.



Da vieles identisch ist mit den Menüs von ARTA, wird hier nur auf die Besonderheiten von STEPS eingegangen.

Grundsätzlich ist bei der Arbeit mit STEPS zu beachten, dass der Energiegehalt des Anregungssignals (Stepped Sine) sehr hoch ist. Um Schaden vom DUT und vom Equipment abzuwenden, sollte man vor der ersten Messung grundsätzlich daran denken, den Ausgangspegel entsprechend zu kontrollieren bzw. zu reduzieren.

### 9.1 Grundeinstellung von STEPS

Im Menü 'Measurement setup' (s. Bild 9.1) werden alle wesentlichen Messparameter für STEPS eingestellt. Das Menü ist in die Bereiche System (Measurement System) und Generator (Stepped Sine Generator) sowie einem Peakmeter zum Einpegeln unterteilt.

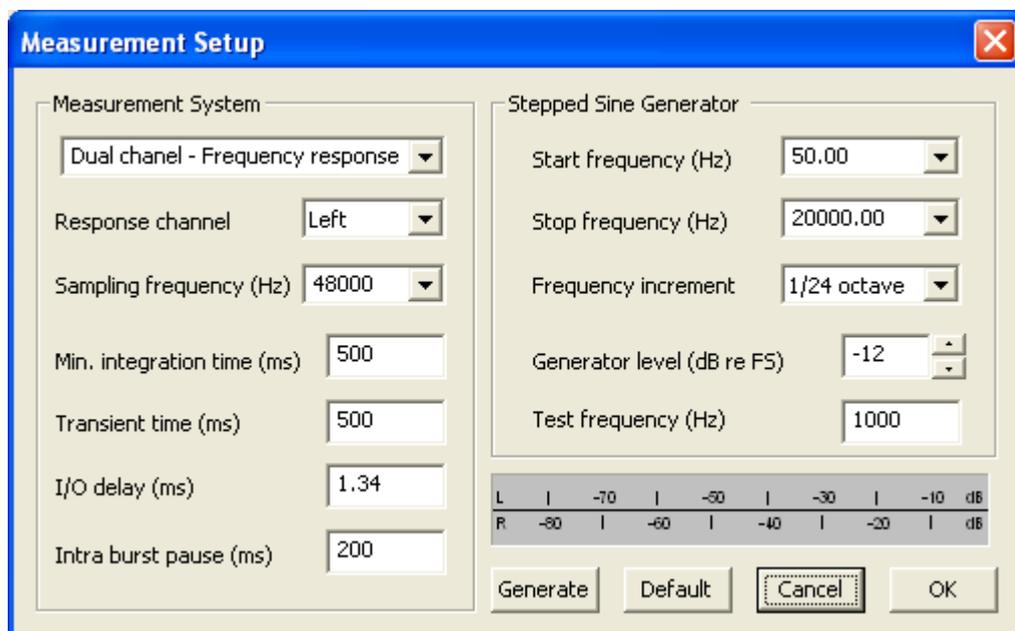


Bild 9.1: Measurement Setup in STEPS

Die Felder bzw. die darin enthaltenen Parameter haben folgende Bedeutung:

**Measurement System:**

Measurement mode	Wahlmöglichkeit zwischen Ein- und Zweikanalmessung
Response channel	Wahl des Eingangskanals (Default = Links)
Sampling frequency	8000 Hz bis 96000 Hz
Min. integration time (ms)	<p>STEPS ermittelt den Frequenzgang von dem Teil des Signals, der nach dem „I/O Delay“ und der „Transient Time“ beginnt, durch Integration des Sinussignals im Zeitbereich. Diese Zeit wird "Integration Time" genannt. Die erforderliche Zeit hängt von der tiefsten gewünschten Frequenz ab. Wenn ein Signal mit der tiefsten Frequenz F [Hz] gemessen werden soll, dann muss die Integrationszeit minimal <math>1/F</math> [s] betragen. Für eine Frequenz von 20 Hz beträgt die Integrationszeit also <math>1/20 = 0,05s = 50</math> ms.</p> <p>Weiterhin benutzen STEPS und ARTA eine spezielle Filterung des Signals durch Anwendung einer Fensterung nach Kaiser. Dieses erfordert minimal 5 komplette Zyklen (250 ms bei 20 Hz). Wenn man eine schnellere Messung will, kann das nur durch Erhöhung der unteren Frequenz erreicht werden.</p> <p><i>Anmerkung: Für Klirrmessungen sollte grundsätzlich die doppelte Integrationszeit verwendet werden (bei 20 Hz also 500 ms).</i></p>
Transient time (ms)	<p>Die Messung des Sinussignals hat im eingeschwungenen Zustand zu erfolgen. Wann der eingeschwungene Zustand erreicht wird, hängt vom Resonanzverhalten des Systems ab bzw. akustisch vom Nachhall.</p> <p>Für Messungen im Raum sollte die "Transient Time" mindestens 1/5 der Nachhallzeit betragen. Werte zwischen 100 ms und 200 ms sind für normale Räume üblich. Bei Messungen im Freien sollte die "Transient Time" auf 50 ms bis 100 ms gesetzt werden.</p>
I/O delay (ms)	Bedingt durch die Wegstrecke zwischen Mikrofon und Lautsprecher ist immer ein Delay vorhanden. Um einen vernünftigen Phasenverlauf zu bekommen, muss dieses Delay berücksichtigt werden.
Intra burst pause (ms)	Nach einer Messung muss das System erst wieder ausschwingen, bevor mit der nächsten Messung begonnen werden kann. Diese Pause wird "Intra Burst Pause" genannt. Als Faustwert für die Dauer der „Intra Burst Pause“ kann wieder 1/5 der Nachhallzeit angenommen werden.

**Stepped Sine Generator:**

Start frequency	Wahl der Startfrequenz in Hz
Stop frequency	Wahl der Stopfrequenz in Hz
Generator level	Eingabe der Generator-Ausgangsspannung in dB re FS
Frequency increment	Schrittweite der Frequenzstufen (1/12, 1/24 oder 1/48 Oktave)

## 9.2 Frequenzgang- und Verzerrungsmessungen mit STEPS

Frequenzgangmessungen mit STEPS laufen grundsätzlich ab wie mit ARTA. Der wesentliche Unterschied liegt im Anregungssignal (siehe Originalhandbuch) und in der Dauer der Messung.

Je nach Wahl der Parameter kann eine Messung schon einige Minuten dauern. Aus der Summe von ‚Integration time‘, ‚Transient time‘ und ‚Intra burst pause‘ multipliziert mit dem ‚Frequency Increment‘ sowie der Zahl der überstrichenen Oktaven ergibt sich in etwa die erforderliche Zeit. Es empfiehlt sich also für erste Versuche, nicht nur mit dem Signalpegel zurückhaltend zu sein, sondern auch mit der Frequenzauflösung (1/12 Oct).

Bei der Wahl der Anzeige bestehen die Wahlmöglichkeiten Amplitude, Phase, Amplitude und Phase, Amplitude und Klirr sowie Klirr in % → **Mag Ph M+P M+D D%**.

Um eine korrekte Phasenbeziehung zu bekommen, muss der Weg zwischen Lautsprecher und Mikrofon durch ein Delay ausgeglichen werden. Es ist schwer, den exakten Wert zu bestimmen, denn dazu müssten wir die genaue Lage des akustischen Zentrums des Lautsprechers kennen (s. Bild 6.2). In vertretbarer Näherung können wir das Delay wie folgt berechnen:

$$I/O \text{ delay [ms]} = 1000 \times \text{Messdistanz [m]} / \text{Schallgeschwindigkeit [m/s]}; c = 344 \text{ m/s}$$

Für einen Messabstand von 0,5 m muss das Delay also 1,4534 ms betragen.

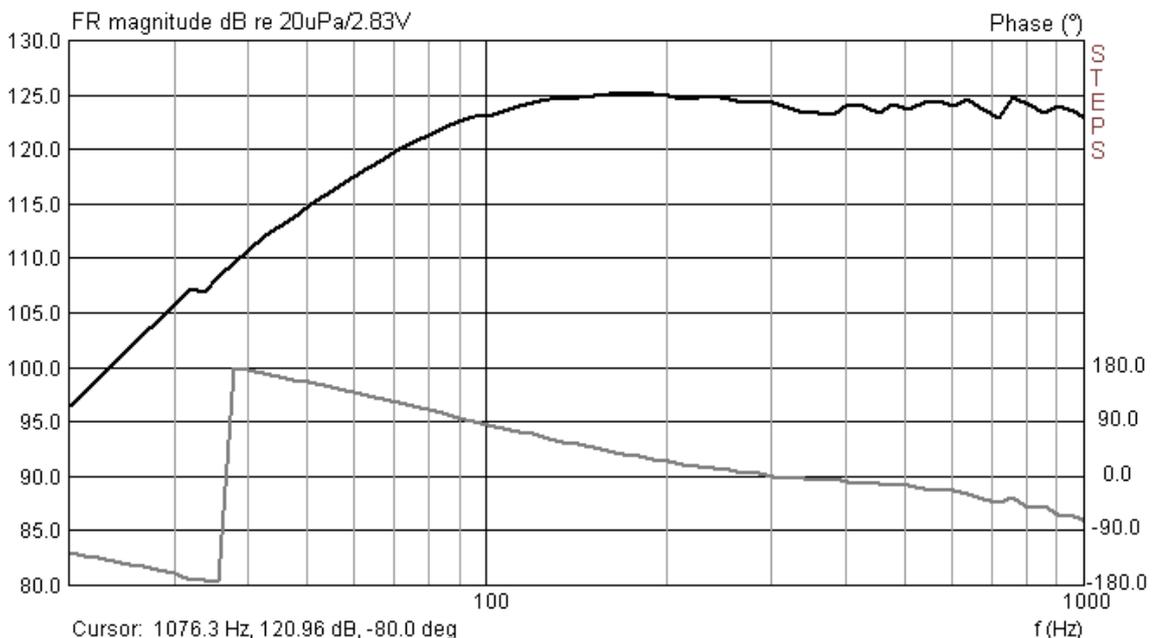


Bild 9.2: Frequenzgang eines 6“ TMT gemessen mit 1/12 Oktave Auflösung mit STEPS

Bei Klirrmessungen ist zu beachten, dass das Ergebnis sowohl durch Komponenten der Messkette als auch durch die Messumgebung beeinflusst werden kann.

Sofern im Nahfeld gemessen wird, ist darauf zu achten, dass weder Mikrofon noch Mikrofonvorverstärker übersteuert werden. Klirrmessungen werden häufig bei 90 dB in 1 Meter Messabstand durchgeführt bzw. auf diesen Wert bezogen. Eine Nahfeldmessung hätte dann einen

ca. 30 dB höheren Pegel. 120 dB bis 130 dB sind für viele Mikrofone jedoch schon die angegebene Grenze für den maximal zulässigen Schalldruck.

Bei zu großem Messabstand machen sich die Raumeinflüsse in den Messergebnissen stark bemerkbar. Daher ist hier etwas Aufmerksamkeit angebracht. Experimentieren mit verschiedenen Pegeln und Messabständen vermittelt einen Eindruck über die Wirkung der verschiedenen Einflussgrößen.

Bild 9.3 bis Bild 9.7 zeigen Klirrmessungen an einem 6“ TMT im Nahfeld mit zwei verschiedenen Pegeln, mit 35 cm Messabstand und zwei unterschiedlichen Mikrofonen.

