

STEPS - HANDBUCH

Übertragungsfunktion, Verzerrungsmessung, Maximale lineare Auslenkung, THD-begrenzter Maximalpegel

Basismaterial ARTA-Handbücher & ARTA Kompendium

Dr. Heinrich Weber, deutsche Bearbeitung und Ergänzungen

Dr. Ivo Mateljan, englische Originalhandbücher

© Weber/Mateljan

Version 2.40D, September 2013 (ARTA 1.80)

Änderungen Version 2.30D – ARTA 1.80

Kapitel	Hinweis zu Änderungen / Ergänzungen
-	Separierung vom ARTA-Kompendium
3.2.1	Modifiziert: Einflussparameter bei Verzerrungsmessungen
3.5	Neu: THD-begrenzte Maximalpegelmessung

Inhalt

0. Vorwort..... 4

1. STEPS, Einleitung 4

1.1 Voraussetzungen für die Nutzung und Installation4

1.2 Erforderliches und nützliches Zubehör4

1.3 Pinbelegung von NF-Kabeln und NF-Steckern.....6

2. STEPS, Kalibrierung..... 6

3. Messen mit STEPS..... 6

3.1 Grundeinstellung von STEPS7

3.2 Amplitudenfrequenzgang- und Verzerrungsmessungen mit STEPS.....9

3.2.1 Einflussparameter bei Verzerrungsmessungen.....10

3.3 Spannungs- oder leistungsbezogene Messung mit STEPS.....15

3.4 Messung der maximalen linearen Membranauslenkung mit STEPS18

3.5 Messung des THD-begrenzten Maximalpegels mit STEPS20

7. ARTA Application Notes 29

8. Literatur 29

9. Index..... 30

0. Vorwort

Aufgrund des mittlerweile beträchtlichen Umfangs und der unübersichtlich gewordenen Struktur des ARTA-Kompandiums [2] wurde seitens vieler Anwender eine Aufteilung in separate Handbücher gewünscht. Mit dem vorliegenden STEPS-Handbuch wird ein Schritt in Richtung separater Handbücher eingeleitet.

STEPS ist ein Programm zur Messung von Übertragungsfunktionen und Verzerrungen an Lautsprechern sowie Audioequipment. Darüber hinaus bietet STEPS spezialisierte Messverfahren wie die Messung der maximalen linearen Auslenkung gemäß IEC 62458 und der THD begrenzten Maximalpegelmessung.



STEPS – Übertragungsfunktion, Verzerrung, lineare Auslenkung, max. SPL

Das vorliegende Handbuch soll Anwendern die Nutzung von STEPS aus der ARTA-Programmfamilie nahe bringen. Das STEPS-Handbuch ist weder eine Übersetzung noch ein Ersatz für das englischsprachige Originalhandbuch. Es wird daher empfohlen, das Originalhandbuch parallel zu Rate zu ziehen.

Eine zusätzliche Informationsquelle stellt die ARTA-Homepage dar. Dort werden für den Anwender aktuelle Informationen und Application-Notes bereitgestellt.

Es ist vorgesehen, das Handbuch im Laufe der Zeit ständig zu ergänzen und zu aktualisieren. Dennoch bitten wir um Verständnis, wenn nicht jederzeit jede Maske dem aktuellen ARTA-Release entspricht. Verbesserungs- und Korrekturvorschläge sowie Anregungen zu Programmweiterungen sind natürlich jederzeit willkommen.

1. STEPS, Einleitung

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 / Windows 7 / Windows 8

Prozessor: Pentium, 400 MHz oder höher, Speicher 128k

Soundkarte: voll duplexfähig, 1 x Line Out, 2 x Line In

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 Erforderliches und nützliches Zubehör

Einleitend eine kleine Stückliste mit erforderlichem und nützlichem Zubehör, jeweils versehen mit ersten Hinweisen sowie Querverweisen auf vertiefende Stellen im Kompandium.

Soundkarten

Soundkarten können in drei Gruppen klassifiziert werden:

1. Standard-Soundkarten, die sich auf dem Motherboard des Computers befinden (Onboard)
2. Zusatz-Soundkarten für den PCI- oder ISA-Bus (Steckkarten)
3. Soundkarten, die über eine USB- oder Firewire-Schnittstelle mit dem Computer verbunden sind.

Prinzipiell sind alle drei Typen für den Einsatz von STEPS geeignet, sofern sie einen Ausgangskanal (Line Out) und zwei Eingangskanäle (Line In) besitzen. Bei den Onboard-Soundkarten in Laptops ist das in der Regel nicht gegeben, der Eingangskanal ist oft nur einkanalig (Mono) als Mikrofoneingang (Mic In) ausgeführt.

Leistungsverstärker

Grundsätzlich ist jeder Leistungsverstärker mit linearem Frequenzgang und einer Leistung > 5 bis 10 Watt geeignet. Der Ausgangswiderstand R_A sollte $< 0,05$ Ohm sein. Eine preiswerte Empfehlung, die oben genannte Bedingungen erfüllt - und zusätzlich einem mobilen Einsatz durch geringe Abmessungen entgegen kommt - ist der t.Amp PM40C von Thomann (siehe auch Kompendium, Kapitel 5.4).

Für die Messung der linearen Auslenkung (Abschnitt 3.4) oder der THD-begrenzten Maximalpegelmessung (Abschnitt 3.5) sind schwerere Geschütze aufzufahren. Je nachdem ob HiFi- oder PA-Lautsprecher vor den Laser oder das Mikrofon sollen, sind Leistungen von 200 Watt oder auch mehr erforderlich.

ARTA-MessBox

Die ARTA-MessBox ist nicht zwingend erforderlich, erleichtert jedoch das Messleben ungemein. Beim Wechsel zwischen akustischen und elektrischen Messungen wird dann das lästige Umstöpseln von Kabeln durch das einfache Umlegen eines Kippschalters ersetzt (siehe auch Application Note Nr. 1).

Multimeter (DMM)

Ein Multimeter ist für das Messen mit STEPS nicht erforderlich, jedoch für die Kalibrierung der ARTA-Messkette unabdingbar und darüber hinaus natürlich ein nützliches Werkzeug für den Messalltag. Sofern Sie noch kein Multimeter besitzen, sollten Sie sich idealerweise für ein sogenanntes True RMS Multimeter entscheiden. Das Angebot ist groß und auch unter 100 € gibt es bereits brauchbare Geräte.

Kabel

Zur Verbindung aller genannten Komponenten sind diverse Kabel erforderlich. Spätestens wenn eines fehlt, weiß man deren Wert zu schätzen. Achten Sie bei allen Verbindungen auf Qualität! Wackelkontakte, schlechte Schirmung etc. können einem das Messleben vergällen (s. auch Kompendium, Kap. 6.0.1). Bitte achten Sie darauf, dass alle Verbindungen nur so lang wie nötig sind!

1.3 Pinbelegung von NF-Kabeln und NF-Steckern



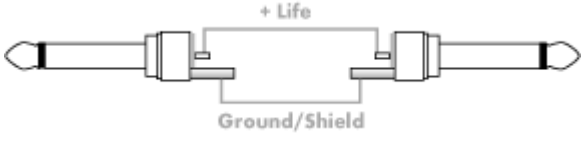
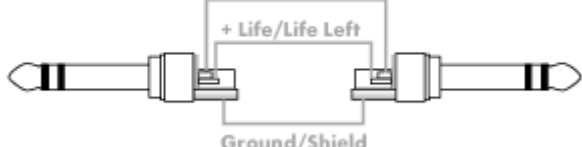
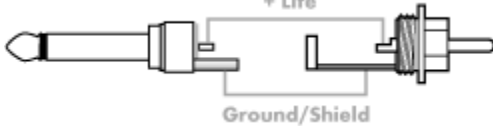
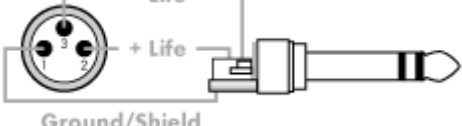
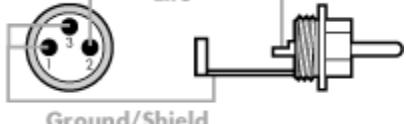
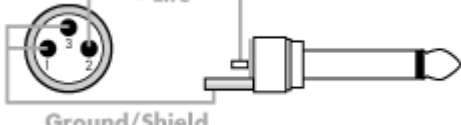
Unsymmetrisch	Symmetrisch
	
	
	
	
	
<p>KLINKE STEREO Gehäuse: Masse (GROUND/ SHIELD) Spitze: Plus (LIFE) Ring: Minus (LIFE)</p>	<p>XLR Pin 1: Masse (GROUND/SHIELD) Pin 2: Plus (LIFE) Pin 3: Minus (LIFE)</p>

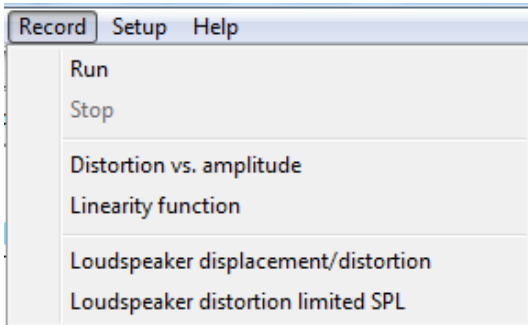
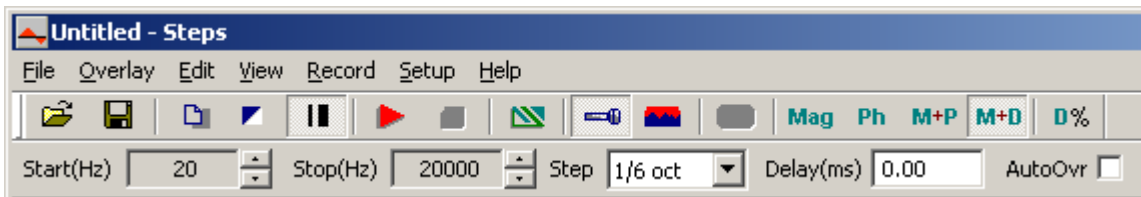
Bild: 1.3.1: Steckerbelegung von Verbindungskabeln

2. STEPS, Kalibrierung

Die Kalibrierung von STEPS unterscheidet sich nicht von der Kalibrierung von ARTA. Es wird daher auf das ARTA-Kompendium [2] verwiesen. Besonderheiten der Kalibrierung, z.B. für die Messung der maximalen Auslenkung oder des THD-begrenzten Maximalpegels werden in den jeweiligen Abschnitten ausgeführt.

3. 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.



Neben der oben genannten Grundfunktionalität bietet STEPS im Menü Record folgende Sondermessungen:

- Klirr vs. Amplitude (Kap. 3.3)
- Linearität X vs. Y (Kap. 3.3)
- Membranauslenkung vs. Klirr (s. Kap. 3.4)
- THD-begrenzter Maximalpegel (Kap. 3.5)

Grundsätzlich ist bei der Arbeit mit STEPS zu beachten, dass der Energiegehalt des Anregungssignals (Stepped Sine) im Vergleich zu den Rauschsignalen höher ist. Um Schaden vom Testobjekt und vom Equipment abzuwenden, sollte man vor der ersten Messung grundsätzlich den Ausgangspegel kontrollieren.

Da viele Symbole / Bedienelemente identisch mit denen von ARTA sind, wird im Folgenden nur auf die Besonderheiten von STEPS eingegangen.

3.1 Grundeinstellung von STEPS

Im Menü 'Measurement Setup' (s. Bild 3.1) 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.

