



### Eine Kammer zum Kalibrieren von Mikrofonen unterhalb 500 Hz

Ein Artikel von Alex Khenkin von Earthworks [1], einem Hersteller hochwertiger Mikrofone, machte neugierig, eine dort beschriebene Methode zur Kalibrierung von omnidirektionalen Mikrofonen unterhalb 500 Hz auszuprobieren.

Im besagten Artikel - der übrigens für jeden DIY-ler lesenswert ist, der etwas über die Kalibrierung vom Mikrofonen wissen möchte - ist folgender Absatz zu finden:

*“Measuring very low frequencies by the substitution method is problematical because such tests require a very large anechoic space. To measure in frequency range from zero to 500 Hz, we use a small, piston driven pressure chamber. This method is actually a primary frequency response calibration, since the pressure in a given size chamber at a given temperature depends only on the volume displaced by the driving piston. The high frequency limitation is defined by the chamber size, which should be less than 1/6 wavelength in any direction. Of course, this only works for pressure microphones (omnis).”*

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 reflektionsarmen 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.

Die Druckkammer ist auch für den DIY-Bereich interessant. Unter der Voraussetzung, dass die Kammer einmal mit einem Referenzmikrofon vermessen wurde, ist es aufgrund der geringen Abmessungen kein Problem, die Kammer auf Reisen zu schicken, um andere Mikrofone in Frequenzgang und Pegel zu kalibrieren.

### Funktionsweise und Konstruktion der Messkammer

Wenn die größte Abmessung der Druckkammer kleiner ist als 1/6 bis 1/8 der Wellenlänge der oberen Grenzfrequenz, so verhält sich die Kammer wie eine akustische Kapazität

$$C_K = V / (p_0 c^2) \quad [1]$$

mit  $p_0 = 1,18 \text{ kg/m}^3$  und  $c = 344 \text{ m/s}$ . Erzeugt die Membran eines Treibers mit der Fläche  $S$  und der Geschwindigkeit  $v$  eine Volumenverschiebung mit der Geschwindigkeit  $U = v * S$ , so entsteht beim Durchfließen der Kapazität ein Schalldruck von

$$P_K = v * S / j \omega C_K \quad [2]$$

wobei Membrangeschwindigkeit  $v$  und -auslenkung  $x$  in folgender Beziehung stehen

$$v = j \omega x \quad [3]$$

Durch Einsetzen von Gleichung [3] in Gleichung [2] kann gezeigt werden, dass der Schalldruck

$$P_K = (S / C_K) * x \quad [4]$$

in der Kammer innerhalb des oben genannten Gültigkeitsbereiches proportional zur Membranauslenkung  $x$  ist.



# ARTA - APPLICATION NOTE

## No 5: Die ARTA-Mikrofonkalibrierkammer fürs untere Ende

Mit diesen Angaben sind schnell die Abmessungen einer Messkammer berechnet. Die größte Abmessung soll maximal 1/6 bis 1/8 der Wellenlänge der oberen Grenzfrequenz betragen, bei 500 Hz also

$$\lambda = c / f = 344 / 500 = 0,67 \text{ m} \rightarrow 1/6 \text{ bis } 1/8 = 11,5 \text{ cm bis } 8,4 \text{ cm}$$

Die Abmessungen der Messkammer bleiben somit recht überschaubar. Für die ersten

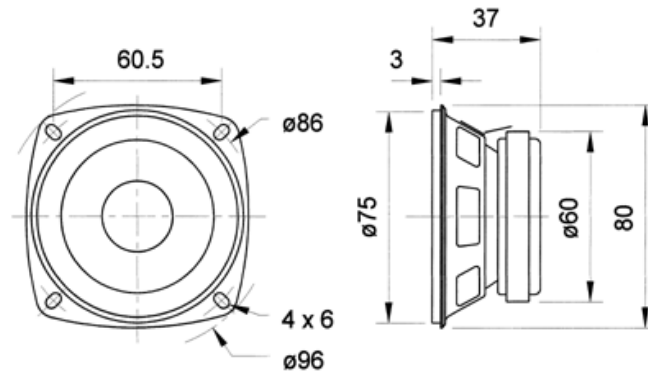


Bild 1: Abmessungen des FRS 8

Versuche wurde eine Konstruktion aus zwei MDF-Platten, einem Stück 75 mm Abflussrohr und einem FRS 8 von Visaton hergestellt. Die Hauptabmessungen der Messkammer können Bild 2 entnommen werden, die restlichen Abmessungen ergeben sich aus den verwendeten Bauteilen und sollten beim Nachbau direkt abgenommen werden.