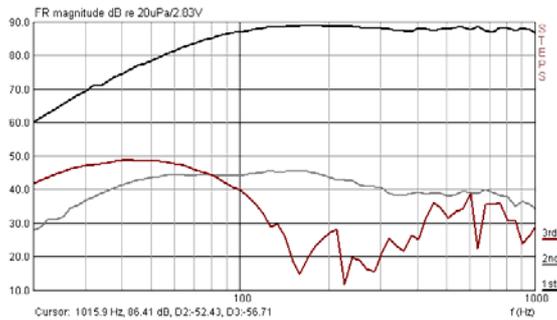


Bild 9.3: STEPS Klirrfrequenzgang eines 6“ TMT im Nahfeld (KE 4-211-2)

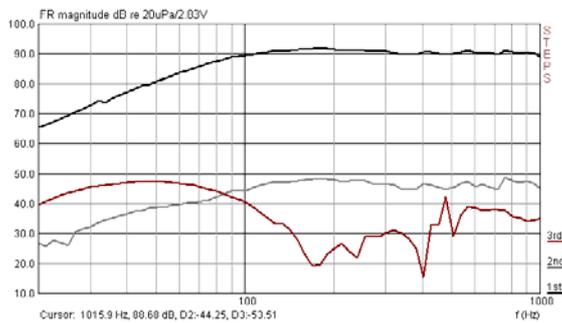


Bild 9.4: STEPS Klirrfrequenzgang eines 6“ TMT im Nahfeld (MB 550)

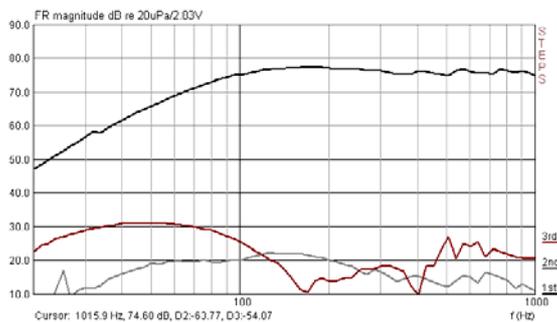


Bild 9.5: STEPS Klirrfrequenzgang eines 6“ TMT im Nahfeld (-6 dB, KE 4-211-2)

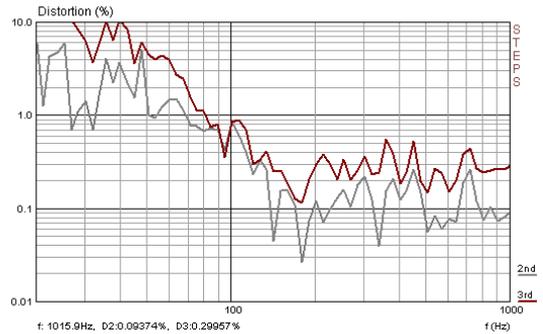
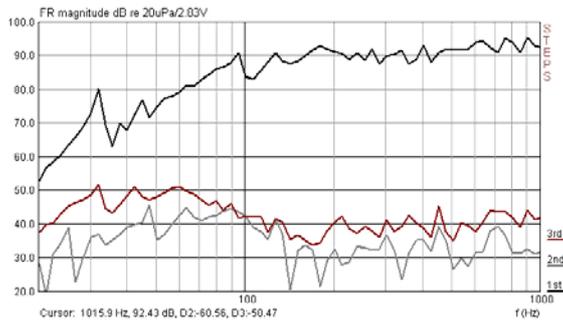


Bild 9.6: STEPS Klirrfrequenzgang eines 6<sup>er</sup> TMT in 35 cm Messabstand (KE 4-211-2)

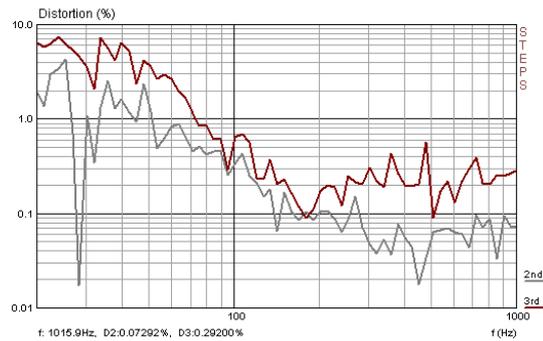
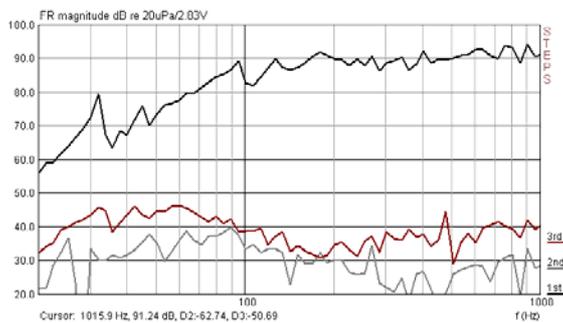


Bild 9.7: STEPS Klirrfrequenzgang eines 6<sup>er</sup> TMT in 35 cm Messabstand (MB 550)

Bild 9.3 bis Bild 9.7 machen deutlich, dass zur Erzeugung reproduzierbarer Klirrmessungen einiges zu bedenken ist. Wie bereits oben erwähnt, gilt es unter Beachtung von Anregungspegel, Grenzschalldruck des Mikrofons, Messabstand und der Ausblendung von störenden Reflexionen für jede Messanordnung den jeweils besten Kompromiss zu suchen.

### 9.3 Spannungs- oder leistungsbezogene Messung mit STEPS

Demnächst.

## 10. Messen mit LIMP

LIMP ermöglicht die Messung des Impedanzganges und der Thiele-Small-Parameter (TSP) von Lautsprechern und Systemen. Ferner ist LIMP als LCR-Meter konzipiert. Als Anregungssignal stehen ein Rauschsignal (Pink-PN) und gestufter Sinus (Stepped Sine) zur Verfügung. Das Rauschsignal unterscheidet sich im Energiegehalt wesentlich vom gestuften Sinus. Insofern verwundert es nicht, wenn die TSP bei unterschiedlicher Anregung differieren (s. Bild 10.6).

Wie bei allen Programmen der ARTA-Familie, sind auch bei LIMP die wesentlichen Befehle und Operationen in der oberen Menüleiste enthalten.

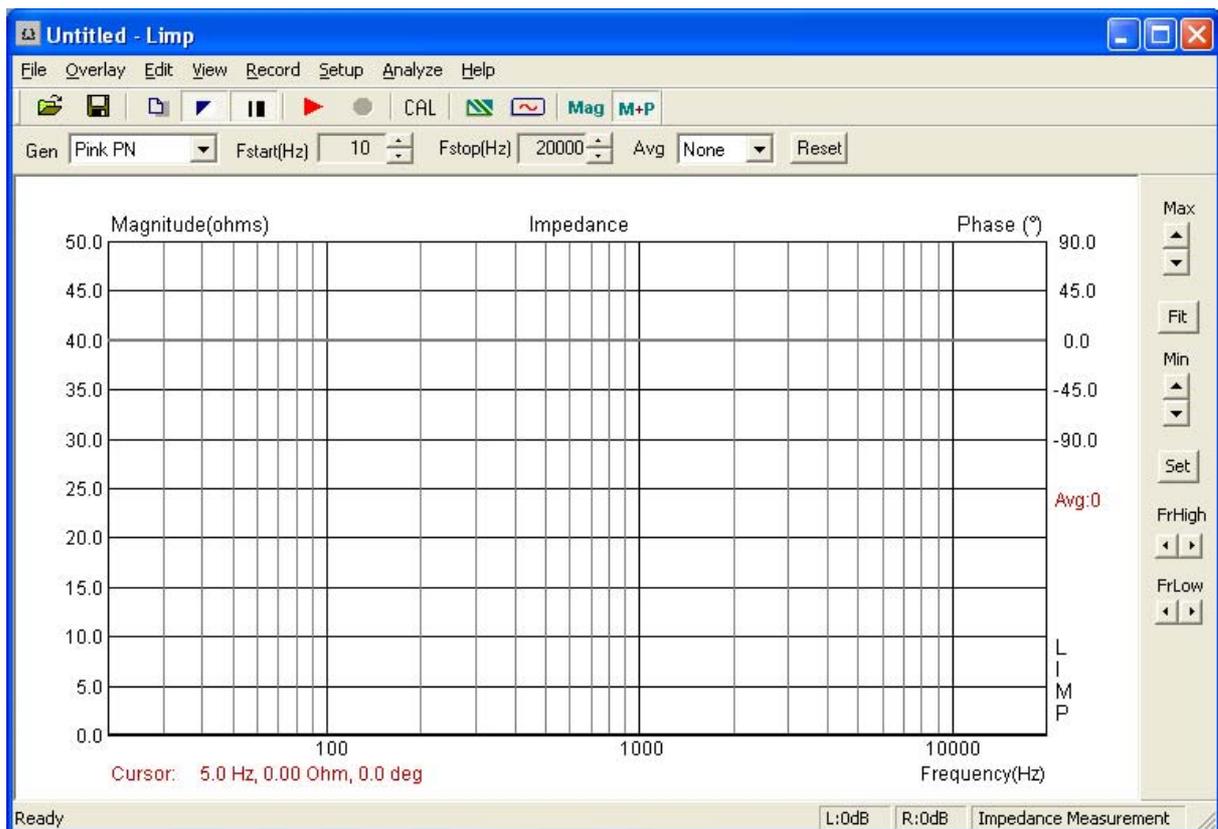


Bild 10.1: Eröffnungsmaske von LIMP

### 10.1 Grundeinstellung von LIMP

Bei den folgenden Beschreibungen wird davon ausgegangen, dass die ARTA-MessBox zur Verfügung steht. Als Referenzwiderstand dient ein 27 Ohm Hochlastwiderstand. Ansonsten ist eine der Schaltungen für Impedanzmessungen aus Kapitel 2 aufzubauen.

Vor der ersten Messung sind wieder einige Grundeinstellungen vorzunehmen. Die Kalibrierung der Soundkarte wurde bereits im Kapitel 5 besprochen, daher werden hier lediglich die Besonderheiten von LIMP behandelt.

Das Measurement Setup von LIMP hat drei Bereiche:

- Measurement Config
- Stepped Sine Mode
- FFT Mode

Measurement config

Reference channel Right

Reference Resistor 27

Frequency range (Hz)

High cut-off 20000

Low cut-off 10

Sampling rate (Hz) 48000

Stepped sine mode

Frequency increment 1/48 octave

Min. integration time (ms) 250

Transient time (ms) 250

Intra burst pause (ms) 100

FFT mode (pink noise excitation)

FFT size 32768

Averaging None

Max averages 100

Asynchronous averaging

Im Bereich Measurement Config werden die allgemeinen Messparameter festgelegt:

- Referenzkanal: Default ist der rechte Eingangskanal
- Referenzwiderstand: In der ARTA-MessBox ist der Referenzwiderstand mit 27 Ohm angegeben. **Der genaue Wert ist durch Messung zu bestimmen.**
- Obere Frequenzgrenze: siehe unten
- Untere Frequenzgrenze: siehe unten

Die Frequenzgrenzen sind auch über die obere Menüleiste zu steuern Fstart(Hz) 10 Fstop(Hz) 20000

Im Bereich Stepped Sine Mode werden die Parameter für die Anregung mit gestuftem Sinus definiert.

Alle Parameter dieses Bereiches sind bereits in Abschnitt 9.1 erläutert. Die eingestellten Default-Werte sind für übliche Impedanzmessungen hinreichend.

Im Bereich FFT Mode werden die Parameter für die Anregung mit rosa Rauschen definiert.

- FFT Size: Anzahl der Werte für die FFT (Auflösung)
- Averaging: Art der Mittelung (keine, linear, exponentiell)
- Max Averages: maximale Zahl der Mittelwertbildungen
- Asynchronous Averaging: asynchrone Mittelung an/aus

Bevor es ans Messen geht, ist zu überprüfen, ob der eingestellte Ausgangspegel nicht zur Übersteuerung der Eingangskanäle führt. Dabei ist zu beachten, dass die zwei Anregungssignale sehr unterschiedlich sind, d.h. bei Wechsel der Anregungsart sollte der Pegel neu geprüft werden. Im Menü Generator Setup sind alle erforderlichen Einstellungen möglich.