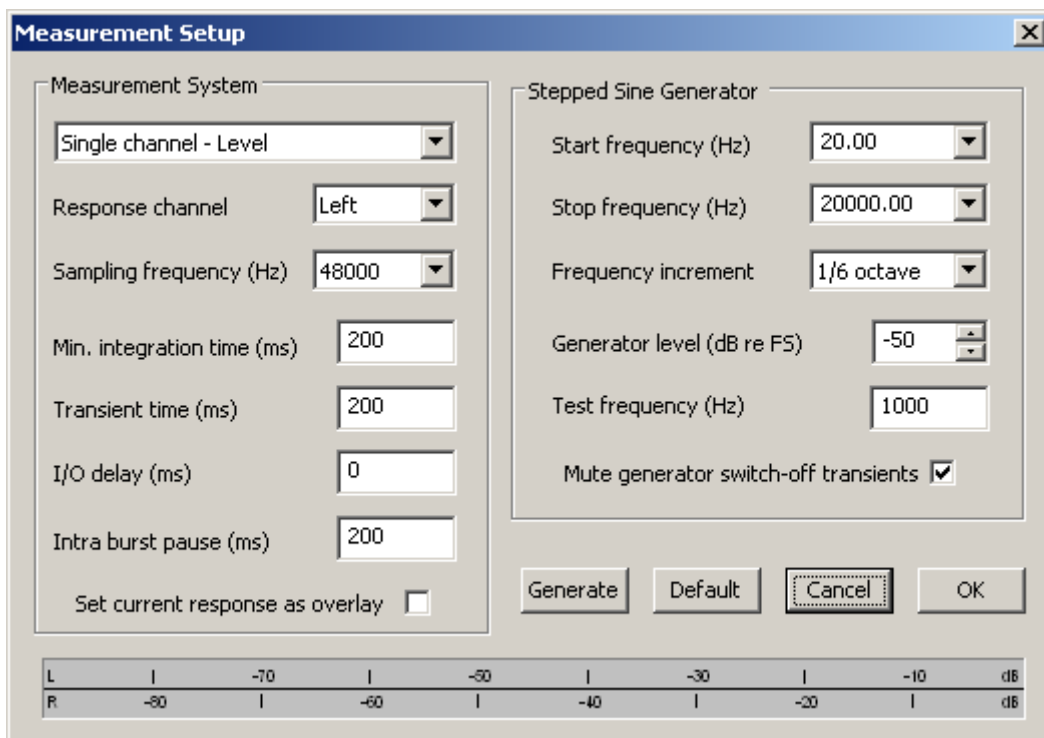


Bild 3.1: Measurement Setup in STEPS

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

Measurement System:

Measurement mode	Wahlmöglichkeit zwischen Ein- und Zweikanalmessung (siehe hierzu auch Kapitel 3.2)
Response channel	Wahl des Eingangskanals (Default = Links)
Sampling frequency	11025 Hz bis 192 kHz
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 $1/F$ [s] betragen. Für eine Frequenz von 20 Hz beträgt die Integrationszeit also $1/20 = 0,05s = 50$ 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 von $t = s \cdot c$ 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 (1/6 bis 1/48 Oktave)
Mute Generator - Switch-off transients	Checkbox aktiv = rechnerische Elimination der Klickgeräusche, die am Ende des Signals entstehen. Das geht zu Lasten etwas längerer Messzeiten.

3.2 Amplitudenfrequenzgang- 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 (1/6 Okt).

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 Mikrophon 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. ARTA-Kompendium, Kapitel 6.3). 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.

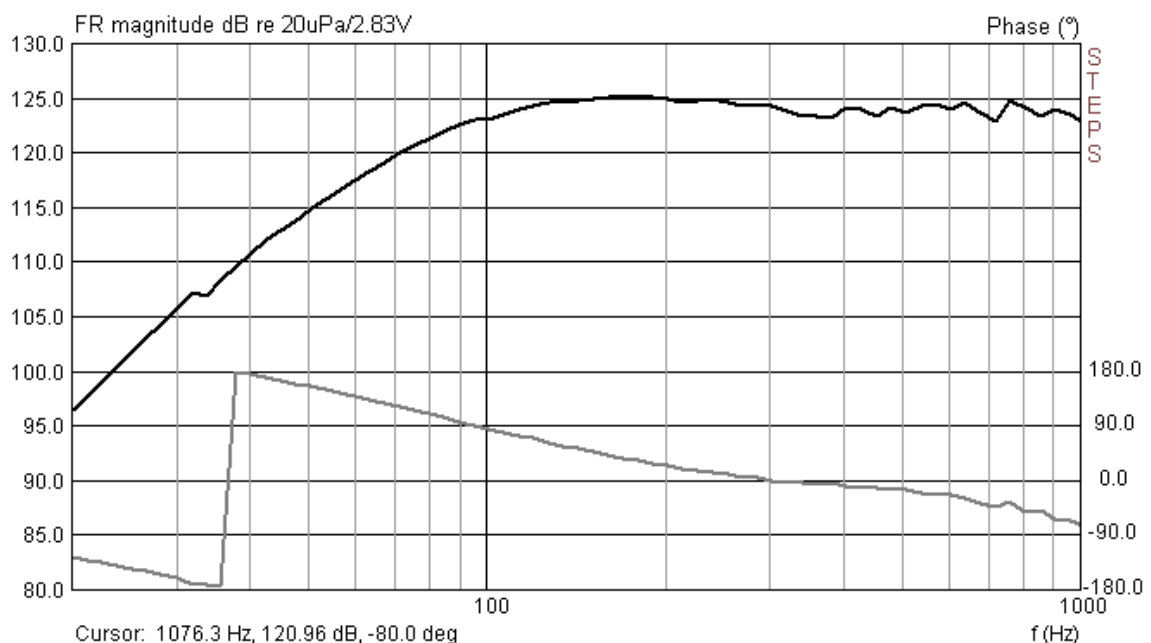


Bild 3.2.1: Frequenzgang eines 6“ TMT gemessen mit 1/12 Oktave Auflösung mit STEPS

Wie bereits oben erwähnt, bietet auch STEPS die Messung im Ein- und Zweikanalmodus an. Im Unterschied zu ARTA wird im Einkanalmodus allerdings der aktuelle Absolutpegel angezeigt und kein Bezugspegel.

Wenn im Einkanalmodus bei STEPS also die Ausgangsspannung des Verstärkers erhöht oder reduziert wird, dann zeigt sich das auch im Pegel des Frequenzganges. Das ist zuweilen ganz nützlich,

wenn man wissen möchte, bei welcher Ausgangsspannung des Verstärkers welcher Pegel am Mikrofon anliegt (s. Bild 3.2.2)

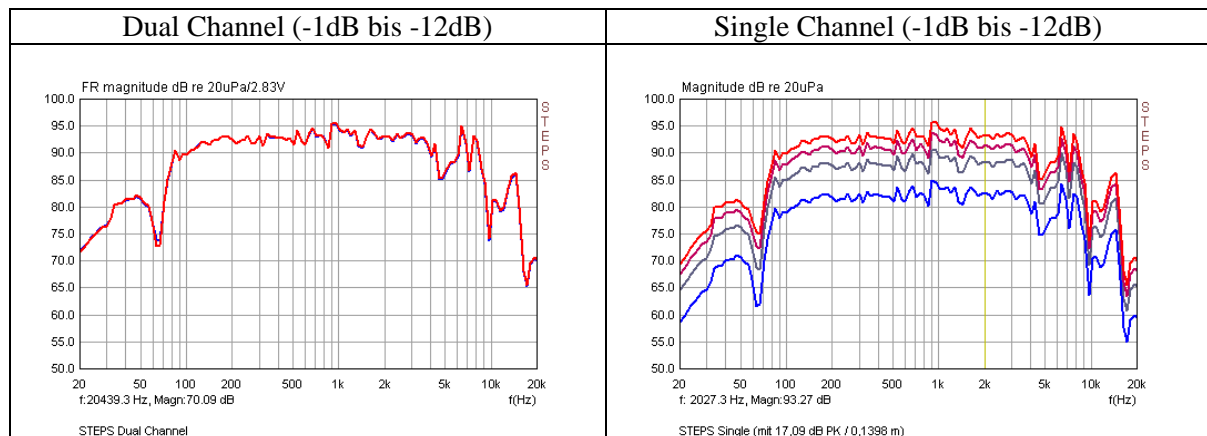


Bild 3.2.2: Amplitudenfrequenzgang im Ein- und Zweikanalmode bei STEPS

Da im Zweikanalmode (Bild 3.2.2, links) der Bezugspegel angezeigt wird (z.B. → dB re 20uPa/2.83V), wird jegliche Veränderung der Ausgangsspannung - je nach Wahl im Menu „View“ → „Sound Pressure Units“ - von STEPS wieder auf 2,83 oder 1 Volt zurückgerechnet. Im Einkanalmode wird jede Veränderung der Ausgangsspannung am Verstärker auch im Pegel angezeigt (Bild 3.2.2, rechts).

Neben der Messung von Frequenzgängen ist STEPS besonders zur Messung von Klirrfrequenzgängen geeignet. Die Messungen mit STEPS sind wenig stör anfällig, dauern aber – wie bereits oben angemerkt - je nach Einstellung deutlich länger als nach der Farina Methode (siehe ARTA-Kompodium, Kapitel 7.1)

Die Steuerung der Anzeige (dB oder %) erfolgt über die Buttons in der oberen Menüleiste.

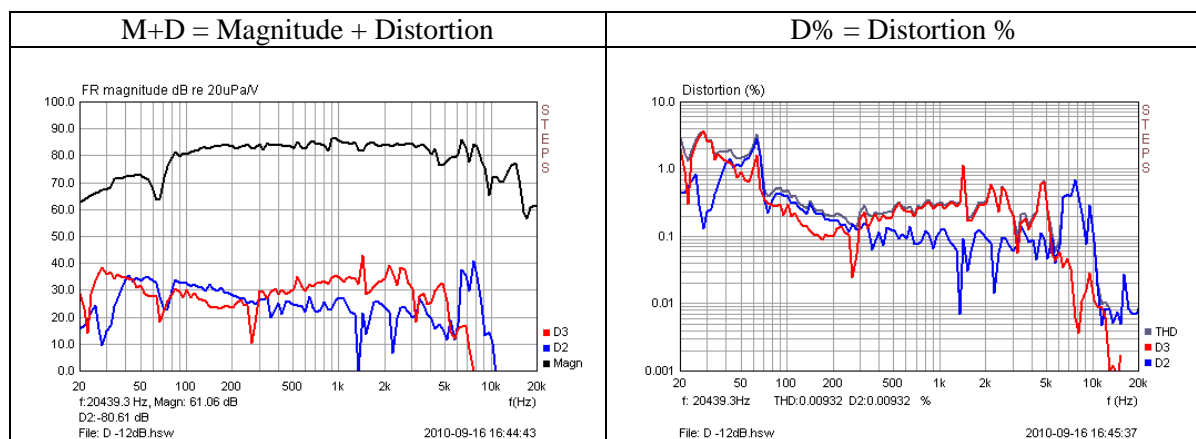


Bild 3.2.3: Optionen zur Darstellung von Klirrdiagrammen

3.2.1 Einflussparameter bei Verzerrungsmessungen

Bei Klirrmessungen ist zu beachten, dass das Ergebnis sowohl durch Komponenten der Messkette als auch durch die Messumgebung beeinflusst werden kann. Bei zu großem Messabstand machen sich die Raumeinflüsse in den Messergebnissen stark bemerkbar und die Vergleichbarkeit von Ergebnissen ist nur noch begrenzt gegeben.

Daher ist hier etwas Aufmerksamkeit angebracht. Vorsichtige Experimente mit verschiedenen Pegeln und Messabständen vermitteln einen Eindruck über die Wirkung der verschiedenen Einflussgrößen. Zwecks Ausschaltung von Raumeinflüssen und Erhöhung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse sollten Klirrmessungen innerhalb des

Hallradius $r_H \approx 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{T_{60}}}$, mit V = Raumvolumen in m³ und T₆₀ = Nachhallzeit in s, oder im Nahfeld durchgeführt werden.

Sofern im Nahfeld gemessen wird, ist darauf zu achten, dass weder Mikrofon noch Mikrofonvorverstärker übersteuert werden. Klirrmessungen für Spezifikationen – so die Empfehlung der AES2 [6] – sollten bei ca. 10% der Nennleistung des Lautsprechers durchgeführt werden. Das sind nicht selten Pegel von oder größer 90 dB in einem Meter Messabstand. Auf eine Nahfeldmessung übertragen würde am Mikrofon ein Pegel von ca. 120 dB anliegen. Dieser Pegelbereich ist für viele preiswerte Mikrofone schon die Grenze des maximal zulässigen Schalldruckes.

Dazu ein Beispiel aus einem Mikrofontest, der in etwa die oben geschilderten Bedingungen erfüllt. Als Testkandidaten standen ein sehr preiswertes Mikrofon (t-Bone MM-1, ca. 35 €) und ein Mikrofon der mittleren Preisregion (Audix TM1, ca. 300 €) auf dem Prüfstand. Als Referenz diente ein Klasse I Messmikrofon (NTI M2210, ca. 1100 €).

Bild 3.2.4 zeigt das t-Bone im direkten Vergleich mit dem Referenzmikrofon (THD, D2, D3, D4). Es wird deutlich, dass das t-Bone nicht unbedingt für anspruchsvolle Klirrmessungen geeignet ist, denn die Abweichungen vom Referenzmikrofon sind erheblich.

