



Einleitung

Die AES 2 [01] führt zur Ermittlung der linearen Auslenkung folgendes aus:

*Peak-Auslenkung der Schwingspule, 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. Die erweiterte Definition von X_{max} ist danach wie folgt:

"Peak Auslenkung der Schwingspule X_{max} , bei der entweder die gesamten harmonischen Verzerrungen THD oder die Modulationsverzerrungen n-ter Ordnung (mit $n=2$ oder 3) im Schalldruck 10% überschreiten, der von einem Lautsprecher unter Free Air Bedingungen abgestrahlt wird, angeregt durch die lineare Superposition eines ersten Tones bei der Resonanzfrequenz $f_1 = f_s$ und einem zweiten Ton $f_2 = 8.5 f_s$ mit einem Amplitudenverhältnis von 4:1. Die gesamten harmonischen Verzerrungen THD bewerten die Harmonischen von f_1 und die Modulationsverzerrungen werden durch die Modulationskomponenten $f_2 \pm (n-1) f_1$ gem. IEC 60268 gemessen.

Die Messprozedur

In der Application Note AN4 [03] für das Klippel-Analyzer-System wird eine Prozedur analog den Festlegungen der IEC PAS 62458 für die Ermittlung von X_{MAX} beschrieben, die aus den folgenden Schritten besteht:

1. Messe die Resonanzfrequenz f_s des Lautsprechers (free air).
2. Belaste den Lautsprecher unter Freifeldbedingungen mit einem Zweiton-Signal mit **$f_1 = f_s$** und **$f_2 = 8.5 f_s$** Hz sowie einem Amplitudenverhältnis von $U_1 = 4 * U_2$ und führe eine Messreihe unter Variation der Amplitude von U_{START} bis U_{ENDE} durch.
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 $P(k * f_1)$ mit $k = 2, 3, \dots, K$ und der Summenkomponente $P(f_2 + (n-1) * f_1)$ sowie der Differenzkomponente $P(f_2 - (n-1) * f_1)$ mit $n = 2, 3$ über der Amplitude U_1 durch. Messe die Peak-Auslenkung $X(f_1)$ über der Amplitude U_1 .
4. Ermittle THD

$$d_t = \frac{\sqrt{P(2f_1)^2 + P(3f_1)^2 + \dots + P(Kf_1)^2}}{P_t} * 100 \%$$

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

$$d_3 = \frac{P(f_2 - 2f_1) + P(f_2 + 2f_1)}{P(f_2)} * 100 \%$$

gemäß IEC 60628 [04] als Funktion von U_1 .

5. Suche den kleinsten Wert U im Bereich zwischen U_{START} und U_{ENDE} , bei dem entweder die harmonischen Verzerrungen d_t oder die Intermodulationsverzerrungen zweiter oder dritter Ordnung d_2, d_3 die 10%-Marke erreichen ($U_{10\%}$).
6. Ermittle die Auslenkung X_{MAX} für die korrespondierende Amplitude $U_{10\%}$.

Diese Messungen sind auch mit STEPS, einem Programm der ARTA-Familie, ab Version 1.4 durchführbar. Lediglich die Messung der Auslenkung stellt eine Abweichung vom Messalltag dar. Auf



ARTA - APPLICATION NOTE

No 7: Ermittlung der linearen Auslenkung mit STEPS

der Suche nach einem geeigneten Distanzsensord wurde der OADM 20I6441/S14F der Firma Baumer [05] ausgemacht.

Die Spezifikation weist bei einem mittleren Messabstand von 50 mm einen Messbereich von +/- 20 mm bei einer Auflösung von mindestens 0,02 mm aus, was in der Lautsprechermesstechnik für die meisten Anwendungsfälle genügen sollte. Eine Ansprechzeit von 0,9 ms ermöglicht eine obere Grenzfrequenz von ca. 550 Hz. Näheres ist dem Auszug der folgenden Spezifikation zu entnehmen:

Allgemeine Daten	
Sensorelement	Photodiodezelle
Messdistanz Sd	30 ... 70 mm
Einstellung	Teach-in: Taste / Extern
Abstand Teach-In-Grenzen	> 2 mm
Betriebsanzeige	LED grün
Anzeige Alarm- / Verschm.	LED rot / LED rot blinkend
Auflösung	0,004 ... 0,02 mm
Linearitätsabweichung	$\pm 0,012 \dots \pm 0,06$ mm
Lichtquelle	Laserdiode rot, gepulst
Wellenlänge	675 nm
Laserklasse	2
Strahlform	Punkt
Strahldurchmesser	1 ... 0,2 mm
Elektrische Daten	
Ansprech- / Abfallzeit	< 0,9 ms
Betriebsspannungsbereich +Vs	12 ... 28 VDC
Stromaufnahme max.	120 mA
Ausgangsschaltung	analog
Ausgangssignal	4 ... 20 mA / 0 ... 10 VDC