**Generator Setup**

Generator

Type Pink PN Sine freq. (Hz) 1000

Output level 0dB Pink cut-off (Hz) 100

Input level monitor

L	-70	-50	-30	-10	dB
R	-80	-60	-40	-20	dB

Test Cancel OK

### Generator

- Anregungsart: PN oder Stepped Sine
- Ausgangspegel: 0 bis -15 dB
- Frequenz bei Sinusanregung
- Eckfrequenz bei Anregung mit Rauschsignal

### Input Level Monitor

Durch Drücken von Test wird das oben eingestellte Signal gestartet und im Peak Level Meter angezeigt. Sollte die Anzeige rot oder gelb sein, ist der Pegel zu reduzieren.

## 10.2 Ermittlung der TSP

LIMP unterstützt die Ermittlung der TSP nach zwei unterschiedlichen Methoden:

- im Testgehäuse mit bekanntem Volumen (Volumenmethode, Bild 10.a)
- durch Beschweren der Membran mit bekannter Zusatzmasse (Massemethode, Bild 10.2b)

Prinzipiell sind beide Methoden gleichwertig, jedoch sollte die Volumenmethode immer dann angewendet werden, wenn die Resonanzfrequenz des Lautsprechers sehr niedrig ist. Bei der Massemethode könnte dann die Resonanzfrequenz soweit erniedrigt werden, dass der lineare Messbereich der Soundkarte verlassen wird.

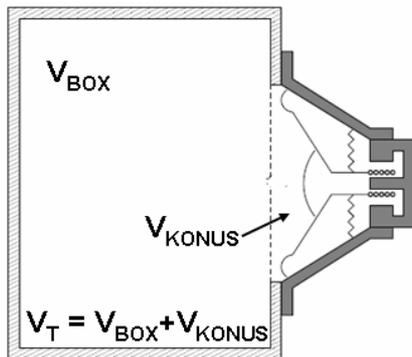


Bild 10.2a: Volumenmethode

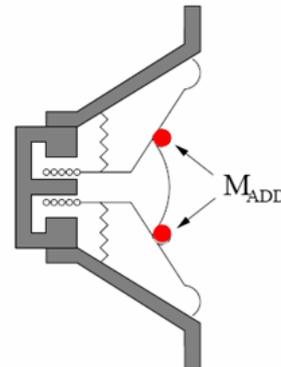


Bild 10.2b: Massemethode

### 10.2.1 Volumenmethode

Die Prozedur zur Ermittlung der Thiele-Small-Parameter nach der Volumenmethode läuft wie folgt:

1) Testvolumen festlegen.

In Abhängigkeit vom Durchmesser (Membranfläche) des zu messenden Lautsprechers ist ein Testgehäuse mit passendem und bekanntem Volumen zu beschaffen. Eine grobe Abschätzung des erforderlichen Volumens für das Testgehäuse kann mit nachfolgender Tabelle vorgenommen

D [cm]	V <sub>T</sub> [Ltr]
8	3
10	5
13	7
17	12
20	17
25	30
30	55
38	140

werden. Es muss jedoch nicht extra gefertigt werden, denn jedes vorhandene Gehäuse in dieser Größenordnung ist geeignet, vorausgesetzt es führt zu einer Resonanzverschiebung des Lautsprechers im Bereich zwischen 20% und 50%. Die Resonanzverschiebung wird durch LIMP kontrolliert und angezeigt (s. Bild 10.5a).

**Beispiel:** Laut Tabelle soll für ein 17 cm Chassis das Volumen des Testgehäuses in etwa 12 Liter betragen. Bei der Eingabe des Testvolumens (Closed Box Volume) in der Maske „Closed Box Method“

ist zu berücksichtigen, dass zu dem exakten Volumen des Testbox das Volumen des Lautsprecherkonus addiert werden muss (s. Bild 10.2a).

2) Kalibrieren

Schalter SW1 der ARTA MessBox in Stellung ‚Impedance Measurement‘ bringen und SW2 in Stellung Imp. Cal. Mit CAL aus der oberen Menüleiste das Menü ‚Calibrate Input Channels‘ öffnen und das System kalibrieren (Bild 10.2c).

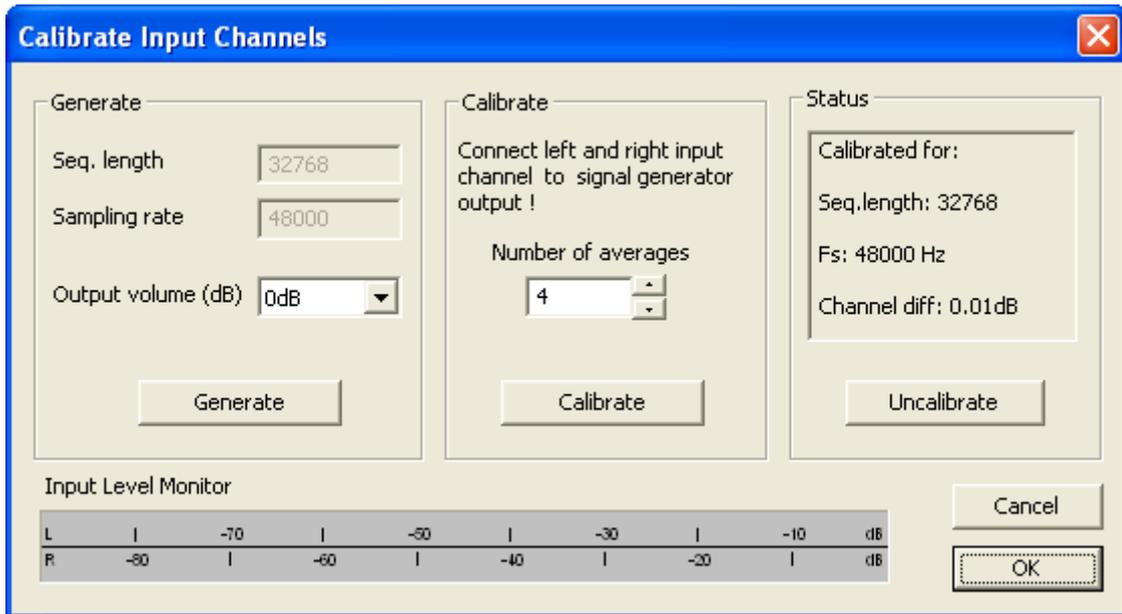


Bild 10.2c: Kalibrierungsmenü in LIMP

3) Messung des Lautsprechers “free air”

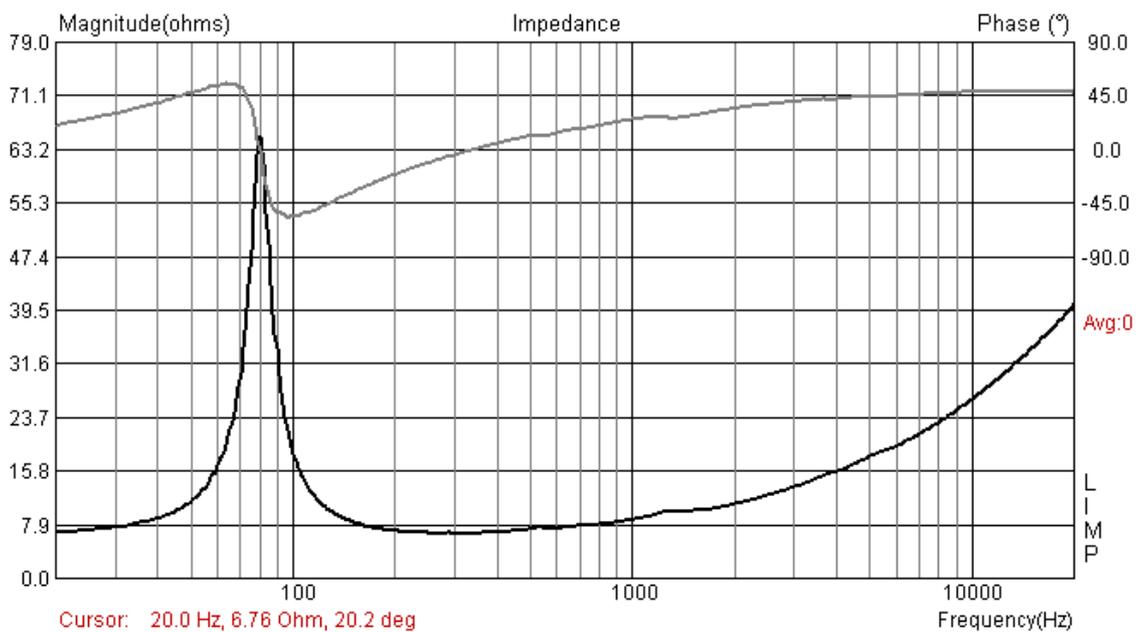
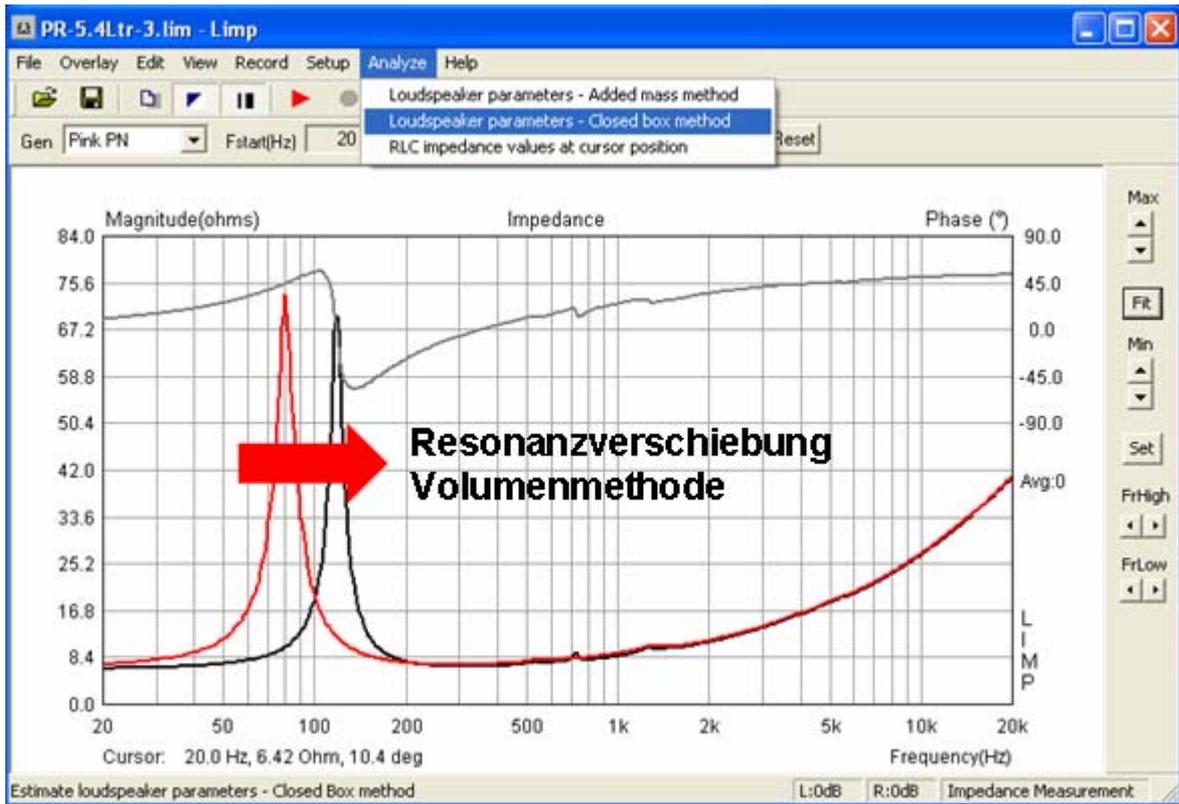