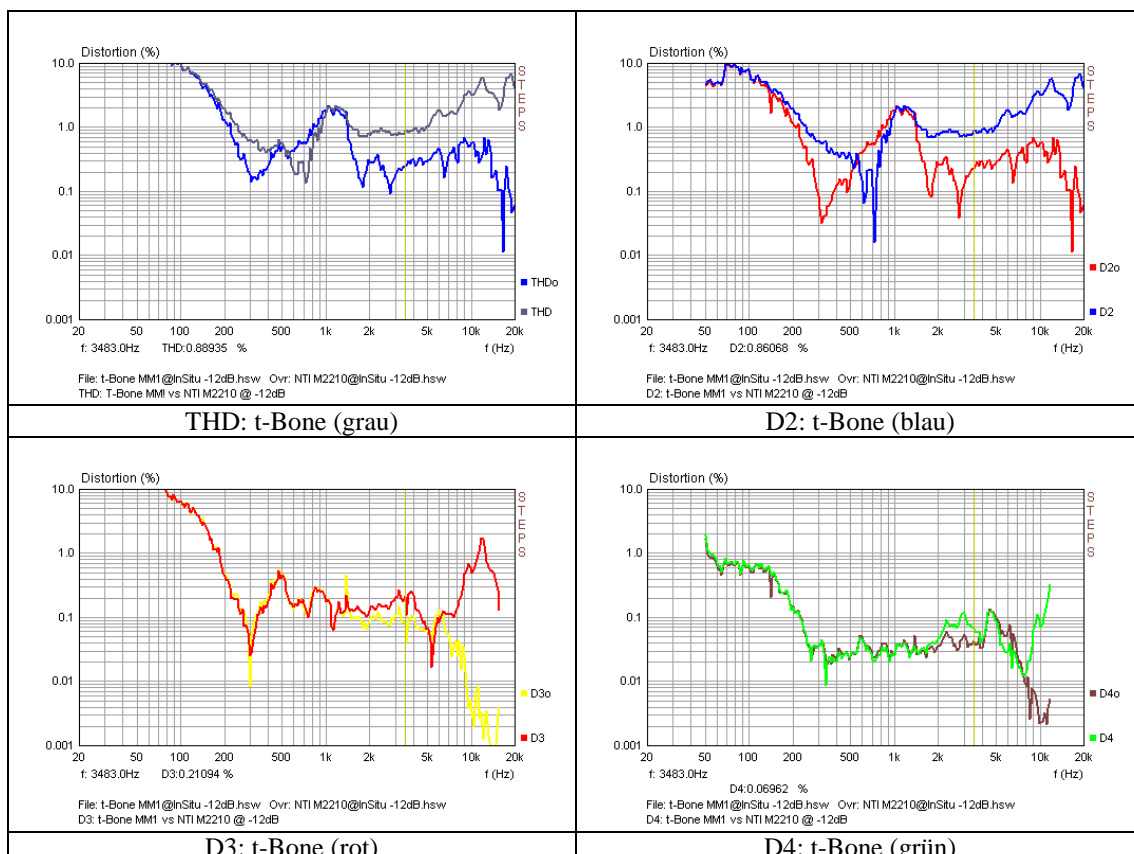


Bild 3.2.4: Direkter Vergleich t-Bone MM-1 vs. NTI M2210

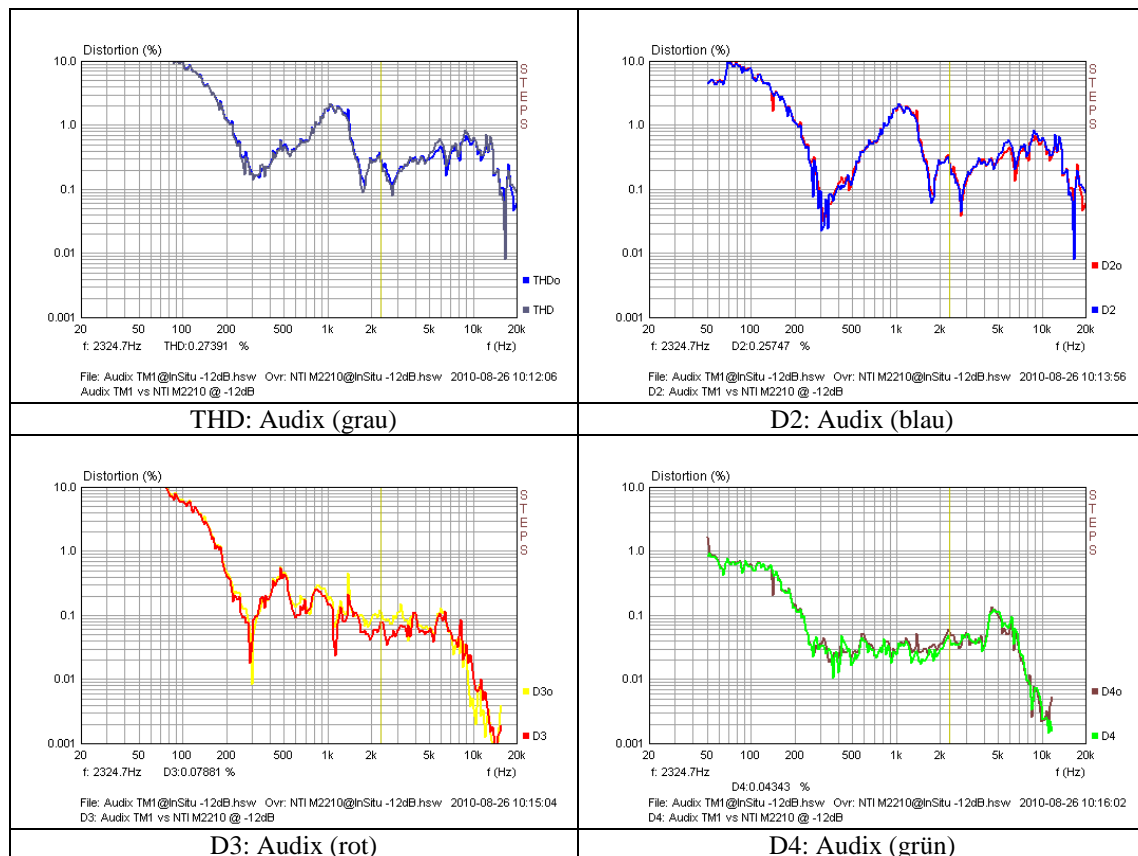


Bild 3.2.5: Direkter Vergleich Audix TM1 vs. NTI M2210

Der zweite Testkandidat schlägt sich in dieser Disziplin hingegen mehr als anständig (s. Bild 3.2.5). Das Audix TM1 und das Referenzmikrofon unterscheiden sich kaum. Dieser Vergleich soll unter anderem zeigen, dass sich ein Streit um Nachkommastellen bei Verzerrungsmessungen mit preiswertem Messequipment nicht lohnt.

Wie bereits weiter oben erwähnt, spielen neben dem eingesetzten Equipment auch die Randbedingungen, unter denen die Messungen durchgeführt werden, eine wichtige Rolle. Auch hierzu nun ein paar gemessene Beispiele. Bild 3.2.6 zeigt Klirrmessungen eines 5“ TMT im Nahfeld und in 10, 25 und 40 cm Messabstand in dB und in %.

Mit zunehmendem Messabstand macht sich der Raum sowohl im Frequenzgang als auch im Klirrverlauf bemerkbar. Bild 3.2.7 zeigt einen direkten Vergleich des Klirrfrequenzganges in %, (THD, D2, D3, D4) im Nahfeld und in 40 cm. Neben zunehmender „Unruhe“ im Verlauf fügt der Raum auch Klirranteile hinzu.

Die gezeigten Beispiele 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.

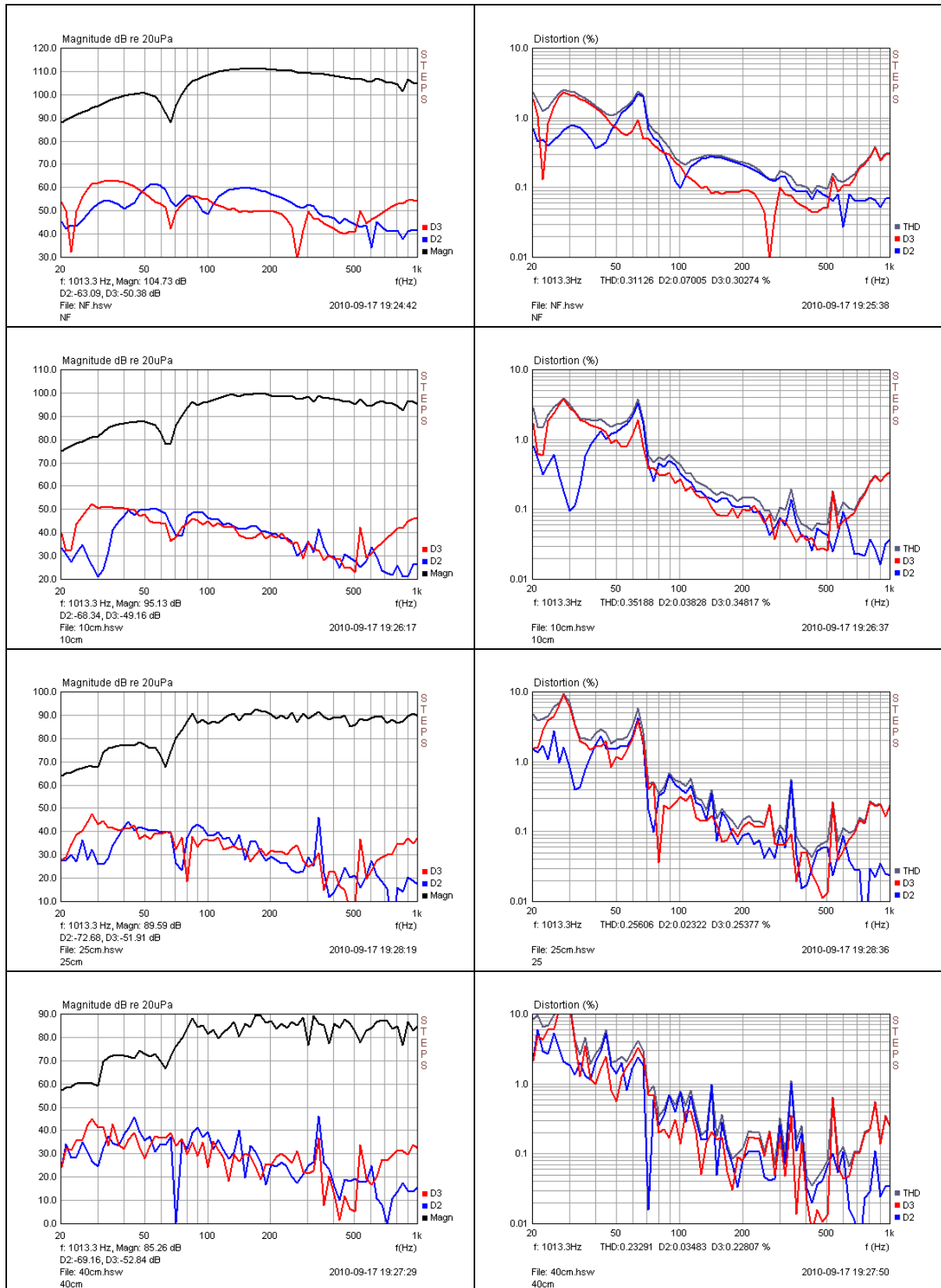


Bild 3.2.6: STEPS Klirrfrequenzgang im Nahfeld und in 10, 25, 40cm Abstand (von oben)