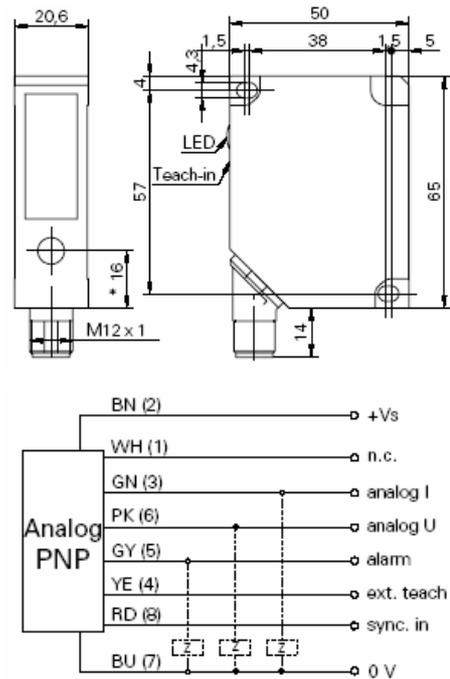


Bild 1: Spezifikation des Distanzsensors OADM 20I6441/S14F, Fa. Baumer [05]

Setup und Grundkalibrierung

Im Folgenden wird die in [02] und [03] beschriebene Prozedur zur Ermittlung der linearen Auslenkung mittels STEPS 1.4 abgebildet.

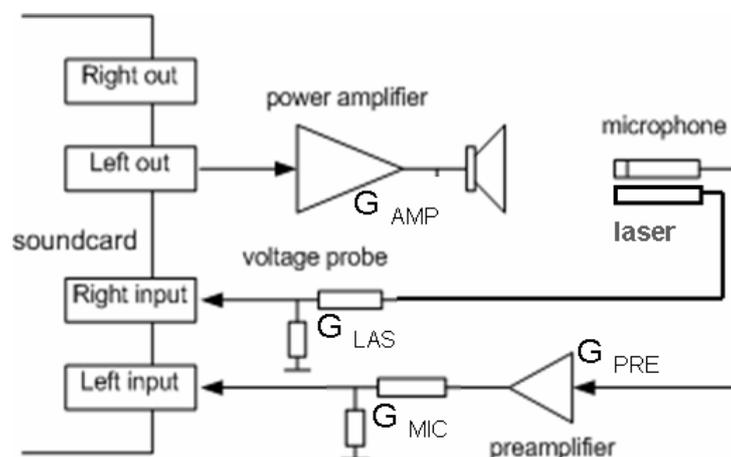


Bild 2: Zweikanaliger Messaufbau

Bild 2 zeigt den Messaufbau. Die Messung erfordert zwei Eingangskanäle; die Ausgangsspannungen der Sensoren (Mikrofon, Laser) müssen durch Spannungsteiler an deren Eingangsempfindlichkeit angepasst werden (Bild 3).

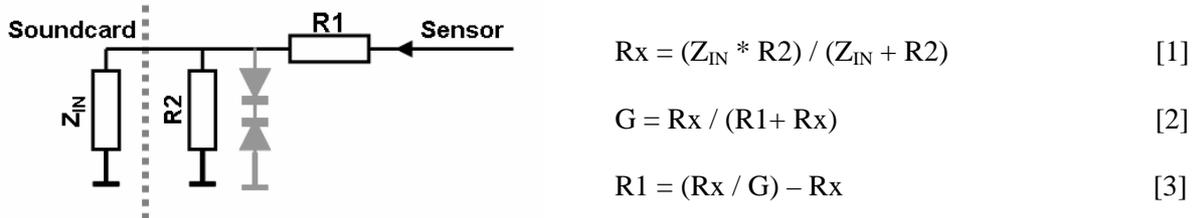
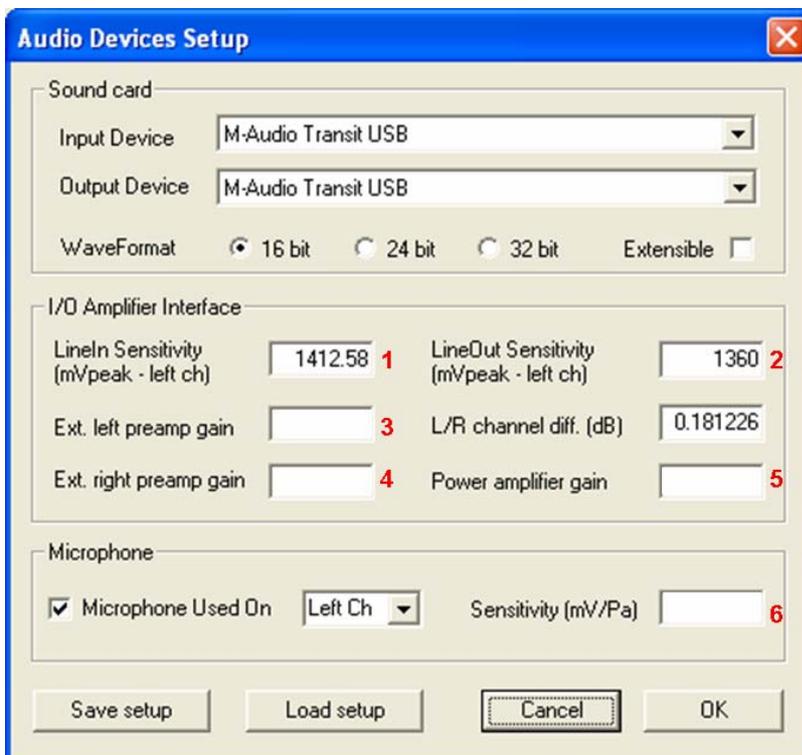