Bild 10.3: Impedanzgang des LS ohne Gehäuse

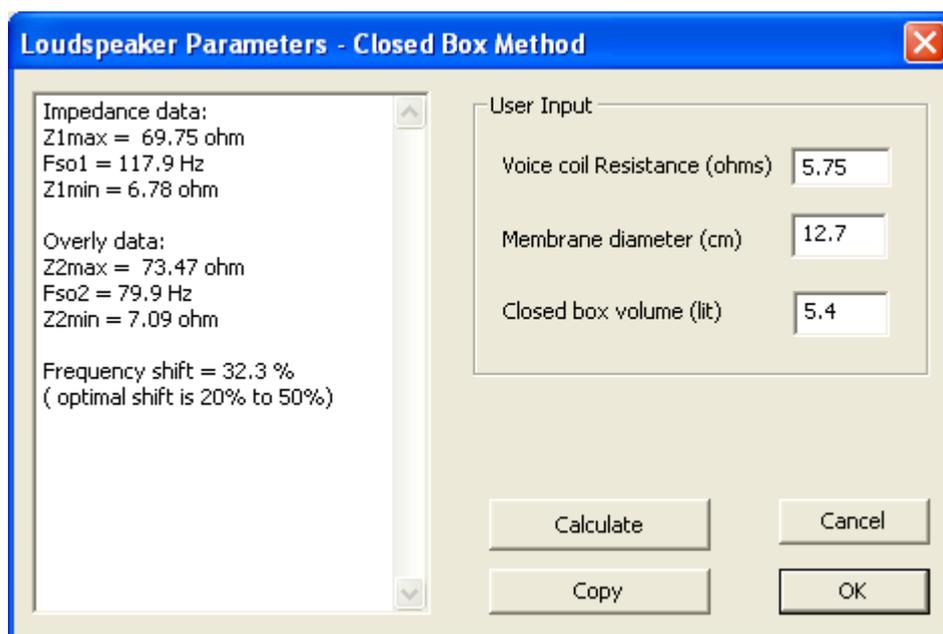
- 3) Die free-air-Messung mit **Overlay** → **Set** speichern (Kurve wird gelb)
- 4) Die Messung des LS im Testgehäuse durchführen (s. Bild 10.2a)



**Bild 10.4:** Impedanzgang des LS im Gehäuse (schwarz) und free air (rot)

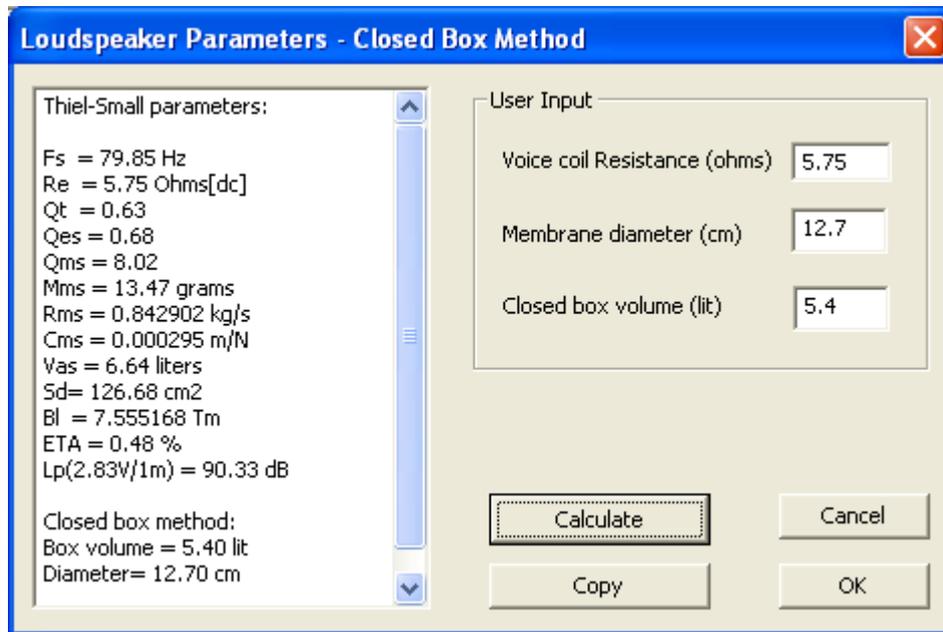
5) Über das Menü **Analyze** → **Loudspeaker parameters – Closed box method** können nun die erforderlichen Parameter ( $R_{DC}$ ,  $D_D$ ,  $V_T$ ) im Bereich ‚User Input‘ eingegeben werden (siehe auch 10.2.1).

*Anmerkung:* Falls Sie keinen vollständigen Satz TSP benötigen, sondern nur  $EBP = (f_s/Q_{ES})$  bestimmen wollen, drücken Sie nach Messung des Impedanzganges des LS ohne Gehäuse ‚Calculate‘.



**Bild 10.5a:** Menü für die Berechnung der TSP

Falls die Eingabefelder für Eingaben gesperrt sind (graue Hinterlegung), ist noch kein Overlay definiert. Durch Betätigung von ‚Calculate‘ errechnet LIMP die TSP (s. Bild 10.5b).



**Bild 10.5b:** Berechnete TSP

#### 6) Copy

Durch ‚Copy‘ können die errechneten Werte als ASCII in beliebige Dateien kopiert werden. Die Ausgabe erscheint wie folgt:

#### **Thiele-Small Parameters:**

$F_s = 79.85 \text{ Hz}$   
 $R_e = 5.75 \text{ Ohms[dc]}$   
 $Q_t = 0.63$   
 $Q_{es} = 0.68$   
 $Q_{ms} = 8.02$   
 $M_{ms} = 13.47 \text{ grams}$   
 $R_{ms} = 0.842902 \text{ kg/s}$   
 $C_{ms} = 0.000295 \text{ m/N}$   
 $V_{as} = 6.64 \text{ liters}$   
 $S_d = 126.68 \text{ cm}^2$   
 $Bl = 7.555168 \text{ Tm}$   
 $ETA = 0.48 \%$   
 $L_p(2.83V/1m) = 90.33 \text{ dB}$

#### Closed box method:

Box volume = 5.40 lit  
 Diameter = 12.70 cm

### 10.2.2 Massemethode

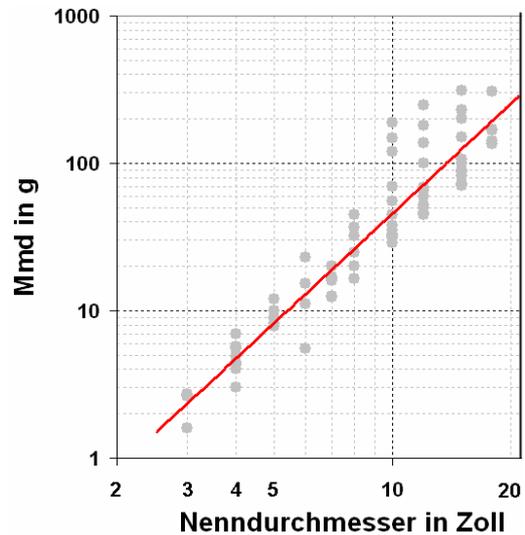
Die Prozedur zur Ermittlung der Thiele-Small-Parameter nach der Massemethode läuft wie folgt:

1) Testmasse festlegen.

In Abhängigkeit vom Durchmesser (Membranfläche) des zu messenden Lautsprechers ist ein Testmasse mit passendem Gewicht zu beschaffen. Auch bei der Massemethode (Bild 10.2b) soll durch Aufbringen einer Zusatzmasse eine Resonanzverschiebung zwischen 20% und 50% erreicht werden. Eine Zusatzmasse in der Größenordnung der Membranmasse  $M_{MD}$  führt in etwa zu einer Senkung der Resonanzfrequenz von 30%.

Sollte die Membranmasse nicht bekannt sein, so kann mit nebenstehendem Diagramm eine grobe Abschätzung vorgenommen werden.

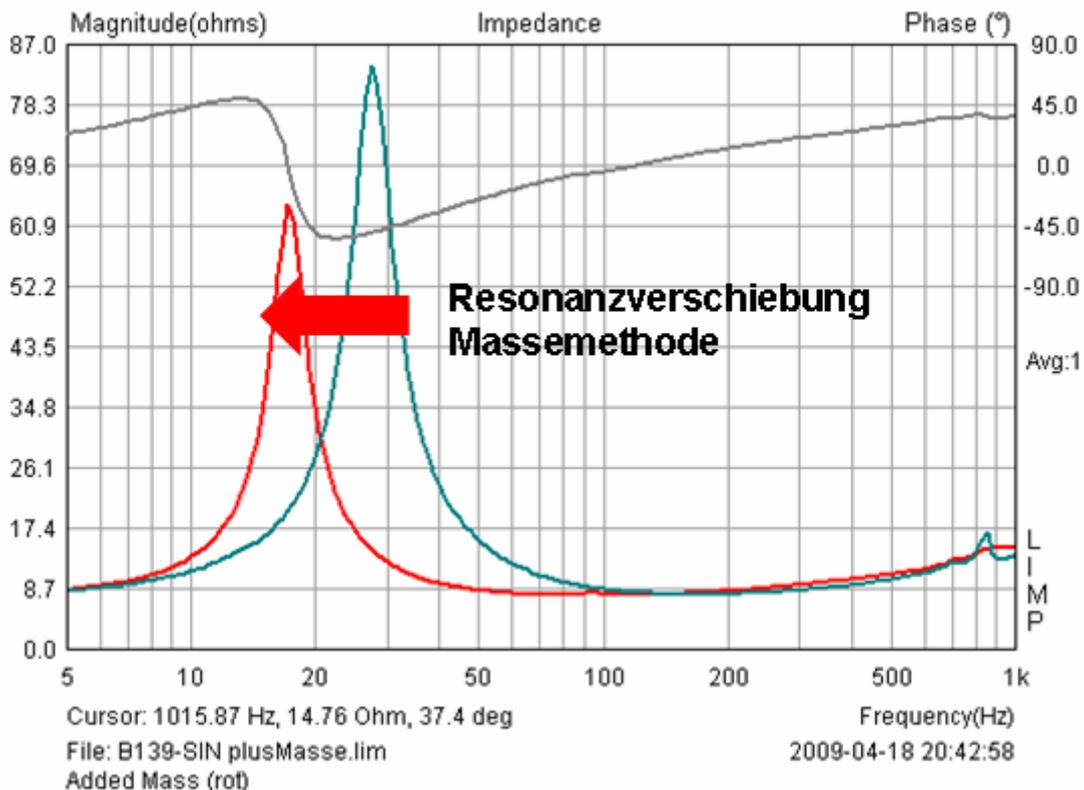
**Beispiel:** Bei einem 8 Zoll Chassis wird  $M_{MD}$  gem. Diagramm zwischen 15 und 50 Gramm betragen. Eine Zusatzmasse von 25 Gramm sollte für den ersten Versuch passen und zu einer auswertbaren Messung führen.



2) und 3)

Punkt 2 und Punkt 3 werden analog der Volumenmethode gehandhabt.

4) Die Messung des LS mit Zusatzmasse durchführen (s. Bild 10.2b)



**Bild 10.6:** Lautsprecher mit (rot) und ohne (grün) Zusatzmasse

5) Über das Menü **Analyze** → **Loudspeaker parameters – Added Mass Method** können nun die erforderlichen Parameter ( $R_{DC}$ ,  $D_D$ ,  $M_{ADD}$ ) im Bereich ‚User Input‘ eingegeben werden (siehe auch 10.2.1).