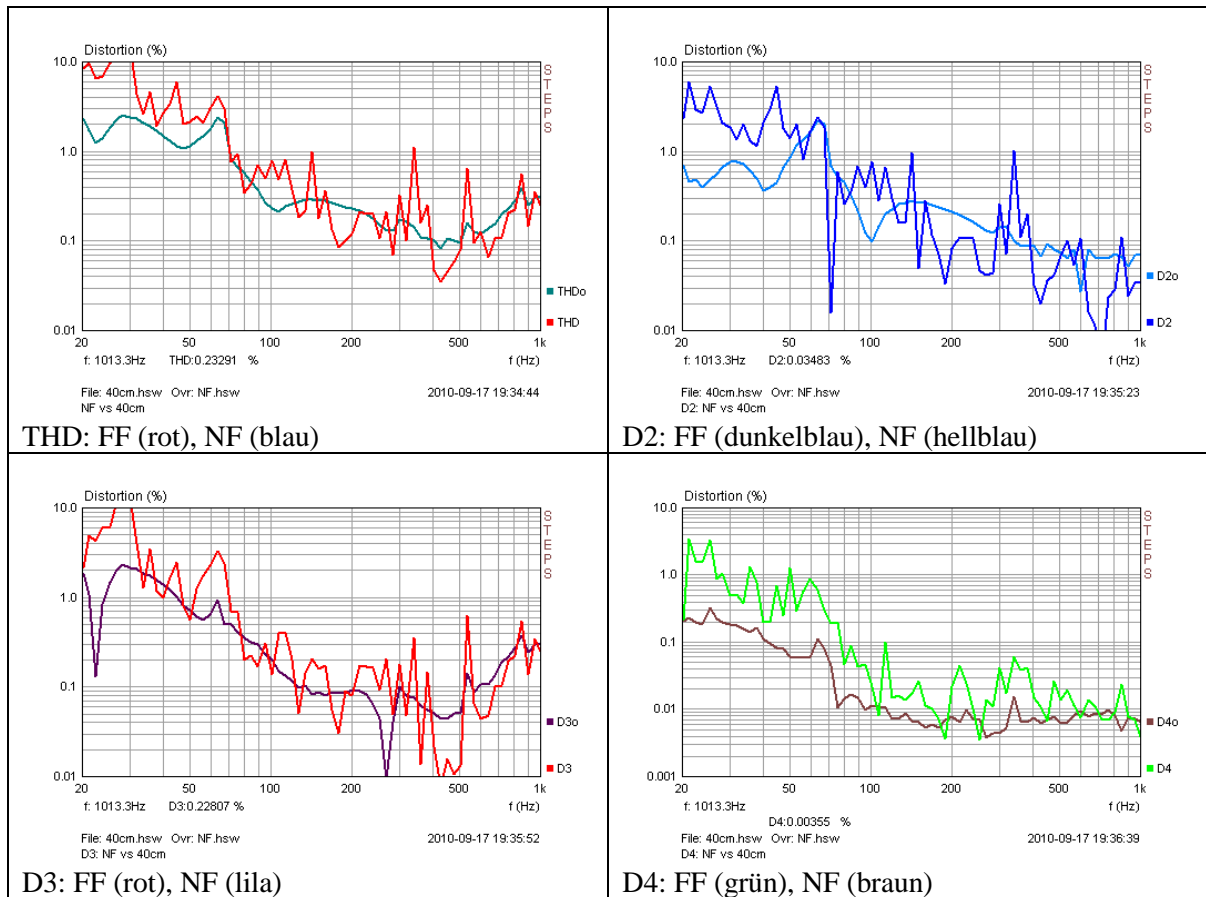


Bild 3.2.7: STEPS Klirrfrequenzgang in Prozent. Direkter Vergleich THD, D2, D3 und D4 im Nahfeld und in 40 cm Messabstand.

3.3 Spannungs- oder leistungsbezogene Messung mit STEPS

STEPS bietet neben den bereits in Kapitel 3.2 beschriebenen Funktionen im Menü Record vier weitere Spezialfunktionen:

- Distortion vs. Amplitude
- Linearity Function
- Loudspeaker Displacement/Distortion
- Loudspeaker distortion limited SPL

Mit der „**Distortion vs Amplitude**“ Funktion können spannungs- oder leistungsbezogene Verzerrungen sowohl an elektrischen (z.B. Verstärker) als auch elektroakustischen Systemen (z.B. Lautsprecher) gemessen werden, wobei die leistungsbezogenen Werte auf den jeweiligen Bezugswiderstand umgerechnet werden ($P = U^2/R$) müssen und handschriftlich der X-Achse zugefügt werden können.

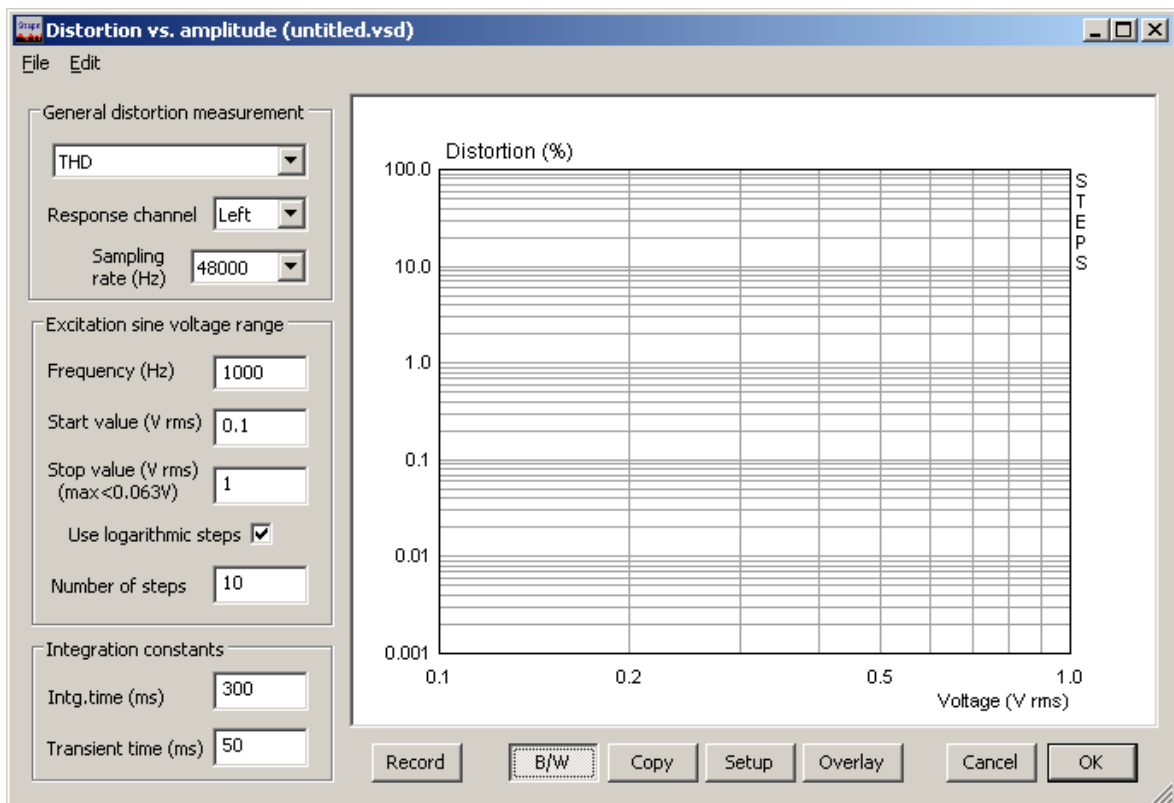
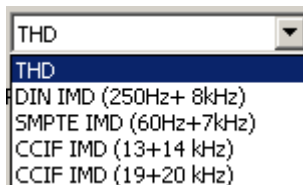


Bild 3.3.1: Distortion vs. Amplitude Menü

Im linken Teil der Maske (Bild 3.3.1) sind die Eingabefelder für die Messparameter, am unteren Bildrand die Einstellparameter für die Grafik und Overlays.



Im Bereich „**General Distortion Measurement**“ können neben Eingangskanal und Abtastfrequenz verschiedene Auswertemodi gewählt werden (THD, DIN IMD, CCIF IMD). Näheres hierzu finden Sie im Originalhandbuch von STEPS

Im Bereich „**Excitation Sine Voltage Range**“ werden die Messparameter eingestellt (Frequenz, Start- und Stoppwert, lineare oder logarithmische Steigerung der Spannung, Zahl der Stufen). Unter dem Stoppwert wird die max. Ausgangsspannung in V angezeigt. Diese berechnet sich aus dem Verstärkungsfaktor des Leistungsverstärkers und einem Sicherheitsabstand zur Vollausssteuerung von 3 dB (siehe hierzu auch ARTA-Kompodium, Kapitel 3.2). Achtung, bitte überlegen Sie vor dem Start der Messung, ob Ihr Testobjekt bei Vollausssteuerung Schaden nehmen könnte!

Bild 3.3.2 zeigt den Klirrverlauf eines kleinen Leistungsverstärkers (t-amp) bei 1 kHz in Abhängigkeit von der Ausgangsspannung (Leistung). Hinweise zur Messung und zum Messaufbau werden im ARTA-Kompendium, Kapitel 5.4 gegeben.

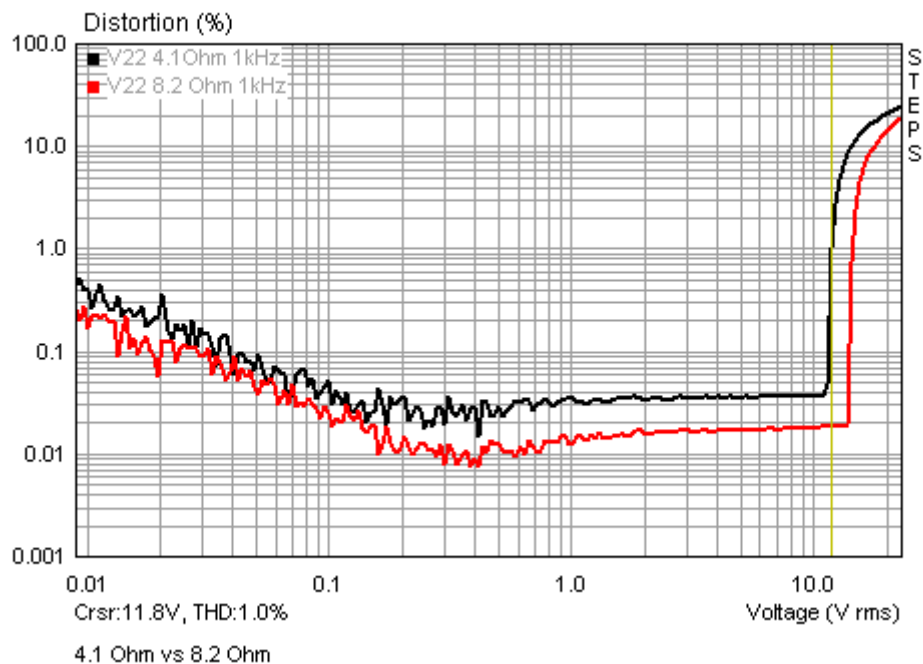


Bild 3.3.2: THD vs. Spannung @ 1kHz für einen kleinen Leistungsverstärker

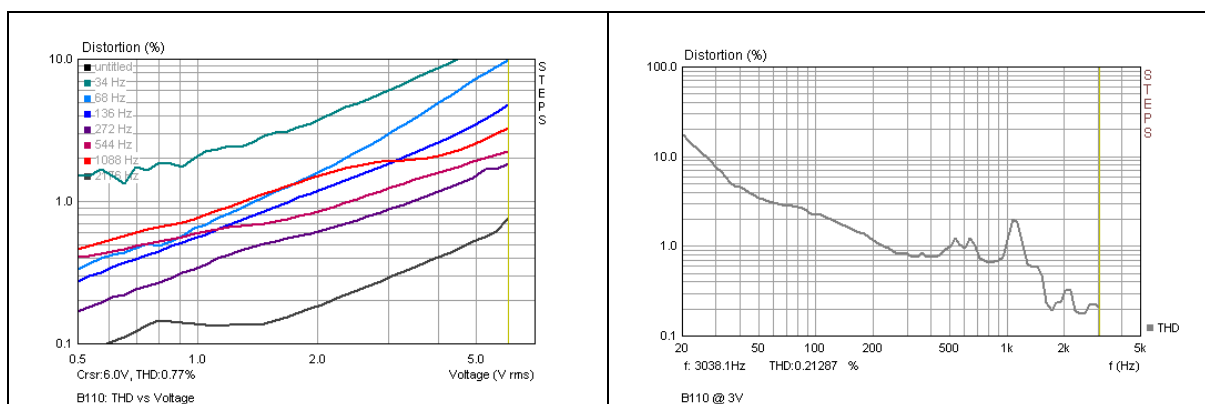


Bild 3.3.3: THD vs. Spannung bei verschiedenen Frequenzen (links). THD bei 3 Volt (rechts)

Bild 3.3.3 zeigt den Klirrverlauf (THD) bei verschiedenen Frequenzen in Abhängigkeit von der Spannung (linkes Teilbild) für einen 5“ Tiefmitteltöner. Das rechte Teilbild zeigt den Klirrverlauf in Abhängigkeit von der Frequenz bei ca. 3 Volt Amplitude. Die bei 3 Volt im linken Teilbild bei den ausgewiesenen Messfrequenzen abgelesenen Werte sollten im rechten Teilbild wiederzufinden sein.

Bei der zweiten Spezialfunktion, der „**Linearity Function**“, kann der Zusammenhang zwischen zwei Größen gemessen werden (Bild 3.3.4). Im Menübereich „Measurement Channels“ werden die Möglichkeiten aufgezeigt. Es kann sowohl der linke als auch der rechte Kanal als Anregung oder als Aufnahme definiert werden.