Bild 3: Spannungsteiler für Sensoren

Der Lasersensor hat eine Empfindlichkeit von $10000 \text{ mV} / 40 \text{ mm} = 250 \text{ mV/mm}$. Ein Spannungsteiler mit 12 dB Abschwächung sollte für gängige Soundkarten funktionieren. Ein zweiter Spannungsteiler muss für das Messmikrofon unter Berücksichtigung des Mikrofonvorverstärkers dimensioniert werden.

Da beide Eingangskanäle der Soundkarte für die Sensoren benötigt werden, messen wir zwangsläufig im „Single Channel Mode“. Für eine kalibrierte Messung benötigen wir daher zusätzlich den Verstärkungsfaktor des Leistungsverstärkers.

Bild 4 zeigt das „Audio Devices Setup“ von STEPS mit allen erforderlichen Kalibrierdaten. Die Felder 1, 2, 3 und 6 sind im Kompendium [07] im Abschnitt 5.1 beschrieben, die Felder 4 und 5 werden im Abschnitt 5 und 5.4 behandelt.



- 1 → Grundkalibrierung der Soundkarte (Line IN)
- 2 → Grundkalibrierung der Soundkarte (Line OUT)
- 3 → Abschwächung Mikrofon
- 4 → Abschwächung Distanzsensor
- 5 → Verstärkungsfaktor Leistungsverstärker $G = V_{OUT} / V_{IN}$
- 6 → Empfindlichkeit Messmikrofon

Bild 4: Audio Devices Setup



Vorbereitung und Durchführung der Messung

Der Lautsprecher wird vertikal in einer geeigneten Spannvorrichtung fixiert und die Resonanzfrequenz mit LIMP mit gestuften Sinus bestimmt.

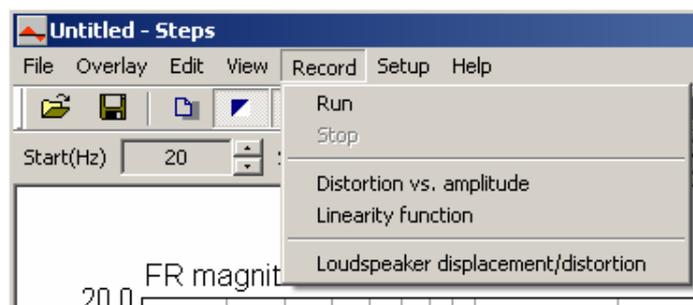
Anschließend werden Mikrofon und Distanzsensor zentrisch auf Achse vor der Membran positioniert (siehe Bild 5). Die Positionierung des Distanzsensors erfolgt mit dem Laserspot, der auf die Mitte der Staubschutzkalotte ausgerichtet sein soll. Ferner ist der Messabstand auf ca. 50 mm einzustellen, was einer Ausgangsspannung des Lasersensors von genau 5,0 Volt entspricht.

Der Mikrofonabstand sollte ca. 0,5 x Membrandurchmesser betragen. Dabei ist zu beachten, dass im Nahfeld bei hohen Schalldrücken gemessen wird und somit dem Grenzschalldruck des Mikrofons besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss [07].



Bild 5: Anordnung von Distanzsensor und Mikrofon vor der Membran

Jetzt wird über das Menü „Record“ die Option „Loudspeaker Displacement/Distortion“ geöffnet und die Messparameter eingestellt (Bild 5).