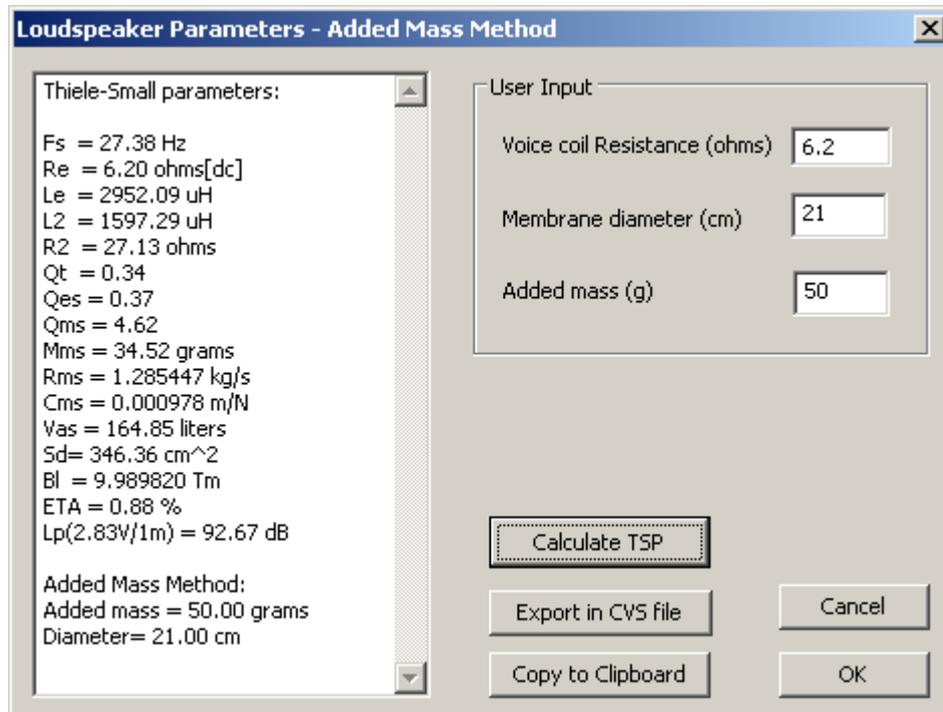


Bild 10.7: Eingabe und Berechnung der TSP

6) Copy

Durch ‚Copy to Clipboard‘ oder ‚Export in CSV File‘ können die errechneten Parameter exportiert werden. Sofern mit mehreren Messungen Statistik betrieben werden soll, empfiehlt sich der CSV-Export, denn dann steht die volle Funktionalität von Excel zur Verfügung.

### 10.2.3 Anmerkungen zu TSP-Messungen

Bedenken Sie, dass Sie „Kleinsignalparameter“ messen, d.h. der Pegel des Messsignals sollte ca. 1 Volt RMS nicht überschreiten, da ansonsten der Lautsprecher außerhalb seines linearen Bereiches betrieben werden könnte. In diesem Zusammenhang muss beachtet werden, dass der Energiegehalt der in LIMP zur Verfügung stehenden Messsignale (PN, Stepped Sine) unterschiedlich ist. Bild 10.8 zeigt Impedanzverläufe für beide Anregungssignale bei identischer Verstärkung. Die rote Kurve gilt für die Anregung mit ‚Stepped Sine‘ und die schwarze Kurve für das Rauschsignal. Es ist deutlich zu sehen, dass das Sinussignal zu einer tieferen Resonanzfrequenz führt und somit in der Abfolge auch zu etwas anderen TSP.

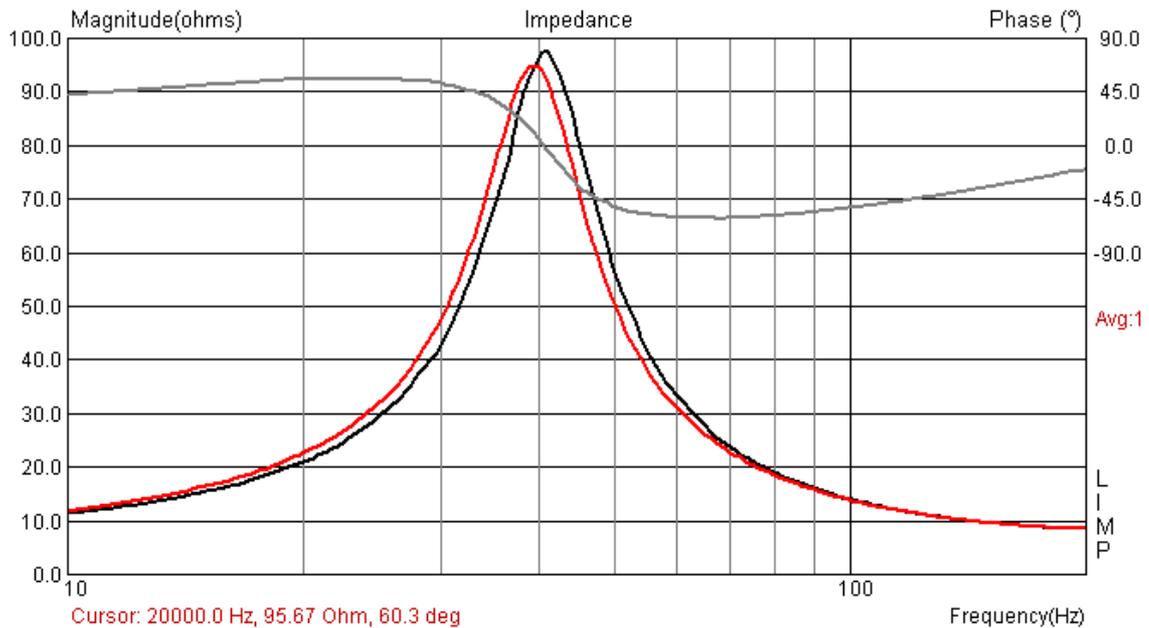


Bild 10.8: Impedanzgänge bei unterschiedlicher Anregung (rot = Stepped Sine, schwarz = PN)

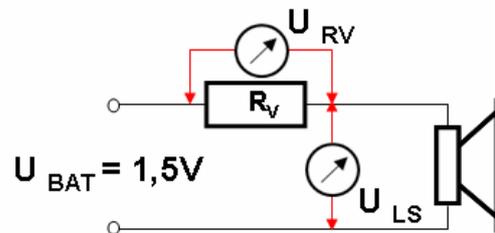
Bezüglich der Auswirkung der Messlage (horizontal, vertikal) auf die TSP des Chassis gibt es in Foren etliche Diskussionen. In der Literatur wird empfohlen, die Chassis in Einbaulage zu messen, also mit horizontaler Lautsprecherachse [27].



Bild 10.8: Messlage bei der Messung der TSP

### 10.2.4 Messung des Gleichstromwiderstandes mit einem Billig-Multimeter

Wenn Sie nicht sicher sind, ob Ihr Multimeter zur Messung des Gleichstromwiderstandes  $R_{DC}$  genau genug ist, können Sie sich mit dem folgenden Trick behelfen. Selbst mit einem sehr einfachen Multimeter lassen sich mit dieser Methode hinreichend hohe Genauigkeiten erzielen:



$$R_{DC} = \frac{R_V \cdot U_{LS}}{U_{RV}}$$

- Schalten Sie einen bekannten Widerstand  $R_V$  (z.B. 8,2 Ohm  $\frac{1}{4}$  Watt, 1%) und den Lautsprecher in Reihe
- Klemmen Sie eine 1,5 V Batterie an
- Messen Sie mit einem Multimeter die Spannung  $U_{RV}$  über dem Widerstand  $R_V$  und die Spannung  $U_{LS}$  über dem Lautsprecher
- Der Gleichstromwiderstand des Lautsprechers berechnet sich wie folgt  $R_{DC} = R_V \cdot U_{LS} / U_{RV}$

**Beispiel:**

4 Ohm Tieftöner

Gewählt:  $R_V = 4.7$  Ohm,

Gemessen:  $U_{RV} = 0.8368$  V,  $U_{LS} = 0.5591$  V

Berechnet:  $R_{DC} = 4.7 \cdot 0,5591 / 0.8368 = 3.14$  Ohm (Herstellerangabe = 3.10 Ohm)

### 10.3 RLC-Messung mit LIMP

LIMP ermittelt den Wert von Widerständen, Kondensatoren und Spulen durch Berechnung des resistiven, induktiven oder kapazitiven Anteils der Impedanz. Bild 10.7 zeigt als Beispiel die Impedanzkurve einer Spule mit einem nominalen Wert von 1,5 mH.

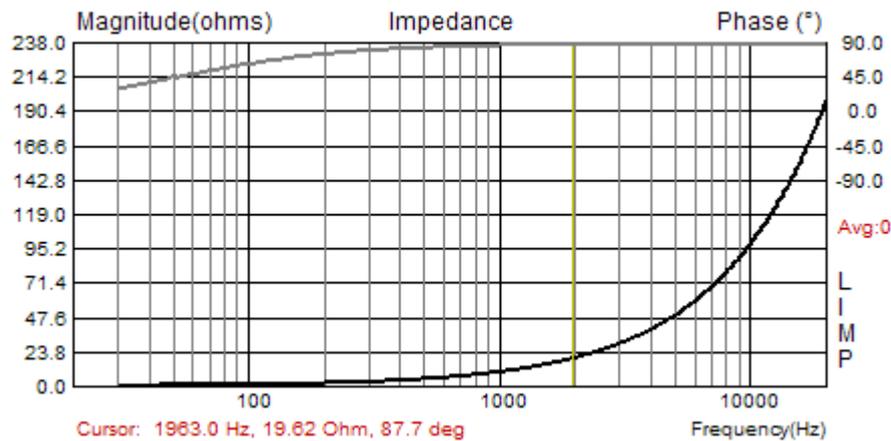
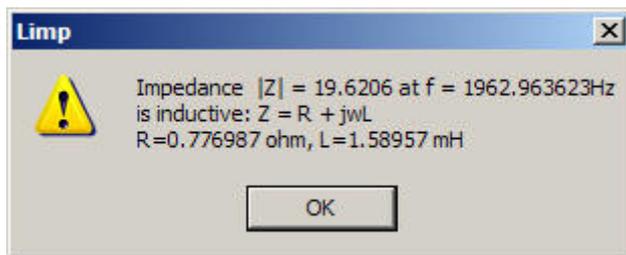


Bild 10.7: Impedanzverlauf einer 1.5mH Spule



Über das Menü **Analysis** → **RLC Impedance value at cursor position** erhält man das Ergebnis wie links gezeigt.

LIMP weist aus, dass die gemessene Impedanz an der Cursorposition einen resistiven Anteil von 0.776987 Ohm und einen imaginären induktiven Teil mit einem Wert von 1.589mH

hat. Auf gleiche Weise werden mit LIMP auch Kondensatoren oder reine Widerstände gemessen.

Für die Durchführung von RLC-Messungen ist es wichtig, dass vor der Messung eine Kalibrierung durchgeführt wird, am besten mit dem verbundenen Prüfling.

Warum ist eine Kalibrierung erforderlich? Selbst bei kleinen Differenzen in der Empfindlichkeit beider Eingangskanäle der Soundkarte (z.B. 0.1dB) kann es passieren, dass LIMP unter bestimmten Bedingungen fehlerbehaftete Ergebnisse liefert, da die Phase einer Induktivität nahezu 90 Grad und die eines Kondensators nahezu -90 Grad beträgt.

Für den Fall, dass die über dem Generator gemessene Spannung  $V_1$  und die über der Impedanz  $Z$  gemessene Spannung  $V_2$  durch Unterschiede in der Empfindlichkeit der beiden Messkanäle verfälscht wird, kann das dazu führen, dass die ermittelte Impedanz auch Phasenwerte von mehr als 90 Grad ausweist und die Phase einen Sprung um 180 Grad macht (s. Bild 10.9).