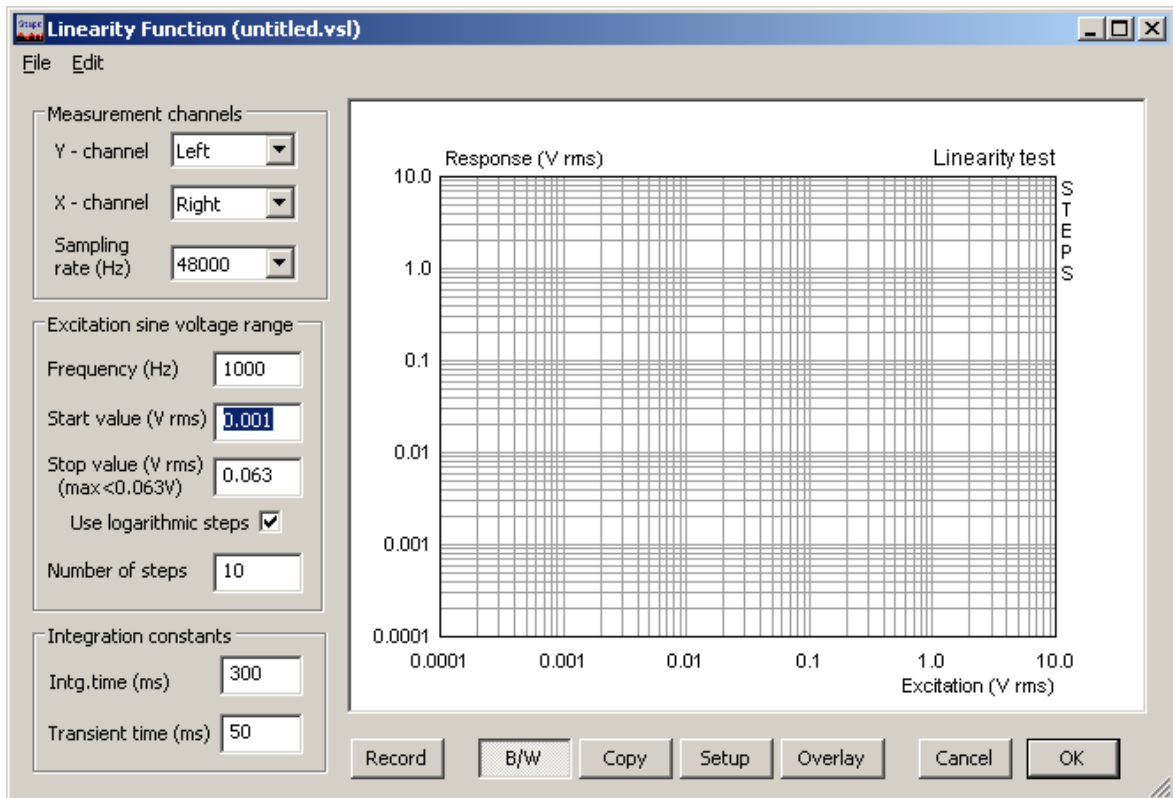


Bild 3.3.4: Linearity Function Menü (X vs.Y)

Bild 3.3.5 zeigt einen einfachen Linearitätstest mit einer preiswerten Onboard Soundkarte bei 1 kHz. Der linke Eingangskanal ist als Messkanal, der rechte als Anregungskanal definiert. Offensichtlich wird die Eingangsspannung um den Faktor 2 verstärkt.

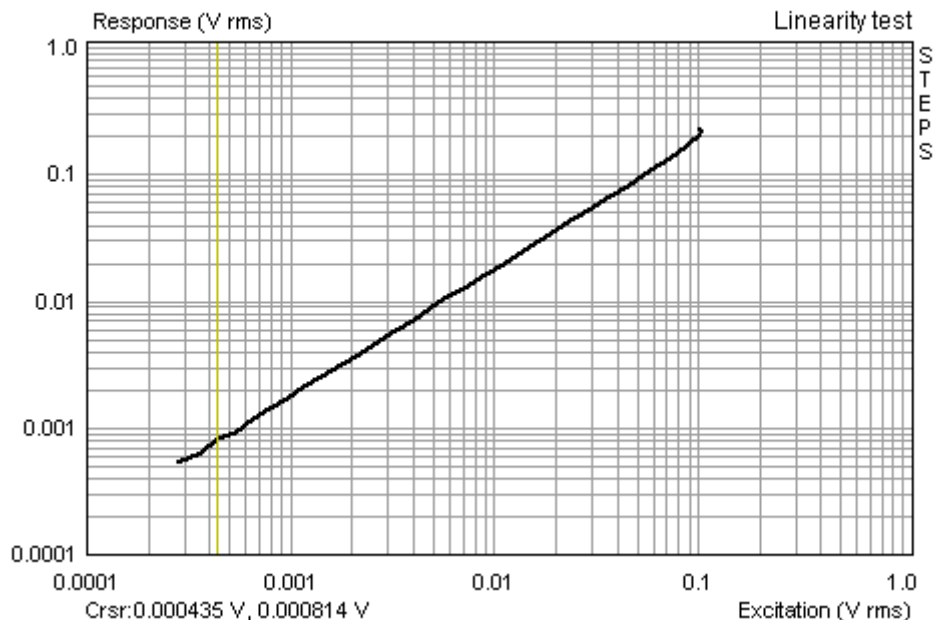


Bild 3.3.5: Linearitätstest einer Onboard-Soundkarte bei 1 kHz

3.4 Messung der maximalen linearen Membranauslenkung mit STEPS

Die maximale lineare Auslenkung eines Lautsprechers gibt Auskunft über den maximalen unverzerrten Pegel im auslenkungslimitierten Frequenzbereich. Die AES 2 [6] 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 Eingangstromes 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 [8] erweitert und ist mittlerweile in den Standard „IEC 62458: Sound System Equipment – Electroacoustical transducers – Measurement of large signal parameters“ eingeflossen. Dieser Standard ist seit dem Release 1.4 in STEPS realisiert.

Der Messaufbau für die Ermittlung der maximalen linearen Auslenkung ist Bild 3.4.1 zu entnehmen.

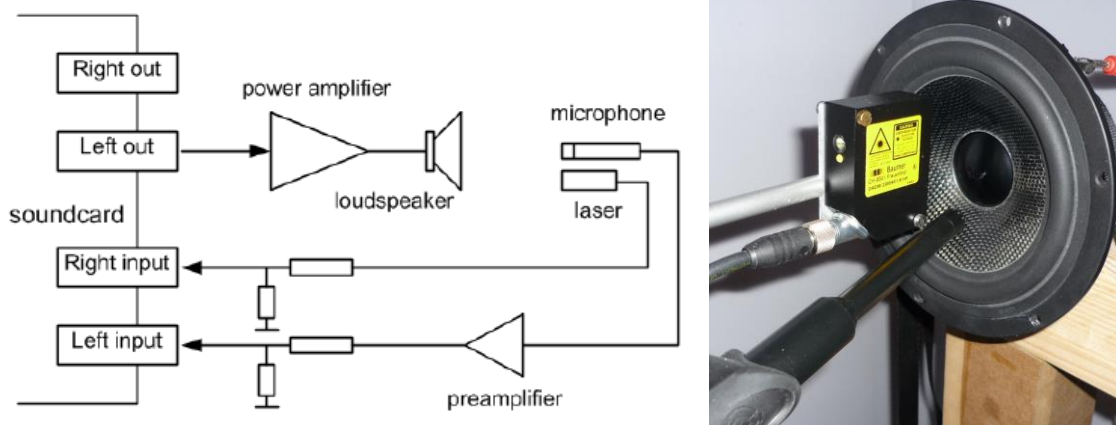


Bild 3.4.1: Messaufbau „Klippel Light“

Bild 3.4.2 zeigt das Menü „Loudspeaker Displacement/Distortion“. Die volle Funktionalität einschließlich der Kalibrierung des Messaufbaus wird ausführlich in Application Note Nr. 7 beschrieben [VII]. An dieser Stelle soll nur ein kurzer Überblick und ein „Sicherheitsfeature“, welches nicht im „Distortion vs. Amplitude“ Menü enthalten ist, vorgestellt werden.

Unter Bezugnahme auf die einleitend gegebenen Sicherheitshinweise ist die Abbruchfunktion „**THD Break Value**“ besonders interessant. Hier wird also nicht grundsätzlich die Spannung bis zum bitteren Ende hochgefahren, sondern bei Erreichen des „THD Break Value“ abgebrochen. Bild 3.4.3 zeigt für einen Hochtöner den Klirrverlauf als Funktion der Spannung für zwei unterschiedliche Frequenzweichen (18dB, 6dB Flankensteilheit) bei 2,6 kHz. Selbst bei der 6dB-Weiche hat sich der Hochtöner tapferer gehalten als erwartet, daher wurde das Abbruchkriterium (Break Value) von 1% nicht erreicht.

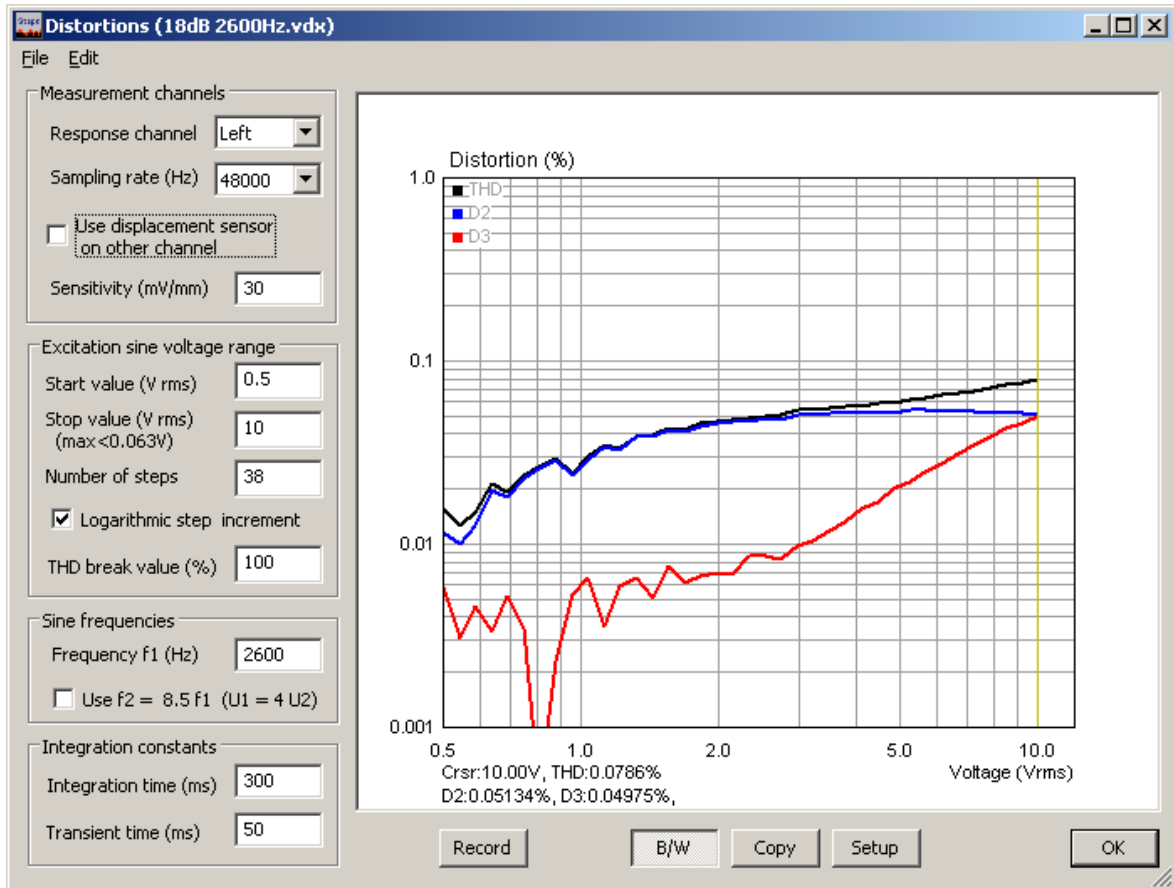


Bild 3.4.2: Distortions Menü (Auslenkung vs. Klirr)