ARTA - APPLICATION NOTE

No 7: Ermittlung der linearen Auslenkung mit STEPS

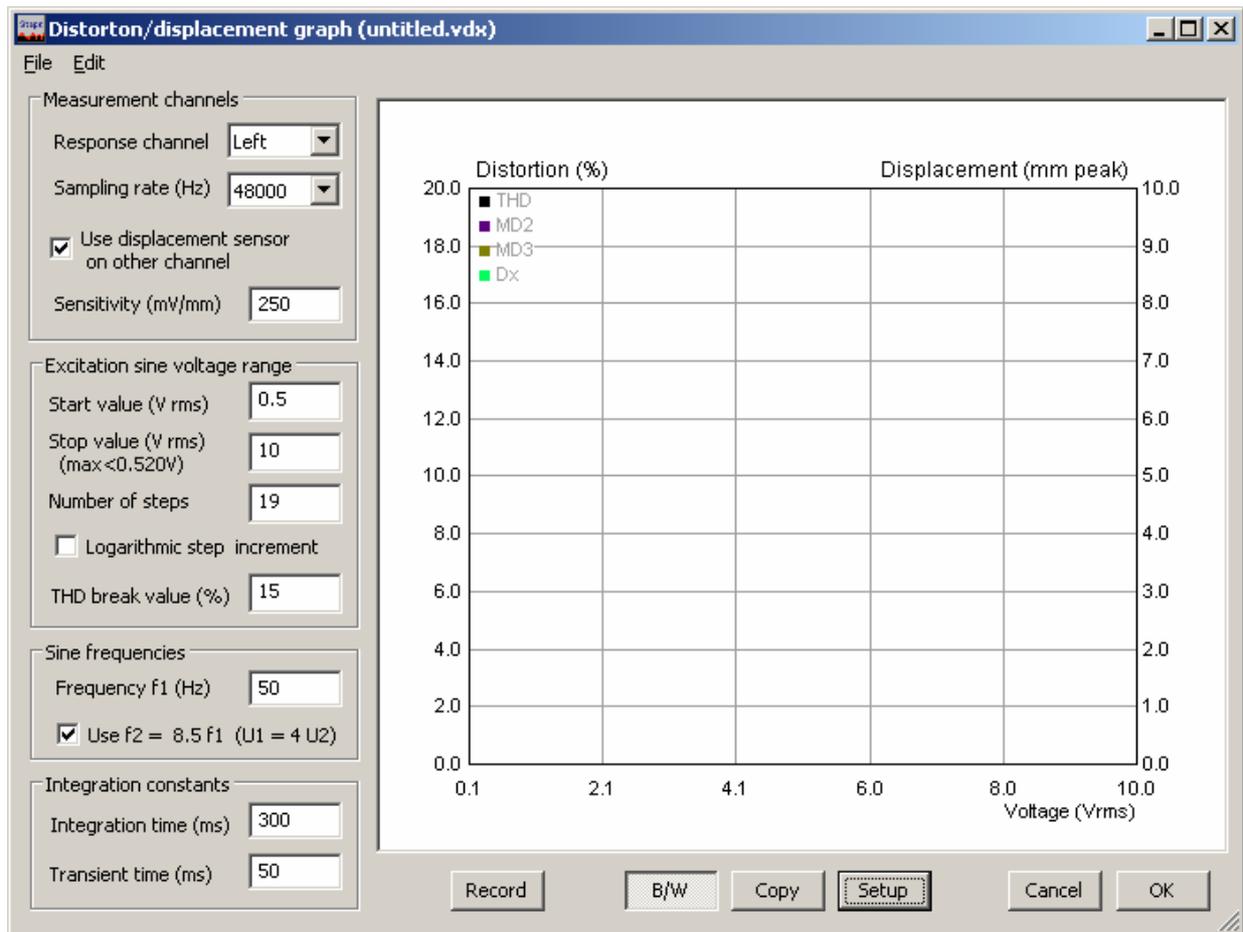


Bild 6: Distortion / Displacement Graph

Bild 6 zeigt im “**Distortion/Displacement Graph**” Fenster alle für die Messung einzustellenden Parameter. Sie sind wie folgt definiert:

Measurement channels

Response channel – definiert der Eingangskanal für das Mikrofon

Sampling rate (Hz) – Wahl der Sampling Frequenz der Soundkarte

Use displacement sensor on other channel – Aktivieren, wenn Distanz Sensor am anderen Eingangskanal verwendet wird

Sensitivity (mV/mm) – Eingabe der Empfindlichkeit des Distanz Sensors

Excitation sine voltage range

Start value (V rms) - Startwert eingeben

Stop value (V rms) – Stopwert eingeben (max. Wert, durch Leistungsverstärker bestimmt, wird in Klammern angezeigt)

Number of steps – Anzahl der Messschritte

Logarithmic step increment – logarithmische Schrittweite an/aus

THD break value (%) – Eingabe des Verzerrungslimit, bei dem die Messung stoppt

Sine frequencies

Frequency f1 (Hz) – Eingabe der Resonanzfrequenz

Use f2 = 8.5 * f1 (U1 = 4 * U2) – Messung der Intermodulationsverzerrungen an/aus