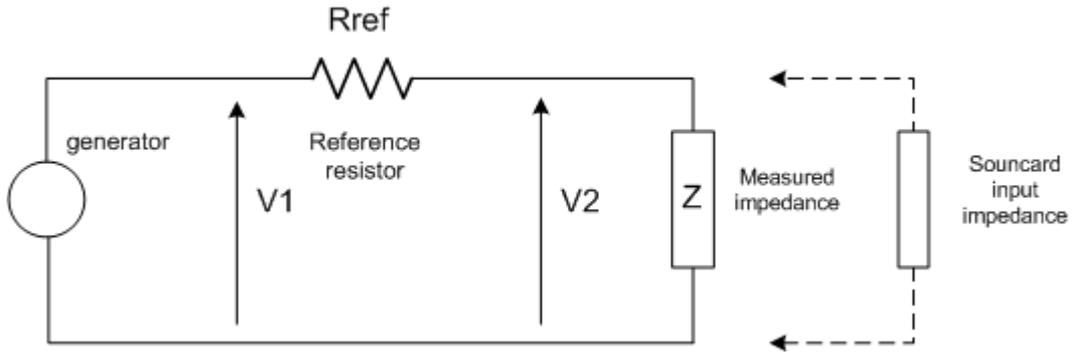


Bild 10.8: Messaufbau für eine Impedanzmessung

Bild 10.9 zeigt das Ergebnis einer Kapazitätsmessung ohne Kalibrierung. Bis ca. 1200 Hz läuft die Phase bei nahezu +90 Grad und vermittelt so den Eindruck, dass es sich um eine Induktivität handelt. Bild 10.10 zeigt das Ergebnis der Messung nach einer Kalibrierung. Es ist zu sehen, dass die Phase sich im gesamten Frequenzbereich nun so verhält wie erwartet.

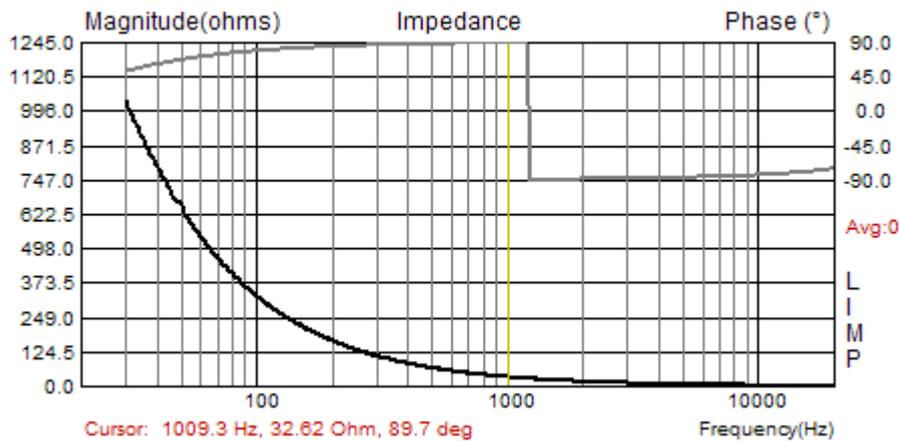


Bild 10.9: Unkalibriert ermittelte Impedanz eines Kondensators mit 4.7uF/250V

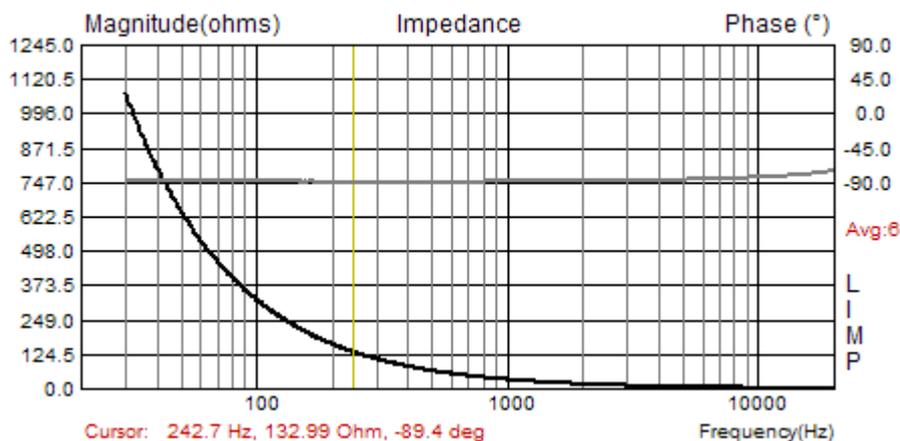


Bild 10.10: Kalibriert ermittelte Impedanz eines Kondensators mit 4.7uF/250V

Nicht alle LIMP-Nutzer werden das oben geschilderte Problem haben. Wie bereits ausgeführt, existiert das Problem nur, wenn die Spannung V2 über der Impedanz höher ist als die Spannung V1 über dem Generator. Um das zu umgehen, kann entweder die Empfindlichkeit des Prüfkopfes (Probe) verändert werden oder die Eingangskanäle werden einfach getauscht. Wenn die

Eingangskanäle getauscht werden, muss natürlich auch der Referenzkanal im 'LIMP Measurement Setup' getauscht werden.

**Anmerkung:**

Um richtige Messwerte für Kapazität und Induktivität zu erhalten, sollte der Cursor auf eine Frequenz gesetzt werden, bei der die Impedanz kleiner ist als 100 Ohm. Das stellt sicher, dass die Messungen im Bereich von ca. 1% Toleranz liegen. Die Begründung liegt darin, dass der gemessenen Impedanz entweder der Messfühler (Probe) oder die Eingangsimpedanz der Soundkarte mit typisch 10k Ohm parallel geschaltet werden.

## 10.4 Die Genauigkeit der Impedanzmessung

Bei sauberem Messaufbau sollte der Messfehler bei der Impedanzmessung mit LIMP kleiner 1% sein. Sollte das nicht gegeben sein, so ist häufig eine der folgenden Fehlerquellen dafür verantwortlich:

1. Die Empfindlichkeit der Eingangskanäle der Soundkarte ist unterschiedlich
2. Die Soundkarte hat eine zu niedrige Eingangsimpedanz (10-20 kOhm)
3. Das Messkabel zwischen Leistungsverstärker und Lautsprecher ist zu lang

Abhilfe kann durch folgende Maßnahmen geschaffen werden:

1. Kalibrierung der Soundkarte (siehe Kapitel 10.2, Bild 10.2b)
2. Eine Soundkarte mit hoher Eingangsimpedanz verwenden (Spezifikation prüfen, professionelle Soundkarten haben Eingangsimpedanzen von 1MOhm) oder einen Eingangsbuffer vorschalten.
3. Bei zu langen Messkabeln gehen die induktiven oder kapazitiven Kabelanteile in die Messung ein. Das gilt auch für Übergangswiderstände an Klemmen oder Steckern. Die Devise lautet also:
  - a. Kurze Messkabel mit hinreichendem Querschnitt (ca. 1,5 mm<sup>2</sup> oder größer) verwenden
  - b. Falls längere Messkabel verwendet werden müssen, den Referenzwiderstand möglichst in der Nähe der Lautsprecherklemme anbringen. Siehe hierzu auch „[ein einfacher Messaufbau zur Impedanzmessung ...](#)“,
  - c. Auf saubere Kontakte achten. Nur Stecker und Klemmen von unzweifelhafter Qualität verwenden <sup>Anm.)</sup>.

**Anmerkung:** „Messleitungen“, wie im rechten Bild dargestellt, sind oft eine Fehlerquelle bei Messungen an Lautsprechern. Da die Kabel nicht selten nur an die Krokodilklemmen geklemmt sind, gibt es in der Abfolge „variable Übergangswiderstände“, was der Reproduzierbarkeit von Messungen nicht gerade zuträglich ist. Wenn Sie derartige Produkte verwenden, dann bitte jede Verbindung prüfen und ggf. nachlöten.



## 11. Empfehlungen für Lautsprecherspezifikationen

Die Messung an Lautsprechern ist kein neues Thema, demzufolge ist es nicht verwunderlich, dass das Gebiet normativ erfasst ist. An dieser Stelle sollen – ohne Anspruch auf Vollständigkeit - zwei Standards genannt werden:

- AES2-1984 (r2003): AES Recommended Practice, Specification of Loudspeaker Components Used in Professional Audio and Sound Reinforcement
- IEC 60268-5: Sound System Equipment – Part 5: Loudspeakers

Nicht immer sind Normen langweilig, sie stellen in aller Regel den Stand der Technik dar und sind darüber hinaus konzentrierte Wissens- oder Erfahrungssammlungen aus der Industriepraxis.

Im Folgenden wird beispielhaft der Anforderungskatalog an eine Spezifikation für Bass- und Hochtonlautsprecher aus der AES2 gezeigt.

### Low-Frequency Drivers

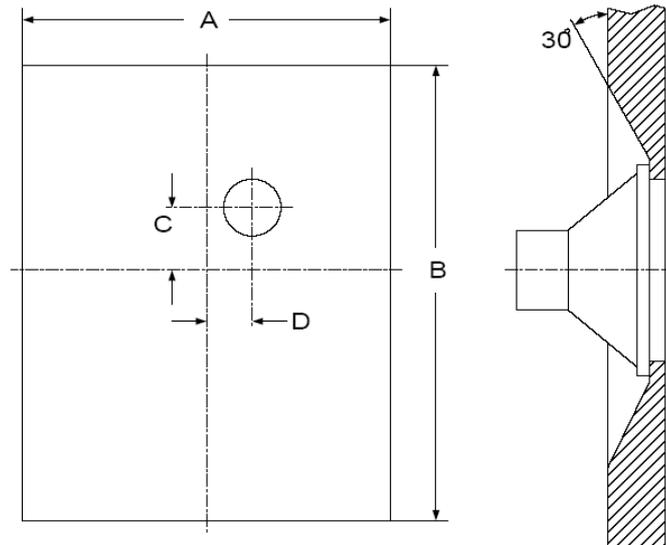
1. Dimensions and weight
2. Dimensioned line drawings
3. Mounting information
4. List of accessories
5. Description of electrical connections
6. Additional descriptive information
7. Physical constants; piston diameter, moving mass, voice-coil winding depth and length, top-plate thickness at voice coil, minimum impedance  $Z_{min}$ , and transduction coefficient.
8. Thiele-Small parameters:  $f_s$ ,  $Q_{TS}$ ,  $\eta_0$ ,  $V_{AS}$ ,  $Q_{ES}$ ,  $Q_{MS}$ ,  $RE$ ,  $SD$
9. Large-signal parameters:  $PE(max)$ ,  $X_{max}$ ,  $VD$
10. Frequency response ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ) in standard baffle\*
11. Distortion (second and third harmonic), swept, at 10% rated power
12. Impedance response, free air
13. Power handling in free air, 2 h
14. Displacement limit\*\*
15. Thermal rise after power test
16. Recommended enclosures

### High-Frequency Drivers

1. Dimensions and weight
2. Dimensioned line drawing
3. List of accessories
4. Description of electrical connections
5. Additional descriptive information
6. Description of diaphragm and diaphragm construction
7. Frequency response on plane-wave tube (PWT\*\*\*)
8. Distortion on PWT; swept second and third harmonics at 10% rated power.
9. Impedance on PWT; swept
10. DC voice-coil resistance
11. Power handling on appropriate acoustic load
12. Displacement limit of diaphragm
13. Thermal rise after power test

### Anmerkungen:

- \* Zur Abmessung von Standard Baffles siehe Bild 11.1
- \*\* Diese Empfehlung ist mittlerweile erweitert worden (siehe Abschnitt 11.1)
- \*\*\* Zur Plane Wave Tube siehe AES lid-1991



Abmessung LS	A in mm	B in mm	C in mm	D in mm
200 mm (8 in)	1350	1650	225	150
250 mm (10 in)	1690	2065	280	190
315 mm (12 in)	2025	2475	340	225
400 mm (15 in)	2530	3090	430	280
500 mm (18 in)	3040	3715	505	340

Bild 11.1: Abmessung des IEC Standard Baffles

## 11.1 Ermittlung der Auslenkung $X_{MAX}$

Die AES 2 führt zur Ermittlung der linearen Auslenkung folgendes aus:

*Auslenkung der Schwingspule (Peak), bei der die "Linearität" des Antriebes um 10% abweicht. Die lineare Auslenkung  $X_{MAX}$  kann als % Verzerrung des Eingangsstromes oder als % Abweichung von der Auslenkung über dem Eingangssignal gemessen werden. Der Hersteller hat die verwendete Methode zu benennen. Ferner soll das Verschiebevolumen ( $V_{DPeak} = S_D * X_{MAX}$ ) angegeben werden.*

Diese AES-Empfehlung wurde durch Initiative von W. Klippel erweitert und ist mittlerweile in den Pre-Standard „IEC PAS 62458: Sound System Equipment – Electroacoustical transducers – Measurement of large signal parameters“ eingeflossen.