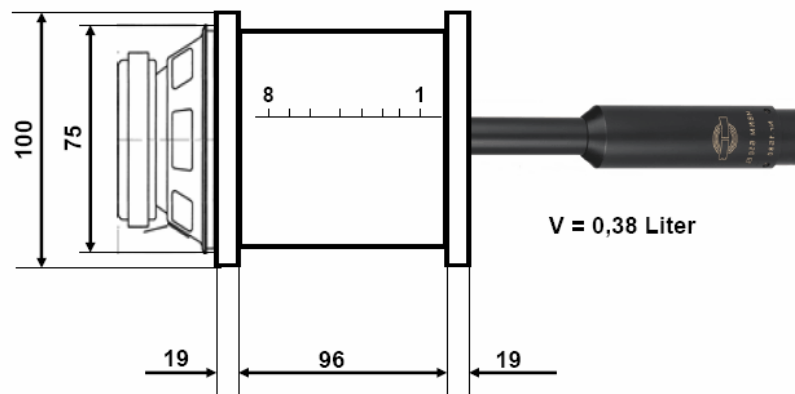


Bild 2: Konstruktionsprinzip der Messkammer

Der Durchmesser der Schallaustrittsöffnung des kleinen Breitbanders ist genauso groß wie der Innendurchmesser des Abflussrohrs, was gut für einen glatten Übergang ist.

Anzahl	Bezeichnung
2	19 mm MDF, 10 x 10 cm
1	Abflussrohr, Durchmesser 75 mm, 110 mm lang
4	Gewindestangen, M4 x 150 mm Lang
8	Muttern M4
1	Rundstab, Buche 25 mm Durchmesser

Tabelle 1: Stückliste der Messkammer



# ARTA - APPLICATION NOTE

## No 5: Die ARTA-Mikrofonkalibrierkammer fürs untere Ende

Bei jeweils 7 mm Versenkung des Rohres in den MDF-Platten verbleiben 96 mm effektive Länge, was ein Kammervolumen von 0,38 Litern ergibt. Weitere konstruktive Details sind durch Fotos dargestellt. Der Nachbau sollte mit den gemachten Angaben sowie den Bildern problemlos möglich sein.



Bild 3.1: Seitenansicht der fertigen Messkammer



Bild 3.2: Rückansicht der fertigen Messkammer mit Treiber

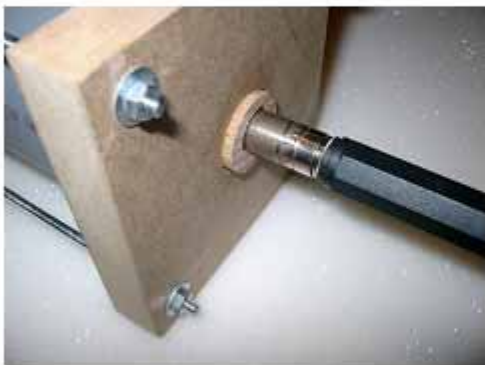


Bild 3.3: Frontansicht der fertigen Messkammer mit DUT



Bild 3.4: Front (Innenansicht) mit Nut zum Einpressen des Abflussrohrs



Bild 3.5: Vorderseite (Mikrofonseite) mit Loch für Mikrofonadapter aus 25 mm Rundstab



Bild 3.6: Rückwand (Treiberseite), Außenansicht mit Nut zum Einsetzen des Treibers

### Eigenschaften der Druckkammer

Die Anwendung der Druckkammer ist weitgehend den Bildern 3.1 bis 3.6 zu entnehmen. Das zu prüfende Mikrofon wird mit Hilfe eines Adapters in die Kammer eingebracht und anschließend mit ARTA oder STEPS im gültigen Frequenzbereich vermessen. Das Einbringen des Mikrofons in die Kammer hat den Vorteil, dass die Messung weitgehend unabhängig von der Umgebung wird und zusätzlich Störungen ausgeblendet werden. Eine rückwärtige Kapselung des Lautsprechers würde diesen Effekt noch steigern.