Integration constants

Integration time (ms) – Integrationszeit des RMS-Detektors

Transient time (ms) - transient time (benötigte Zeit zum Erreichen des eingeschwungenen Zustands)



ARTA - APPLICATION NOTE

No 7: Ermittlung der linearen Auslenkung mit STEPS

Vor der Messung müssen alle Parameter definiert sein. Die Parameter des Bereiches “**Measurement channels**” erklären sich selbst (Bild 6, links oben). Wenn ein Distanzsensor verwendet wird, muss die Empfindlichkeit eingegeben werden, im Falle des hier verwendeten OADM 20I6441/S14F beträgt sie 250 mV/mm.

Der Bereich “**Excitation sine voltage range**” definiert die Start-, Stop- und Abbruchbedingungen. Bitte wählen Sie die Werte für die ersten Messungen nicht zu hoch, denn im Falle einer fehlerhaften Grundkalibrierung besteht ansonsten Gefahr der Übersteuerung oder gar eines Schadens an Messequipment oder Lautsprecher. Normalerweise schützen der “THD break value” oder der “Stop value” vor derartigen Ereignissen. Bei sehr niedrigen Anregungssignalen nehmen die Hintergrundgeräusche Einfluss auf die Messung, daher wird empfohlen, die Messung erst mit 0,25 V bis 0,50V zu beginnen. Eine geeignete Wahl der Schrittzahl (number of Steps) erleichtert ungemein die Lesbarkeit der X-Achse. So sollte **(Stop – Start) / Steps** immer einen „geraden“ Wert geben, z.B. $(10 - 0.5) / 19 = 0.5$ V.

Im Bereich “**Sine frequencies**” muss die Anregungsfrequenz $f_1 = f_s$ definiert werden. Wie bereits erwähnt, muss die Resonanzfrequenz unter „Free Air Bedingungen“ mit gestuftem Sinus und einem angemessenen Anregungspegel gemessen werden. Gemäß IEC PAS 62458 muss “**Use $f_2 = 8.5 * f_1$** ” aktiviert sein.

Mit „**Record**“ wird die Messung gestartet. Sie stoppt automatisch nach Erreichen der maximalen Spannung (Stop Value) oder durch Überschreitung des vorgegebenen maximalen Verzerrungswertes (THD break value). Das Ergebnis einer derartigen Messung ist in Bild 8 dargestellt.

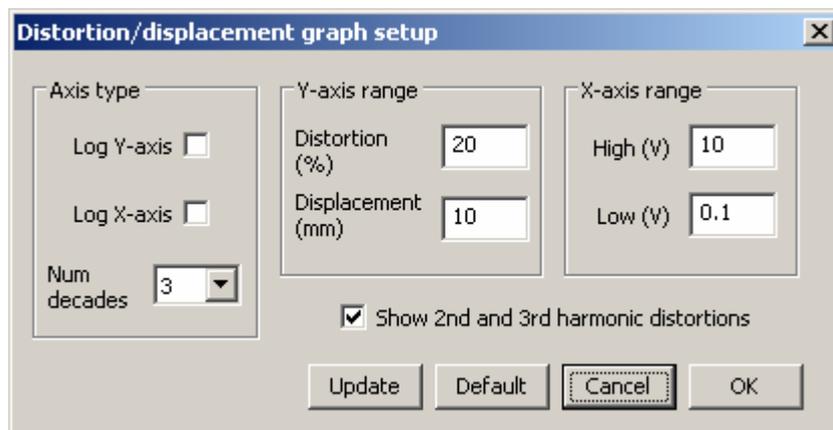


Bild 7: Distortion / Displacement Graph Setup

Die Messdiagramme können durch Modifikation der Parameter im „Distortion/Displacement Graph Setup“ angepasst werden:

Axis Type section

Log Y- axis – logarithmische oder lineare Y-Achse

Log X- axis – logarithmische oder lineare X-Achse

Num decades – Anzahl der angezeigten Dekaden, logarithmische Y-Achse

Y-axis range section

Distortion (%) – Bereich der Y-Achse, Verzerrungen

Displacement (mm) – Bereich der Y-Achse, Auslenkung

X-axis range section

High (V) - Spannung, obere Grenze

Low (V) – Spannung, untere Grenze

Wenn die Checkbox ‘**Show 2nd and 3rd harmonic distortions**’ aktiviert ist, werden auch die harmonischen Komponenten in der Grafik angezeigt.