In der Application Note AN4 [11] für das Klippel-Analyzer-System wird eine Prozedur für die Ermittlung von  $X_{MAX}$  beschrieben, die im Folgenden anhand eines Beispiels mit ARTA sinngemäß umgesetzt wird:

1. Messe die Resonanzfrequenz  $f_s$  des Lautsprechers mit LIMP. Wähle dabei „Stepped Sine“ als Anregungssignal. In diesem Beispiel wurde die Resonanzfrequenz mit  $f_s = 43,58$  Hz bestimmt.
2. Belaste den Lautsprecher unter Freifeldbedingungen mit einem Zweitton-Signal mit  $f_1 = f_s = 43,58$  Hz und  $f_2 = 8,5 f_s = 370,43$  Hz sowie einem Amplitudenverhältnis von  $U_1 = 4 * U_2$  (siehe Bild 11.2) und führe eine Messreihe unter Variation der Amplitude von  $U_{START}$  bis  $U_{ENDE}$  durch.

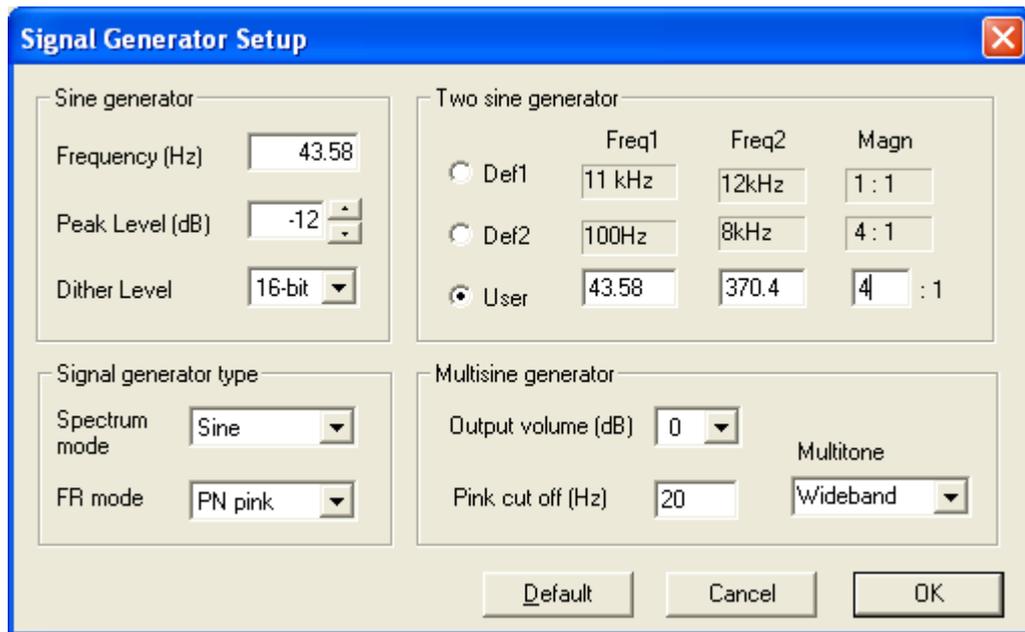


Bild 11.2: Einstellung der Messparameter im „Signal Generator Setup“

3. Messe den Schalldruck im Nahfeld und führe eine Spektralanalyse zur Messung der Amplitude von  $P(f_1)$  und  $P(f_2)$  sowie den harmonischen Komponenten  $P(k \cdot f_1)$  mit  $k=2, 3, \dots, K$  und der Summenkomponente  $P(f_2+(n-1) \cdot f_1)$  sowie der Differenzkomponente  $P(f_2-(n-1) \cdot f_1)$  mit  $n=2, 3$  über der Amplitude  $U_1$  durch.
4. Messe die Peak-Auslenkung  $X(f_1)$  über der Amplitude  $U_1$ . Eine einfache Methode zur Ermittlung der Auslenkung ist in Bild 11.3 dargestellt. Dazu wird mittels eines Messschiebers mit Tiefenmessschieber der Abstand zur Staubschutzkalotte zunächst ohne Signal gemessen und der Wert als Nullpunkt notiert. Anschließend wird der Lautsprecher mit ARTA im  $S_{PA}$ -Mode mit einem Sinussignal bei  $f_s$  angeregt und die Tiefenlehre vorsichtig in Richtung Kalotte geschoben bis ein Kontaktgeräusch zu hören ist. Der für die jeweilige Anregungsspannung ermittelte Wert ist vom Nullpunkt zu subtrahieren, um die zugehörigen Auslenkung zu bekommen.
5. Ermittle THD mit ARTA im  $S_{PA}$ -Mode bei der Resonanzfrequenz mit Sinusanregung als Funktion der Amplitude  $U_1$ :

$$d_t = \frac{\sqrt{P(2f_1)^2 + P(3f_1)^2 + \dots + P(Kf_1)^2}}{P_t} * 100 \%$$

Wechsle auf „Two Sine Anregung“ und wähle einen Frequenzbereich zwischen  $f_2 \pm 2,5 \cdot f_s$  in linearer Darstellung.

Gehe mit dem Cursor auf die in Bild 11.4 gekennzeichneten Frequenzen und notiere die jeweiligen Pegelwerte. Die Modulationsverzerrung zweiter Ordnung

$$d_2 = \frac{P(f_2 - f_1) + P(f_2 + f_1)}{P(f_2)} * 100 \%$$

sowie die Modulationsverzerrung dritter Ordnung

$$d_3 = \frac{P(f_2 - 2f_1) + P(f_2 + 2f_1)}{P(f_2)} * 100 \%$$

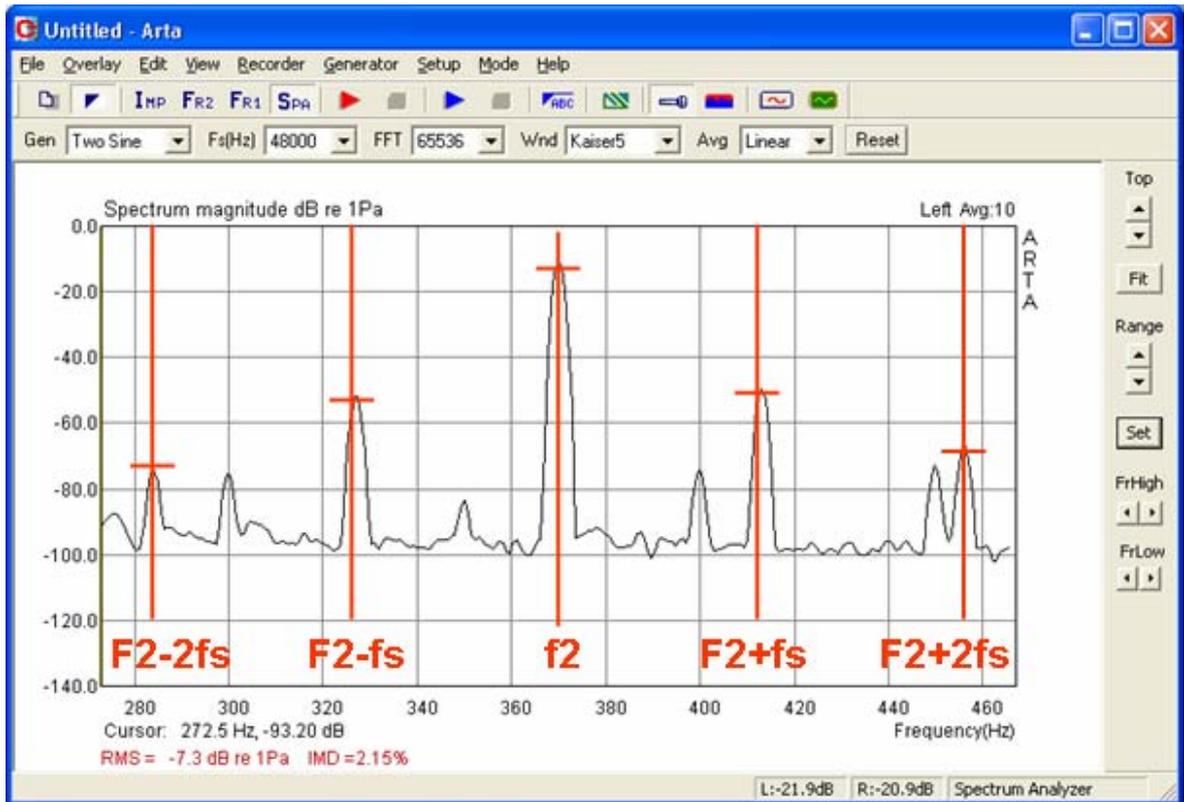


Bild 11.4: Ermittlung der Modulationsverzerrungen zweiter und dritter Ordnung

berechnen sich wie oben in den Formeln angegeben. Dabei ist zu beachten, dass die abgelesenen Pegelwerte vor Einsetzen in die Formel in Absolutwerte umgerechnet werden (Abs.=  $10^{(dB/20)}$ ) müssen. Die folgende Tabelle zeigt ein Beispiel für die Berechnung

	F	P in dB	P abs
f1	43,58		
f2	370,4	-48,6	0,003715
f2-f1	326,9	-89,46	0,000034
f2+f1	414	-87,95	0,000040
f2-2f1	283,3	-86,24	0,000049
f2+2f1	457,6	-103,63	0,000007

Aus diesen Werten errechnen sich die Modulationsverzerrungen zweiter und dritter Ordnung mit  $d_2=1,98\%$  und  $d_3=1,49\%$ .

- Suche den kleinsten Wert U im Bereich zwischen  $U_{START}$  und  $U_{ENDE}$ , bei dem entweder die harmonischen Verzerrungen  $d_i$  oder die Intermodulationsverzerrungen zweiter oder dritter Ordnung  $d_2, d_3$  die 10%-Marke erreichen ( $U_{10\%}$ ).
- Ermittle die Auslenkung  $X_{MAX}$  für die korrespondierende Amplitude  $U_{10\%}$ .