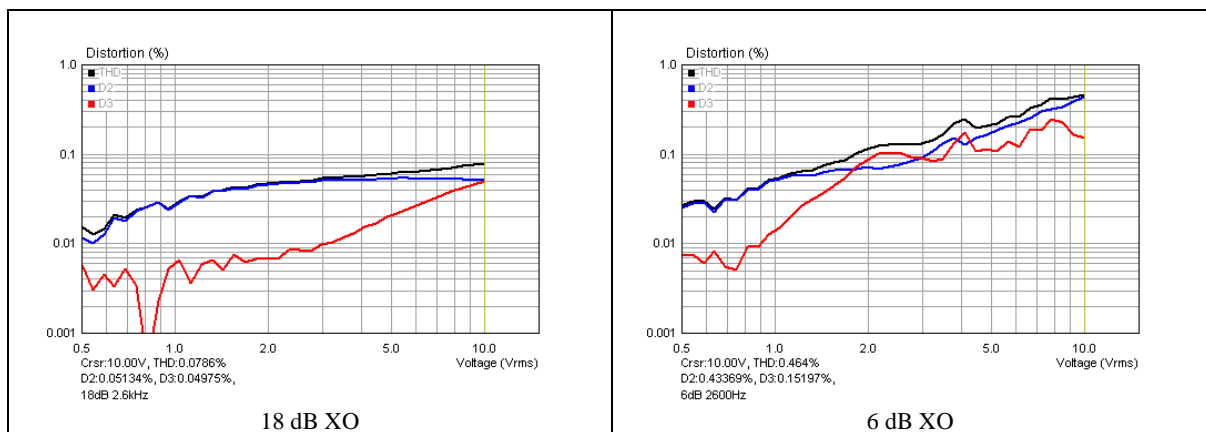


Bild 3.4.3: Klirrverlauf als Funktion der Spannung für einen Hochtöner mit zwei unterschiedlichen Frequenzweichen ($f = 2f_s$)

3.5 Messung des THD-begrenzten Maximalpegels mit STEPS

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Lautsprechern sind neben dem Frequenz- und Impedanzgang, der Richtcharakteristik und anderem mehr auch der erreichbare Maximalpegel von Nutzen. Letzteres gilt insbesondere für den Beschallungssektor. Die Berechnung des Maximalpegels aus der Empfindlichkeit und der Belastbarkeit von Lautsprechern weist in der Regel zu optimistische Werte aus (siehe hierzu auch Bild 3.5.4). Viele Effekte, wie z.B. Kompression, Partialschwingungen und limitierte Auslenkbarkeit der Membranen werden dabei nicht berücksichtigt. Speziell bei hohen und tiefen Frequenzen werden daher die theoretischen Werte bei weitem nicht erzielt [13].

Die hier beschriebene THD-begrenzte Maximalpegelmessung mit STEPS hat eine deutlich höhere Aussagekraft. Bei der Messung wird in vorgegebenen Frequenzabständen mit einem reinen Sinus-signal der Schalldruck für einen vorgegebenen Klirrfaktor ermittelt.

Er wird also seeehr laut!



Bitte beachten Sie vor Anwendung dieses Programmteiles zunächst die folgenden drei Punkte:

- Schützen Sie Ihre Ohren vor irreparablen Schäden und tragen bei den Messungen immer einen Gehörschutz.
- Schützen Sie Ihre Lautsprecher! Lesen Sie vor der Nutzung dieses Programmteils erst dieses Kapitel komplett durch.
- Die Messung des THD-begrenzten Maximalpegels an Lautsprecherchassis und Lautsprecherboxen erfordern geeignetes Equipment und eine geeignete Messumgebung. Im Idealfall sind dies ein professionelles Messmikrofon mit einem hohen Grenzschalldruckpegel, ein reflexionsarmer Messraum (RAR) und ein potenter Leistungsverstärker. Insbesondere das Messmikrofon und der Messraum können die Ergebnisse deutlich verfälschen (siehe auch Abschnitt 3.2.1).

Trotz der oben genannten Einschränkungen sind vergleichende Messungen natürlich auch mit semiprofessioneller Ausstattung und in normalen Räumen möglich.

Bild 3.5.1 zeigt das Arbeitsfenster „Distortion Limited Levels“ mit den zugehörigen Bedienelementen. Das Hauptmenü in der Kopfleiste hat folgende Funktionalität:

File:

- Open** – Öffnet das Binärfile mit den Messdaten (.msp).
- Save As** – Speichert die Messdaten als Binärfile (.msp).
- Export...** - Exportiert Messdaten im ASCII- oder Excel-CSV-Format.

Edit:

- B/W** - Wechsel zwischen Schwarz-Weiß und Farbe.
- Copy** - Kopiert die aktuelle Grafik ins Clipboard.
- Scale maximum level** - Skalierungsmöglichkeit der Messkurve auf z.B. 1 Meter (addiert/subtrahiert den Eingabewert von der Messkurve)

Die Bedienelemente in der Fußleiste haben folgende Funktionalität:

- Record** – Start der Messung. Erneutes Drücken von Record stoppt die Messung.
- Copy** - Kopiert die aktuelle Grafik ins Clipboard im .bmp Format.
- B/W** – Wechsel zwischen Schwarz-Weiß und Farbe.
- Setup** – Öffnet das Menü „Graph setup“.
- Overlay** – Öffnet das Overlay-Menü.
- Cancel** – Schließt das Fenster ohne das Setup zu speichern.
- OK** – Schließt das Fenster und speichert das aktuelle Setup.

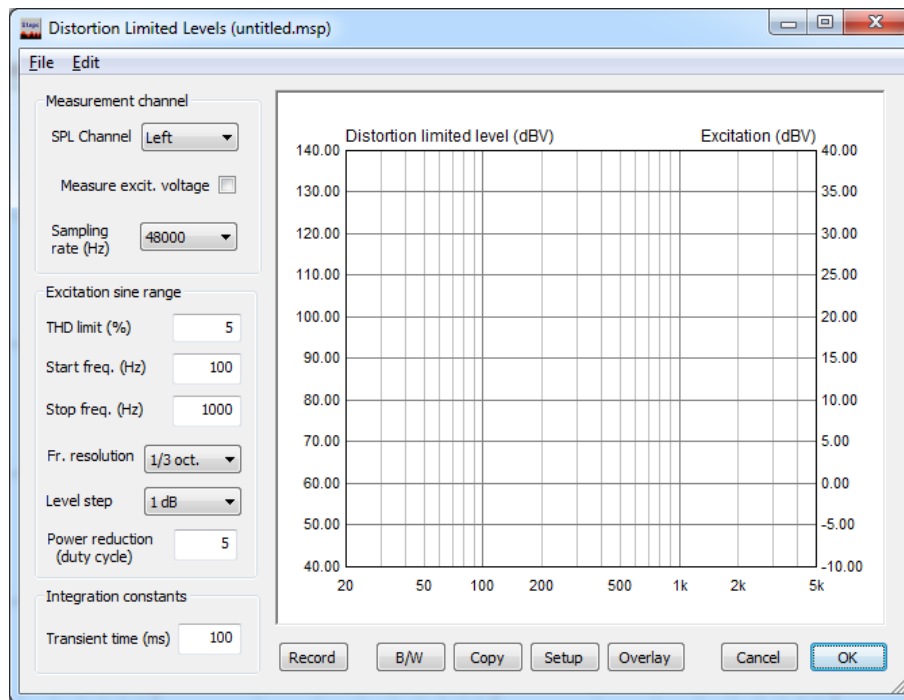


Bild 3.5.1: Arbeitsfenster „Distortion limited Levels“

Die Bedienelemente im linken Teil des Fensters haben folgende Funktionalität:

Measurement channels:

SPL channel – Wahl des Eingangskanals für das Mikrofon (Default = Line In Links).

Measure excit. voltage – Messung der Ausgangsspannung des Leistungsverstärkers bei Aktivierung der Checkbox

Sampling rate (Hz) – Wahl der Sampling Frequenz

Excitation sine range:

THD limit (%) – Eingabe des Grenzwertes für THD (Abbruchkriterium)

Start freq. (Hz) – Eingabe der Startfrequenz

Stop freq. (Hz) – Eingabe der Stoppfrequenz (s. Anmerkung)

Freq. resolution – Frequenzauflösung (1/1, 1/6, 1/9, 1/12 Oktave).

Level step (dB) – Wahl der Pegelauflösung (0,5, 1,0, 1,5, 2,0 dB).

Power reduction factor - Eingabewert zwischen 2 und 1000. Beschreibt das Verhältnis von Signaldauer + Pausendauer zu Signaldauer für eine Belastungsamplitude. Dieses Verhältnis ist proportional dem Verhältnis von Peakleistung zur gesamten Ausgangsleistung während der Signalgenerierung.

Integration constants:

Transient time (ms) – Eingabe der Zeit zum Erreichen des eingeschwungenen Zustandes (s. auch Seite 8).

Anmerkung: STEPS benötigt in diesem Programmteil für die Berechnung von THD mindestens die 2. und 3. Harmonische. Daher wird die obere Frequenzgrenze auch durch die Sampling Rate der Soundkarte bestimmt (96 kHz Sampling Rate → obere Frequenzgrenze 12 kHz).

Der Menüpunkt “Setup” in der Fußzeile des Fensters öffnet das Menü „Graph Margins“ (s. Bild 3.5.2). Hier werden die Achsen der Grafik definiert.

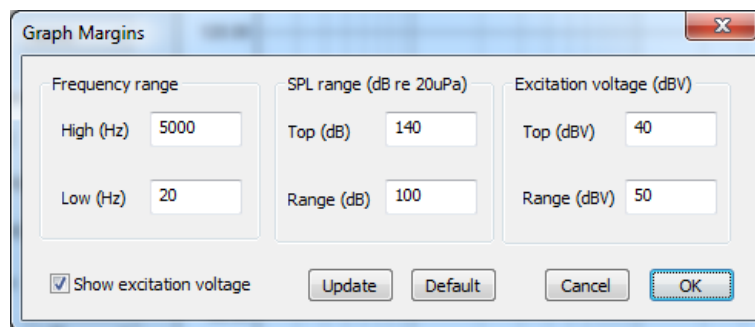
Frequency range

High (Hz) – Definition der oberen Frequenzgrenze.

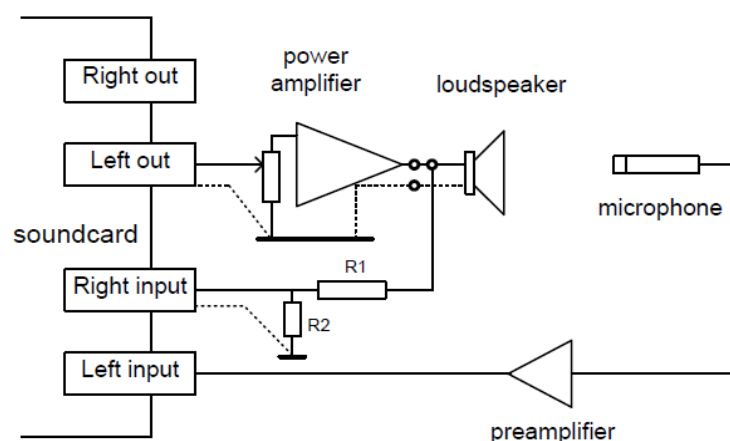
Low (Hz) - Definition der unteren Frequenzgrenze.

SPL range (dB re 20uPa) section**Top (dB)** – Definition der oberen Pegelgrenze in dB**Range (dB)** – Definition des Pegelbereiches in dB**Excitation Voltage (dBV) section****Top (dBV)** – Definition der oberen Spannungsgrenze in dB**Range (dBV)** – Definition des Spannungsbereiches in dB**Show excitation voltage** - Die gemessene Anregungsspannung wird bei Aktivierung geplottet

Anmerkung: Sofern im Menü „Audio Devices Setup“ (siehe auch Bild 3.5.6) die Checkbox „Microphone used on“ deaktiviert ist, wird „Distortion Limited Level“ in dBV angezeigt, ansonsten „Distortion Limited SPL“ in dB.

**Bild 3.5.2:** Menü „Graph Margins“

Der Messaufbau für die THD-begrenzte Maximalpegelmessung ist Bild 3.5.3 zu entnehmen. Für die Maximalpegelmessung ist die Ermittlung der Anregungsspannung am Ausgang des Leistungsverstärkers nicht unbedingt erforderlich (Right Input), sie bietet jedoch eine gute Kontrolle über den Anregungspegel während der Messung. Aus diesem Grunde wird im Folgenden auch der vollständige Messaufbau beschrieben.

**Bild 3.5.3:** Messaufbau für THD-limitierte Maximalpegelmessung

Um einer Lautsprecherbox 10% Klirrfaktor abzurufen, ist je nach Frequenzbereich einiges an elektrischer Leistung erforderlich. Zur Veranschaulichung zeigt Bild 3.5.4 eine Simulation mit BoxSim für die maximale Belastbarkeit bzw. die maximale Eingangsspannung eines kleinen PA-Monitors. Die maximale Belastbarkeit wird dabei entweder durch die maximale Auslenkung oder die elektrische Belastbarkeit definiert.

Wie bereits einleitend ausgeführt, ist diese Simulation etwas optimistisch, zeigt aber, dass es für die THD-begrenzte Maximalpegelmessung – selbst unter Berücksichtigung, dass die 5% oder 10% Klirrgrenze hoffentlich vor dem Versagen des Lautsprechers erreicht wird – für diesen

Lautsprecher im Arbeitsbereich > 200 Hz schon 100 – 200 Watt sein sollten. Tieffrequent wären in diesem Fall bereits 10 bis 50 Watt hinreichend.