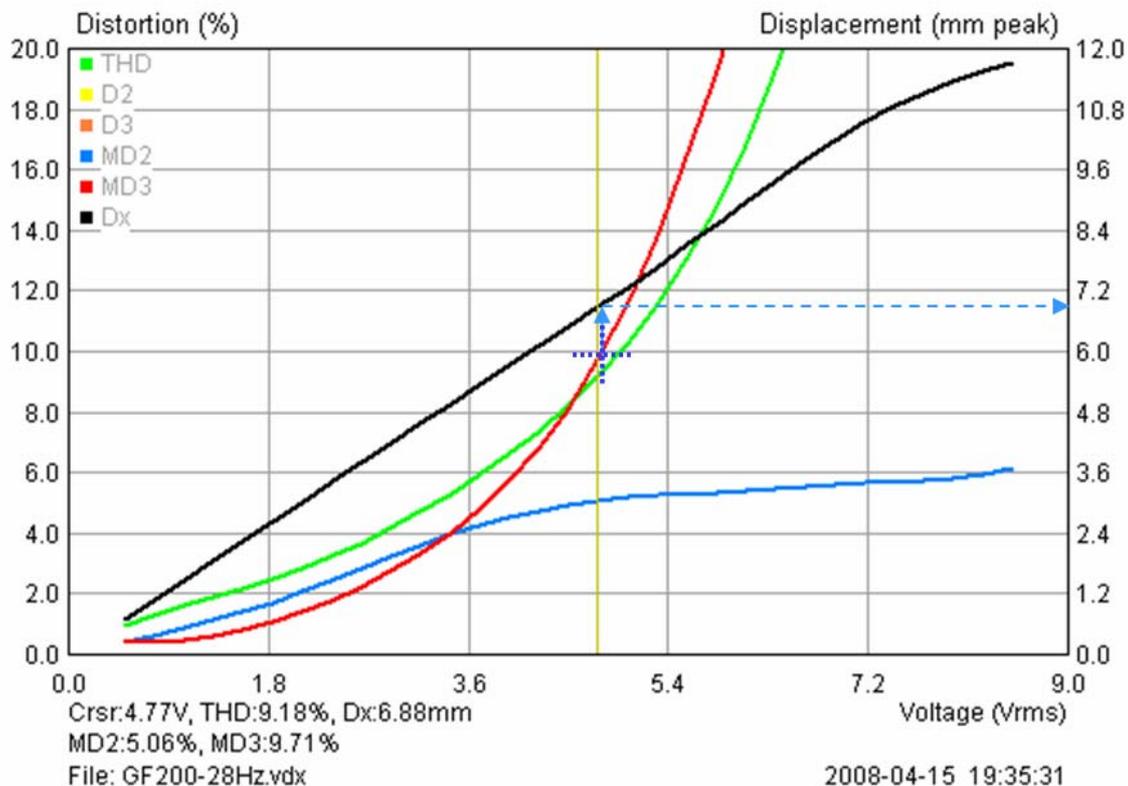


Bild 8: Messergebnis für einen Tieftöner (gelb=Auslenkung Dx)

Bild 8 zeigt das Ergebnis einer kombinierten Auslenkungs-/Verzerrungsmessung als Funktion der Anregungsspannung. Aus dieser Darstellung kann bestimmt werden, bei welcher Auslenkung (schwarze Linie) der Lautsprecher Verzerrungen in Höhe von 10% produziert. Es ist dabei unerheblich, welche der Verzerrungskomponenten zuerst die 10%-Marke erreicht.

Der Schnittpunkt mit der 10%-Linie (hier MD3, rote Linie) wird auf die Auslenkungsmessung gelotet (blauer Pfeil nach oben) und der neue Schnittpunkt in der Horizontalen zur Auslenkungsschse geführt (blauer Pfeil). Das Ergebnis der Messung der linearen Auslenkung kann wie folgt dargestellt werden:

Hersteller Daten	GF 200
Resonanzfrequenz f_s	32 Hz
Effektive Membrablfläche S_D	214 cm ²
Höhe der Polplatte H	6 mm
Länge der Schwingspulenwicklung L	20 mm
Mathematische lineare Auslenkung $X_{LIN} = L - H$	14 mm
Mathematisches Verschiebevolumen $V_D = S_D * X_{max}$	299,6 cm ²
X_{LIN} gem. IEC PAS 62458	
X_{LIN} @ f_s , 10%	14,1 mm
V_D @ f_s , 10%	301,7 cm ²

Tabelle 1: Spezifizierung von Auslenkungsmessungen (in mm pp)

Wie wir sehen können, sind in diesem Fall die Herstellerdaten und die Messungen gem. IEC PAS 62458 in guter Übereinstimmung.