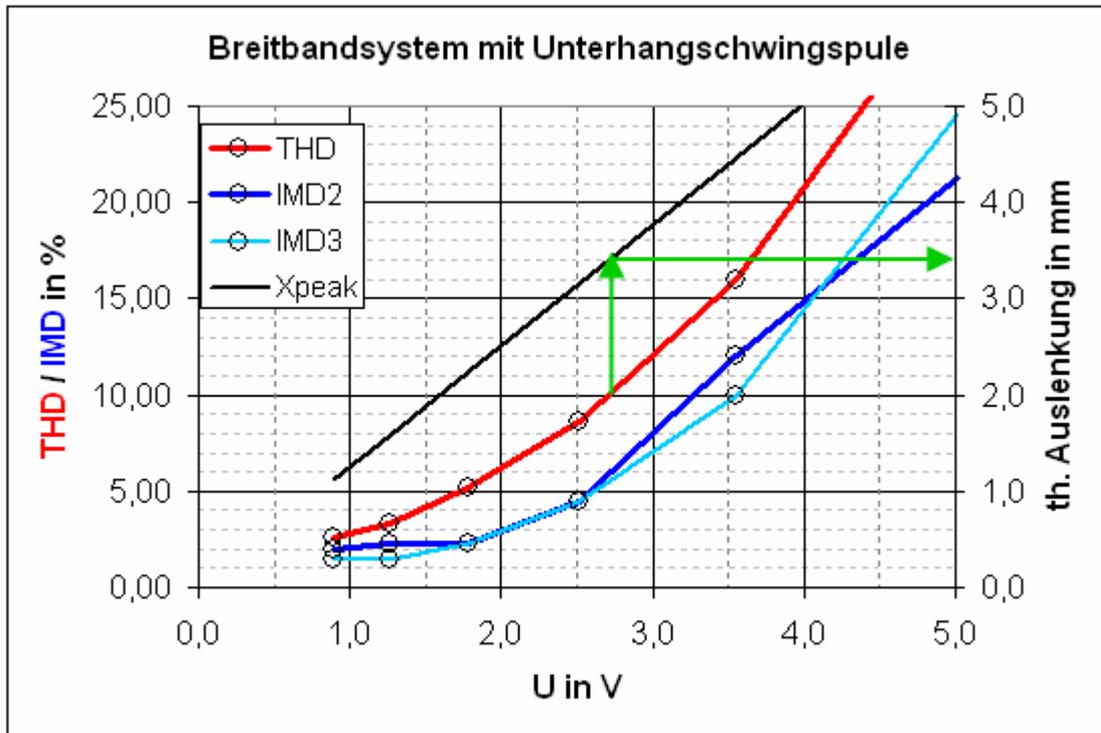


Bild 11.5: Ermittlung der linearen Auslenkung in Anlehnung an [11]

Bild 11.5 zeigt das Ergebnis einer solchen Messprozedur. In diesem Beispiel erreicht THD als erstes die 10%-Marke und ist somit Kriterium für die Ermittlung von  $X_{MAX} = 3,4$  mm (siehe grüne Pfeile).



Anmerkung: Ab Version 1.4 ist das Verfahren automatisiert. Eine detaillierte Beschreibung finden Sie in der ARTA Application Note No 7 [VII].

## 12. ARTA Application Notes

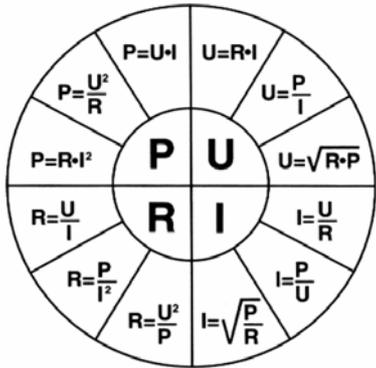
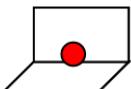
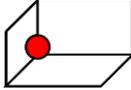
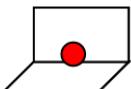
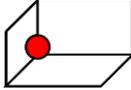
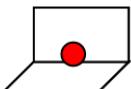
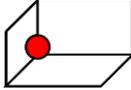
- [I] No 1: ARTA MessBox
- [II] No 2: RLC Messung mit LIMP
- [III] No 3: Why 64 Bit Processing
- [IV] No 4: Ermittlung des Freifeldfrequenzgangs
- [V] No 5: Die ARTA-Mikrofonkalibrierkammer fürs untere Ende
- [VI] No 6: Directivity und Polar
- [VII] No 7: Ermittlung der linearen Auslenkung mit STEPS
- [VIII] No 8: In-Situ Messung zur Abschätzung von Absorptionskoeffizienten mit ARTA (demnächst)

## 13. Literatur

- [1] Mateljan, Ivo, "ARTA-Manuals"
- [2] D'Appolito, Joseph, "Lautsprechermesstechnik", Elektor Verlag, 1999.
- [3] Struck, Temme: "Simulated Free Field Measurements" JAES, Vol. 42, No. 6, Juni 1994.
- [4] Dickason, Vance: "The Loudspeaker Design Cookbook", 4th Edition, Audio Amateur Press, 1991
- [5] Fasold und Veres: "Schallschutz und Raumakustik in der Praxis", Verlag für Bauwesen, Berlin, 1998.
- [6] Khenkin, Alex: "How Earthworks Measures Microphones"
- [7] AES2-1984 (r2003): AES Recommended Practice, Specification of Loudspeaker Components Used in Professional Audio and Sound Reinforcement  
<http://users.skynet.be/william-audio/pdf/aes2-1984-r2003.pdf>
- [8] IEC 60268-5: Sound System Equipment – Part 5: Loudspeakers
- [9] AN 4 - Measurement of Peak Displacement Xmax - Application Note to the KLIPPEL ANALYZER SYSTEM ([www.klippel.de](http://www.klippel.de))
- [10] Griesinger, D.: Beyond MLS - Occupied Hall Measurement with FFT Techniques, 101st Convention of the Audio Engineering Society Nov 8-11 1996, Preprint 4403
- [11] Farina A.: Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique, 108 AES Convention, Paris, 2000.
- [12] Müller S.; Massarani P.: Transfer Function Measurement with Sweeps, JAES, June 2001.
- [13] Mateljan I., Ugrinović K.: The Comparison of Room Impulse Response Measuring Systems, Proceedings of the First Congress of Alps Adria Acoustics Association, Portoroz, Slovenia, 2003, ISBN 961-6238-73-6
- [14] D. Ralph: Speaker Measurement Techniques for Crossover Design,  
<http://www.purespeakers.com/offsets.html>
- [15] D. Ralph: Finding Relative Acoustic Offsets Empirically, Speaker Builder 1/2000
- [16] J. Kreskovsky: It's Just A Phase I Am Going Through,  
<http://www.geocities.com/kreskovs/Phase-B.html>

- [17] John Vanderkooy: The Acoustic Centre,  
[http://www.aes.org/sections/uk/meetings/AESUK\\_lecture\\_0604.pdf](http://www.aes.org/sections/uk/meetings/AESUK_lecture_0604.pdf)
- [18] S. Fuhs, R. Höldrich, G. Tomberger: Validierung des Entfernungsgesetzes und Korrektur der Gruppenlaufzeit und des akustischen Zentrums des Lautsprechers im Adrienne-Verfahren
- [19] Thomas Ahlersmeyer: Akustisch „optimale“ Materialien für Lautsprechergehäuse  
<http://www.picosound.de>
- [20] Mateljan, H. Weber, A. Doric: [Detection of Audible Resonances](#), Proceedings of the Third congress of Alps Adria Acoustics Association, Graz, Austria, 2007
- [21] Jerry Freeman, Techniques to enhance op amp signal integrity in low-level sensor applications Part 1 - 4), [Planet Analog](#)
- [22] Mark Sanfilipo: Subwoofer Measurement Tactics ([www.audioholics.com](http://www.audioholics.com))
- [23] ARTA Hardware & Tools Manual (demnächst)
- [24] Messbedingungen bei Visaton ([www.visaton.de](http://www.visaton.de))
- [25] Mark Gander: Ground Plane Acoustic Measurement of Loudspeaker Systems, JAES Volume 30 Issue 10 pp. 723-731; October 1982
- [26] Melon, Langrenne, Rousseau, Herzog: Comparison of Four Subwoofer Measurement Techniques, JAES Volume 55 Issue 12 pp. 1077-1091; December 2007
- [27] Anderson: Derivation of Moving Coil Loudspeaker Parameters using Plane Wave Tube Techniques, Master Thesis, 2003
- [28] Withold, Waldman: Non-Linear Least Squares Estimation of Thiele-Small Parameters from Impedance Measurements, 1993, Preprint 3511

## 14. Kleine Formelsammlung

																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Lage der Quelle</th> <th>Raumwinkel</th> <th>Pegel</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td><math>4\pi</math></td> <td><b>0 dB</b></td> </tr> <tr> <td></td> <td><math>2\pi</math></td> <td><b>+6 dB</b></td> </tr> <tr> <td></td> <td><math>\pi</math></td> <td><b>+12 dB</b></td> </tr> <tr> <td></td> <td><math>\pi/2</math></td> <td><b>+18 dB</b></td> </tr> </tbody> </table>	Lage der Quelle	Raumwinkel	Pegel		$4\pi$	<b>0 dB</b>		$2\pi$	<b>+6 dB</b>		$\pi$	<b>+12 dB</b>		$\pi/2$	<b>+18 dB</b>	
Lage der Quelle	Raumwinkel	Pegel														
	$4\pi$	<b>0 dB</b>														
	$2\pi$	<b>+6 dB</b>														
	$\pi$	<b>+12 dB</b>														
	$\pi/2$	<b>+18 dB</b>														

..... demnächst mehr.

## 15. Index

<b>A</b>	
Akustische Felder	
Fernfeld.....	70
Freifeld.....	70
Hallfeld.....	70
Nahfeld.....	70
Akustische Messung	
IEC Schallwand.....	160
<b>B</b>	
Baffle Step	
Korrektur.....	98
Bassreflex	
Pegelanpassung Vent.....	103
Volumenflussmethode.....	106
<b>D</b>	
Datenexport	
CSV-Format festlegen.....	84
Dodekaeder.....	79
DUT.....	12
<b>F</b>	
Frequenzweiche	
Delay.....	95
Load and Sum.....	108
<b>H</b>	
Hallradius.....	72, 77
<b>I</b>	
Impedanz.....	10
Genauigkeit.....	158
Messfehler.....	158
Messkabel.....	158
Messung.....	158
Installation	
Programm.....	7
<b>K</b>	
Kalibrieren.....	11, 16
Klirr	
Farina.....	118
Gleitsinus.....	118
STEPS.....	144
<b>L</b>	
LIMP	
Grundeinstellung.....	146
Kondensator messen.....	156
Spulen messen.....	156
Loopback.....	8
Loopback-Kabel.....	20
<b>M</b>	
Membran	
lineare Auslenkung.....	160
Xmax.....	160
MessBox.....	14
Messfenster	
Gate.....	68
Messmikrofon.....	9
Grenzschalldruck.....	33
Kalibrieren.....	33
Messraum	
Abschätzung des Messfensters.....	75
<b>N</b>	
Nachhallzeit	
Abschätzung der Messdauer.....	80
Anregungszeit einstellen.....	80
automatische Auswertung.....	85
grafische Darstellung.....	85
Messaufbau.....	79
Nahfeld	
Baffle Step.....	98
Pegelskorrektur.....	74
Positionierung des Mikrofons.....	73
<b>P</b>	
Pegel	
2 Pi.....	139
4 Pi.....	139
Fernfeld.....	139
Leq.....	121
Nahfeld.....	139
<b>R</b>	
RE	
mit Multimeter messen.....	155
Resonanz	
Gehäuse.....	128
Material.....	129
Membran.....	131
Raum.....	126
<b>S</b>	
Simulation	
SEO.....	95
Winkelfehler.....	88
Soundkarte.....	6
getestete Karten.....	7
Qualität.....	24
Rauschpegel.....	28
testen.....	20

Soundmixer  
  einstellen ..... 7, 21  
STEPS  
  Grundeinstellung..... 141  
  Klirr messen..... 144

***T***

TSP

Anregungspegel wählen..... 154  
  im Testgehäuse messen..... 148  
Messen ..... 154  
Messlage des Lautsprechers..... 154  
mit Zusatzmasse messen..... 152