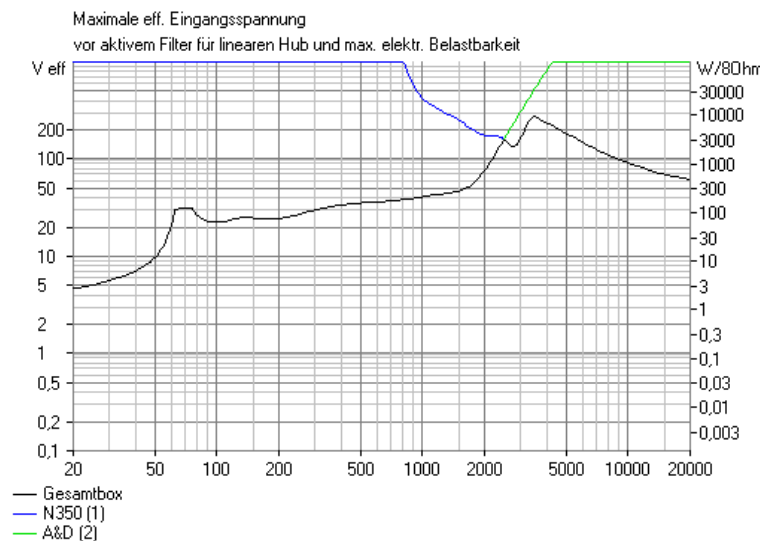


Bild 3.5.4: Theoretische Maximalbelastbarkeit eines kleinen PA-Monitorlautsprechers (BoxSim)

Bei Verwendung eines so potenten Leistungsverstärkers muss beachtet werden, dass die am Ausgang des Leistungsverstärkers abgegriffene Spannung (Bild 3.5.3) den rechten Eingangskanal der Soundkarte hoffnungslos übersteuern und wahrscheinlich auch beschädigen wird. Aus diesem Grunde ist es unbedingt erforderlich, den Soundkarten-Eingang durch einen Spannungsteiler abzusichern. Der Spannungsteiler ist in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung des Verstärkers zu dimensionieren.

Obwohl wir nun wissen, dass für die THD-begrenzte Maximalpegelmessung potente Leistungsverstärker erforderlich sind, wählen wir aus didaktischen Gründen für das folgende Rechenbeispiel den Leistungsverstärker aus dem Kompendium (t-amp, Abschnitt 3.4) und die Daten der Soundkarte aus Bild 3.5.5.

Hi-Z Instrumenteneingang

- Type: unsymmetrisch 6.3mm Klinke
- Max. Eingangspegel: +4.5dBV max
- THD+N: 0.003% A-gewichtet
- Impedanz: 500 kOhm

Bild 3.5.5: Soundkarte Line IN, Spezifikation ESI UGM96

Max. Eingangsspannung Soundkarte $U_{IN\ MAX} = +4,5\ dBV = 1,0 * 10^{(4,5/20)} = 1,679\ V\ RMS$
 Eingangsimpedanz der Soundkarte $Z_{IN} = 500\ kOhm$
 Leistung des Verstärkers $P = 25\ Watt$ (s. Anmerkung und Bild 3.3.2)

Anmerkung: Es ist nicht immer ratsam, sich auf die Leistungsangaben des Herstellers zu verlassen. So ist der t-amp vom Hersteller mit 36 Watt an 8 Ohm angegeben, laut Bild 3.3.2 sind es aber nur ca. 24 Watt. Es ist also nicht zu empfehlen, das Lautstärkepoti auf Rechtsanschlag zu drehen. Grundsätzlich sind die Eingangsempfindlichkeit des Leistungsverstärkers und die max. Ausgangsspannung der Soundkarte anzupassen. Also das Lautstärkepoti soweit zurücknehmen, bis das mit 0 dBFS von der Soundkarte eingespeiste Signal am Ausgang des Verstärkers gerade nicht mehr clippt. Diese Spannung sollte die maximale Anregungsspannung für die Messung und Basis für die Berechnung des Spannungsteilers sein.

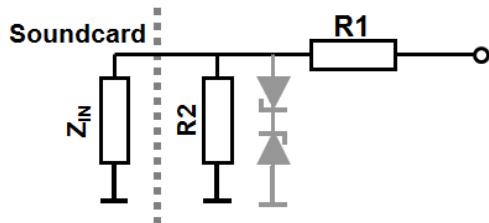
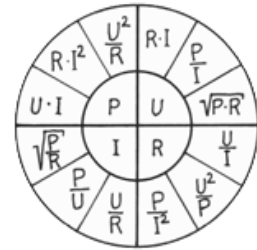
Unter Anwendung des ohmschen Gesetzes berechnet sich die maximale Ausgangsspannung an einer Lastimpedanz von $Z = 8 \text{ Ohm}$ wie folgt:

$$U = \text{SQRT}(P * Z)$$

$$U = \text{SQRT}(25 * 8) = 14,14 \text{ V}$$

$$G_{\text{IN}} = U_{\text{IN MAX}} / U_{\text{OUT AMP MAX}} = 1,679 / 14,14 = 0,1187 = -18,51 \text{ dB}$$

Es ist also ein Spannungsteiler mit ca. 19 dB Abschwächung erforderlich.



$$G = R2 / (R1 + R2) \quad [1]$$

$$R1 = (R2 / G) - R2 \quad [2]$$

Bei einem gewählten Wert für $R2 = 100 \text{ Ohm}$ berechnet sich $R1$ mit [2] wie folgt:

$$R1 = (R2/G) - R2 = (100 / 0,1187) - 100 = 742,45 \text{ Ohm} \rightarrow 820 \text{ Ohm}$$

$$G_{\text{IN}} = 100 / (820 + 100) = 0,1087 = -19,28 \text{ dB}$$

Anmerkung: Die oben eingezeichneten Zener-Dioden (grau) sind nicht unbedingt erforderlich, bieten jedoch einen zusätzlichen Schutz für den Line IN Eingang der Soundkarte. Entscheiden Sie also in Abhängigkeit von Ihrer eigenen Risikobereitschaft über den Einsatz der Zener-Dioden (s. hierzu auch [1]).

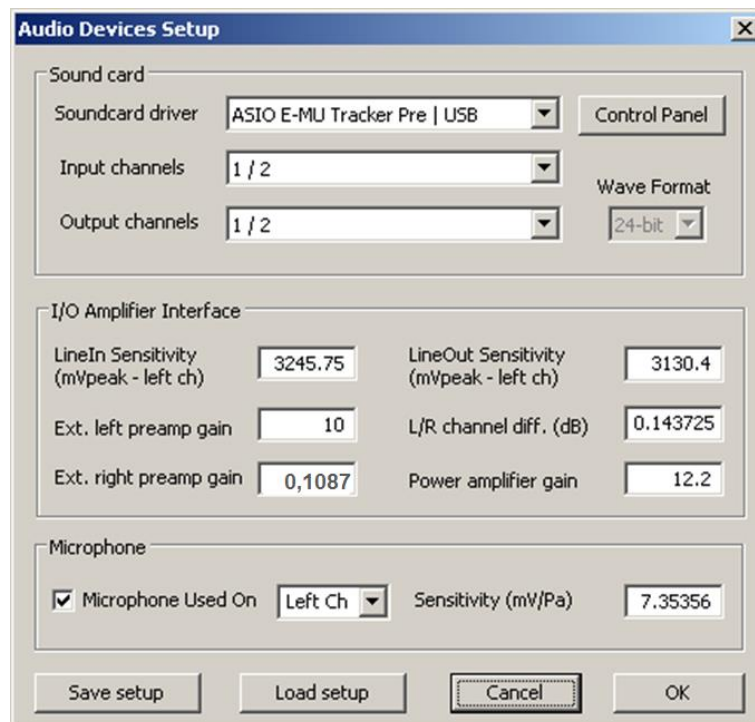


Bild 3.5.6: Menü „Audio Devices Setup“

Der Wert für die berechnete Abschwächung des Spannungsteilers ist als Absolutwert im Menü „Audio Devices Setup“ in das Feld „Ext. Right preamp gain“ einzutragen.

Nachdem der Spannungsteiler berechnet und eingegeben ist, kann der Messaufbau entsprechend

Bild 3.5.3 erstellt werden und mit der „Kalibrierung“ begonnen werden. Dazu wird der Sinusgenerator im Menü „Measurement Setup (siehe Bild 3.5.7) z.B. auf Generator Level = -3 dBreFS und eine Testfrequenz eingestellt, die Sie mit Ihrem Multimeter noch mit überschaubarem Fehler messen können.

Mit diesem Signal wird nun der verwendete Leistungsverstärker gespeist und auf die Ausgangsspannung $U_{\text{Kalibrier}} = U_{\text{AMP}} / G$ justiert. Dabei ist $G = 10^{(\text{Generator Level}/20)} = 10^{(3/20)} = 1,413$ und für unser Beispiel $U_{\text{Kalibrier}} = 14,14/1,413 = 10,00$ V. Damit ist die „Kalibrierung“ abgeschlossen.

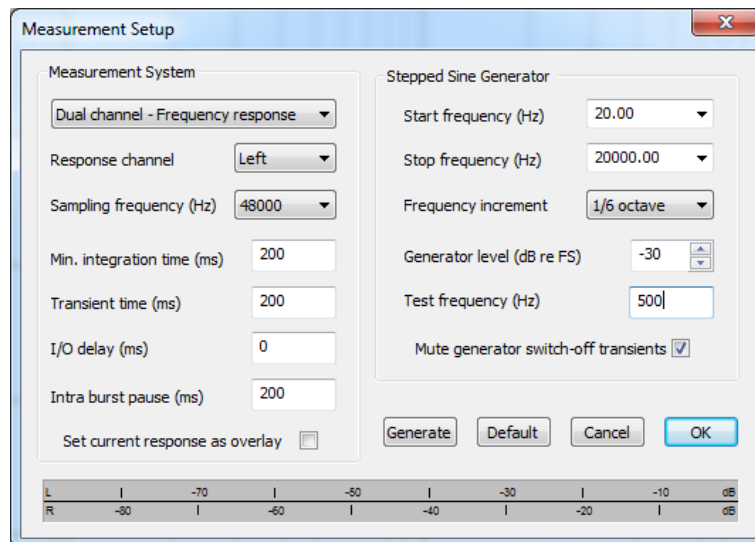


Bild 3.5.7: Menü „Measurement Setup“

Bevor es nun mit der ersten Messung losgeht, verinnerlichen wir noch einige Hinweise [13]:

- Für ein belastbares Messergebnis sollte der Abstand reflektierender Flächen zum Messaufbau erheblich größer sein als der Abstand zwischen Lautsprecher und Mikrofon (siehe auch Kompendium Kap. 6.2).
- Machen Sie sich bereits vor der Maximalpegelmessung Gedanken über die Belastbarkeit des Lautsprechers. Wird die mechanische oder die thermische Überlastung das Versagenskriterium sein? Eine Simulation mit z.B. AJ-Horn oder BoxSim gibt darüber erste Auskunft. Prinzipiell sind Tieftonlautsprecher eher mechanisch gefährdet, während durch Frequenzweichen geschützte Mittel- und Hochtöner eher thermisch versagen (siehe auch Bild 3.5.11).
- Bei Lautsprechern ohne Schutzschaltungen können auch die Frequenzweichenbauteile durch thermische Überlastung gefährdet sein.
- Messen Sie vorher einen „normalen“ Klirrfrequenzgang mit STEPS oder mit ARTA mit der „Farina Methode“ bei ca. 10% der Nennleistung des Lautsprechers. Das gibt eine erste Indikation über die Schwachpunkte des Lautsprechers.
- Passen Sie die untere Frequenzgrenze dem Messobjekt an. Starten Sie die Maximalpegelmessung nicht wesentlich unterhalb der Resonanzfrequenz des Lautsprechers. Dies gilt besonders für Mittel- und Hochtöner. Bassreflexboxen sollten nicht weiter als eine halbe Oktave unterhalb der Abstimmfrequenz belastet werden.
- Als THD-Limit haben sich bei HiFi-Lautsprechern 1% und 3%, bei PA-Lautsprechern 5% und 10% bewährt [13].
- Starten Sie Ihre Messungen vorsichtshalber mit einem hohen Power Reduction Factor (z.B. 50-100). Das gibt der Schwingspule etwas Zeit Temperatur abzubauen.
- Wählen Sie bei der ersten Messung nicht gleich die volle Frequenzauflösung, den kleinsten

Level Step und ein hohes THD-Limit. Das kostet Zeit und belastet den Lautsprecher stark.