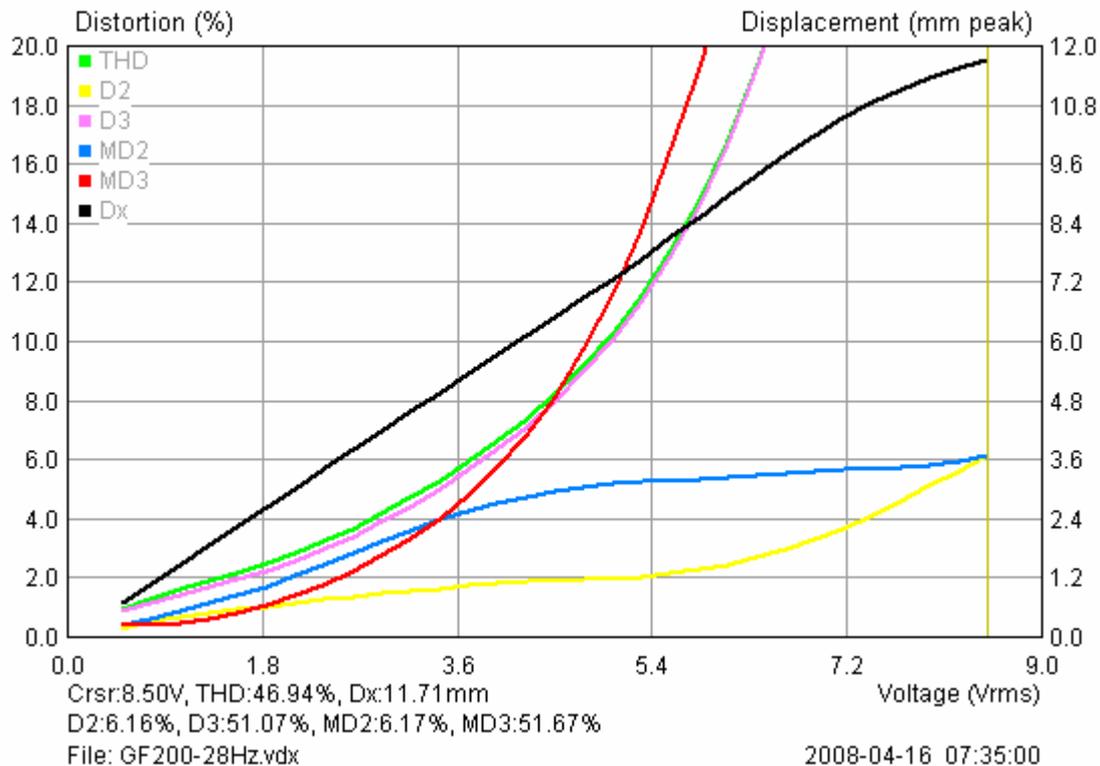


Bild 9: Messergebnisse, alle Verzerrungskomponenten angezeigt

Für die Interpretation der Messergebnisse ist Tabelle 1 sehr hilfreich. Weil dafür auch die harmonischen Komponenten benötigt werden, muss 'Show 2nd and 3rd harmonic distortions' im „Distortion / Displacement graph setup“ aktiviert sein. Bild 9 zeigt die „erweiterte“ Darstellung von Bild 8.

Mögliche physikalische Ursache	Harmonische Verzerrungen		Intermodulationsverzerrungen	
	D2	D3	IMD2	IMD3
Offset Schwingspule und Asymmetrie BL(x)	X		X	
Länge der Schwingspule		X		X
Asymmetrie der Aufhängung	X			
Symmetrische Begrenzung der Aufhängung		X		
Asymmetrie Le(x)			X	
Symmetrische Variation von Le(x)				X
Doppler			X	

Tabelle 2: Mögliche physikalische Gründe für Nichtlinearitäten, W. Klippel [06]

Die Reihenfolge der gemessenen Verzerrungskomponenten bei der Spannung von $X_{LIN}@fs,10\%$ ist in diesem Beispiel MD3, D3, MD2, D2. Die beiden stärksten Komponenten MD3 und D3 sind eine Indikation dafür, dass die Schwingspulenlänge der limitierende Faktor ist. Das ist in guter Übereinstimmung mit den Daten der Antriebsgeometrie des Herstellers (Tabelle 1).

Bild 10 zeigt weitere Messergebnisse für diverse Tieftöner verschiedener Hersteller. Wir wünschen „Fröhliches Interpretieren“!