- Sofern die maximale Leistung des Lautsprechers vom Hersteller mit P deklariert ist und der Leistungsverstärker eine Leistung von P_{MAX} abgeben kann, so sollte „Power Reduction“ auf P_{max}/P eingestellt werden.
- Bei Hochtönern gehen Sie vorsichtshalber davon aus, dass sie nur 1-2 Watt kontinuierlich zugeführte Sinusleistung vertragen. Für unseren oben erwähnten Leistungsverstärker mit 25 Watt würde der „Power Reduction Factor“ also $25/2 = 13$ betragen.

Bild 3.5.8 zeigt eine 3%-THD-begrenzte Maximalpegelmessung für einen 3,5“ Breitbandlautsprecher in einem Bassreflexgehäuse. Die Messung wurde bei einer Messdistanz von 20 cm durchgeführt und ist pegelkorrigiert (Menü Edit → Scale). Die rote Kurve zeigt den gemessenen Maximalpegel in dB und die graue Kurve die Anregungsspannung in dBV.

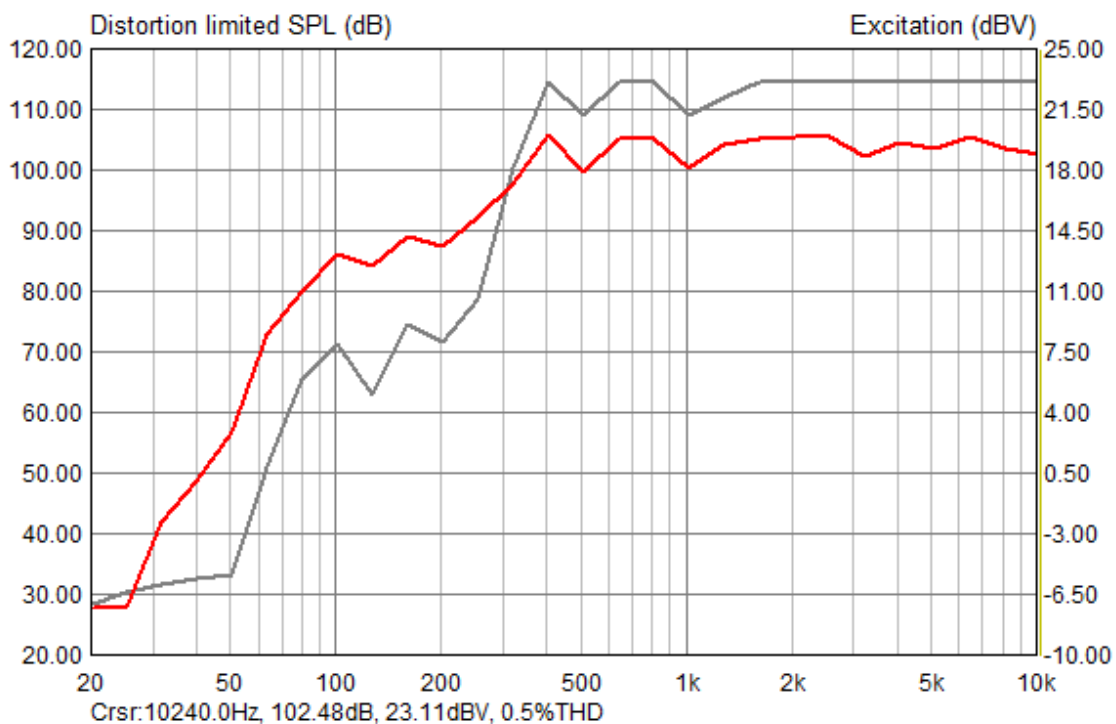


Bild 3.5.8: Messung eines 3,5“ Breitbandlautsprechers bis THD = 3%

Wir wissen, dass der verwendete Verstärker nur begrenzt Leistung zur Verfügung stellen kann (ca. 23 dBV oder 14,10 Volt). Das reicht für diesen Lautsprecher ab ca. 1,5 kHz offensichtlich nicht mehr aus, um das gewählte THD-Limit von 3% zu erreichen.

Bild 3.5.9 zeigt die Messung desselben Lautsprechers bei 0,5%, 1,0% und 3,0% THD. Die einzelnen Messkurven wurden über die Overlay-Funktion erzeugt. Hier wird auch ohne die Zusatzinformation „Excitation (dBV)“ deutlich, dass zumindest im Bereich um 2 kHz der Verstärker nicht mehr genügend Leistung liefern kann, da die rote und die blaue Messkurve deckungsgleich sind.

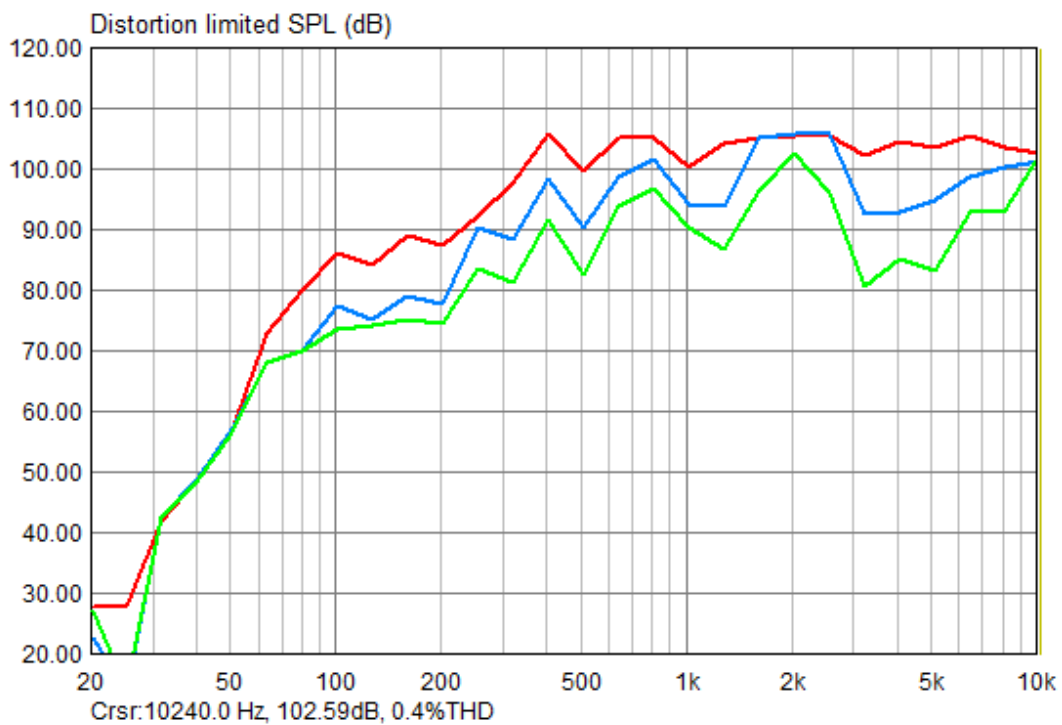


Bild 3.5.9: Messung eines 3,5“ Breitbandlautsprechers (0,5%, 1,0%, 3,0% THD)

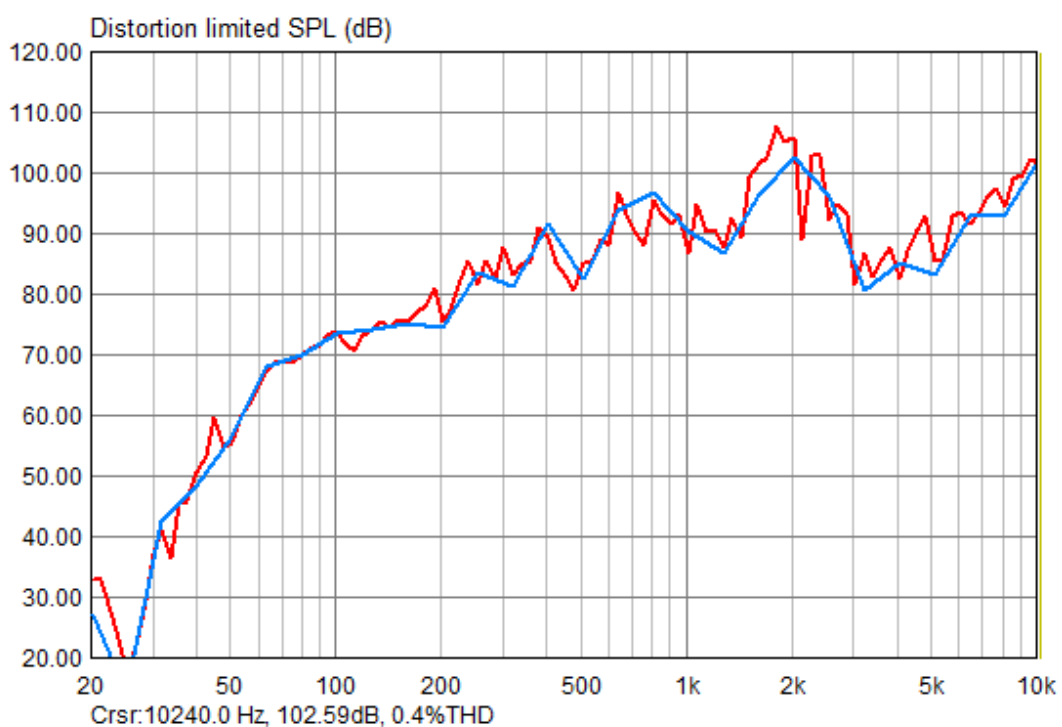


Bild 3.5.10: Variation von Frequenzauflösung und Level Step

Bild 3.5.10 zeigt eine Messung mit 0,5% THD Begrenzung mit unterschiedlicher Frequenzauflösung und unterschiedlichem Level Step. Die blaue Kurve wurde mit 1/3 Oktav Auflösung und 1 dB Level Step ermittelt, die rote Kurve mit 1/12 Oktav und 0,5 dB Level Step. Die bessere Auflösung und Annäherung an das vorgegebene THD-Limit erkauft man sich mit einer deutlich höheren Messzeit sowie einer höheren Belastung des Messobjektes.

Viel Spaß bei der THD-begrenzten Maximalpegelmessung und mögen Ihre Messungen nicht so enden wie im Bild 3.5.11.



Bild 3.5.11: Testopfer

7. ARTA Application Notes

- [I] No 1: ARTA MessBox
- [II] No 2: RLC Messung mit STEPS
- [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: Wiederholmessungen mit der Scriptsprache Auto IT
- [IX] No 9: In-Situ Messung zur Abschätzung von Absorptionskoeffizienten mit ARTA (demnächst)

8. Literatur

- [1] Mateljan, Ivo: "ARTA-Manuals"
- [2] Weber, Heinrich: ARTA Kompendium, Version 2.3
- [3] Weber, Heinrich: ARTA Hardware & Tools Manual
- [4] D'Appolito, Joseph: "Lautsprechermesstechnik", Elektor Verlag, 1999.
- [5] Vance Dickason: Lautsprecherbau, Bewährte Rezepte für den perfekten Bau, Elektor Verlag, 6. Auflage, 2001
- [6] AES2-2012: AES standard for acoustics – Methods of measuring and specifying the performance of loudspeakers for professional applications – Dive units, AES, 2012
- [7] IEC 60268-5:2003: Elektroakustische Geräte, Teil 5: Lautsprecher
- [8] AN 4 - Measurement of Peak Displacement X_{max} - Application Note to the KLIPPEL ANALYZER SYSTEM (www.klippel.de)
- [9] Farina A.: Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique, 108 AES Convention, Paris, 2000.
- [10] Müller S.; Massarani P.: Transfer Function Measurement with Sweeps, JAES, June 2001.
- [11] Floyd E. Toole: Sound Reproduction - Loudspeakers and Rooms, Elsevier 2008
- [12] Marcel Müller: Technische Eigenschaften von Soundkarten im PC, 2005, <http://www.maazl.de/hardware/sound/index.html>
- [13] Audio & Acoustics Consulting Aachen: Monkey Forrest Handbuch V3.1

9. Index

A

Abbruchfunktion 18

H

Hallradius 11

I

Installation

 Programm..... 4

K

Kalibrierung 24

M

Maximalpegel..... 20

Membran

 lineare Auslenkung 18

 Xmax..... 18

Messen

 Mikrofonvergleich Klirr 12

Messmikrofon

Grenzschalldruckpegel 20

Mikrofontest 11

P

Power Reduction Factor 25

S

Spannungsteiler 23

STEPS

 einkanalig vs zweikanalig 10

 Grundeinstellung..... 7

U

unbelasteter Spannungsteiler..... 24

V

Verbindungskabel

 Steckerbelegung..... 6

Z

Zener-Dioden 24