ARTA - APPLICATION NOTE

No 7: Ermittlung der linearen Auslenkung mit STEPS

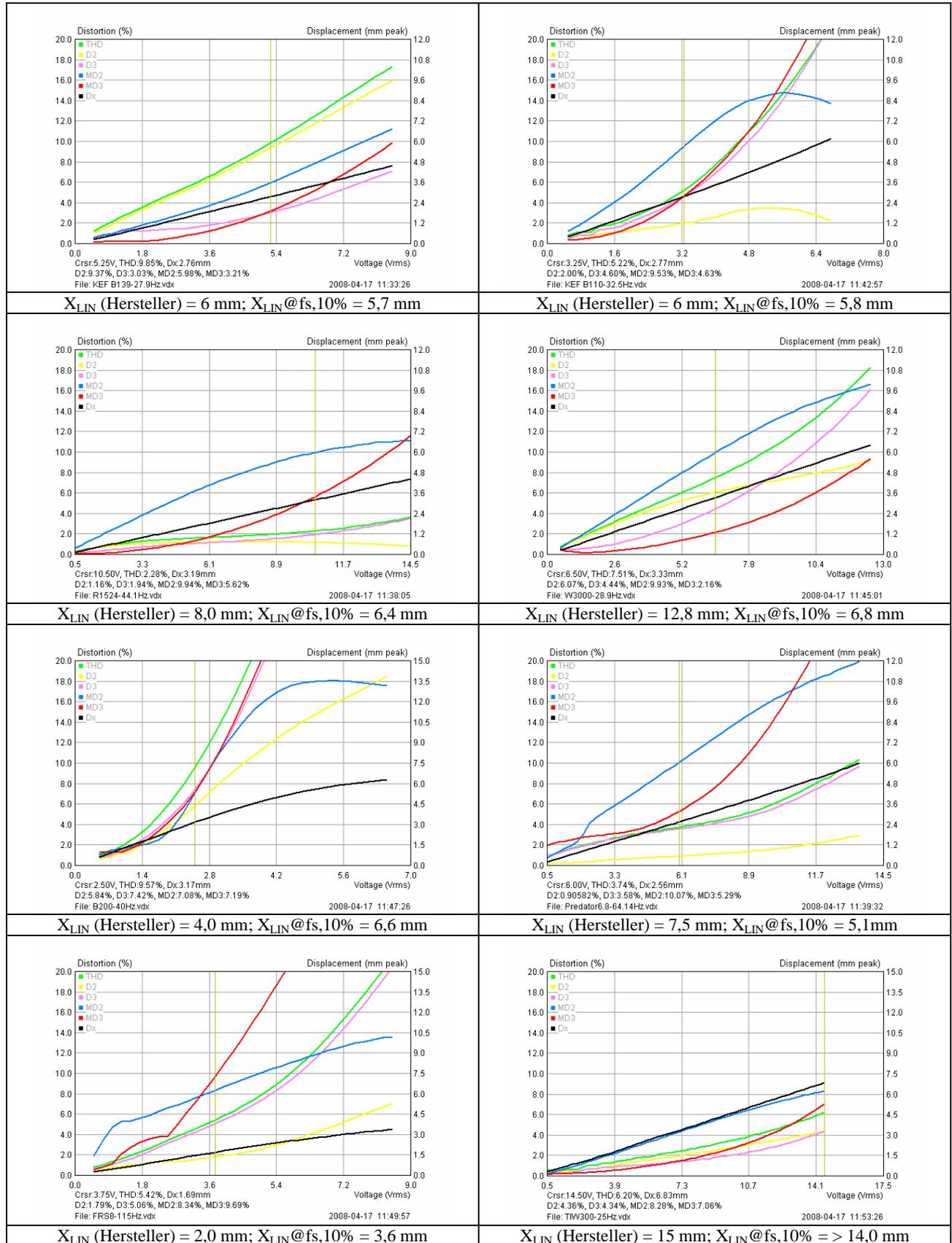


Bild 10: Messergebnisse für eine Sammlung von Tieftönern verschiedener Hersteller



ARTA - APPLICATION NOTE

No 7: Ermittlung der linearen Auslenkung mit STEPS

Danksagung

Unser abschließender Dank geht an Herrn Jens Jacobi, Technische Beratung und Verkauf der Baumer GmbH, für die Zurverfügungstellung des Distanzsensors, der sich durch ein gutes Preis-/Leistungsverhältnis und durch einfache Handhabung auszeichnet. Herrn Friedemann Hausdorf, VISATON, sei für die Überlassung eines Großteils der Prüfobjekte gedankt. Matthias danke ich für diverse Messungen zur Vorbereitung der Laserversuche.

Literatur

- [01] 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>
- [02] IEC PAS 62458: Sound System Equipment – Electroacoustical transducers – Measurement of large signal parameters
- [03] AN4 - Measurement of Peak Displacement Xmax - Application Note to the KLIPPEL ANALYZER SYSTEM
- [04] IEC 60268-5: Sound System Equipment – Part 5: Loudspeakers
- [05] Baumer GmbH, Pfingstweide 28, 61169 Friedberg
Spezifikation OADM20I6441S14F
<http://www.baumerelectric.com>
- [06] W. Klippel: Assessing Voice Coil Peak Displacement
<http://www.klippel.de>
- [07] ARTA Kompendium, Revision D 2.1

HWe/IM/04.08