Zwecks Vorbereitung der eigentlichen Messungen wurden einige Vorversuche erforderlich, die dem Leser nicht vorenthalten werden sollen. Zum einen sollte ermittelt werden, ob sich die Druckkammer unter Einsatzbedingungen auch so verhält wie oben erläutert, und zum anderen, wie empfindlich sie auf die Variation von Parametern reagiert.

Zunächst wurde mit den Parametern des FRS8 und den Daten der Kammer eine Matlab-Simulation durchgeführt. Bild 4 zeigt das Ergebnis für Amplituden-, Auslenkungs-, Phasen- und Impedanzverlauf.

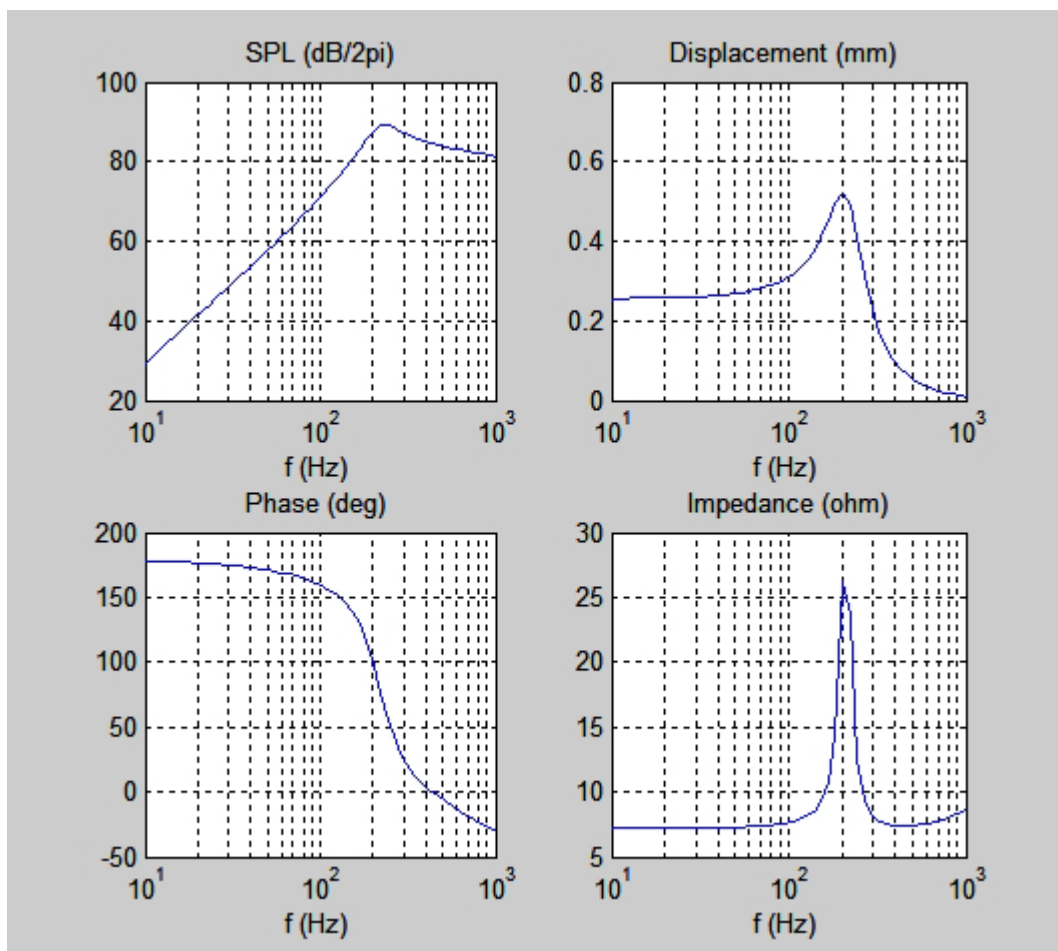


Bild 4: Matlab-Simulation des FRS 8 in 0,38 Liter Volumen

Bild 5 zeigt den Frequenzgang des FRS 8 innerhalb der Druckkammer. Amplitude und Membranauslenkung (siehe Bild 4) haben einen sehr ähnlichen Verlauf.

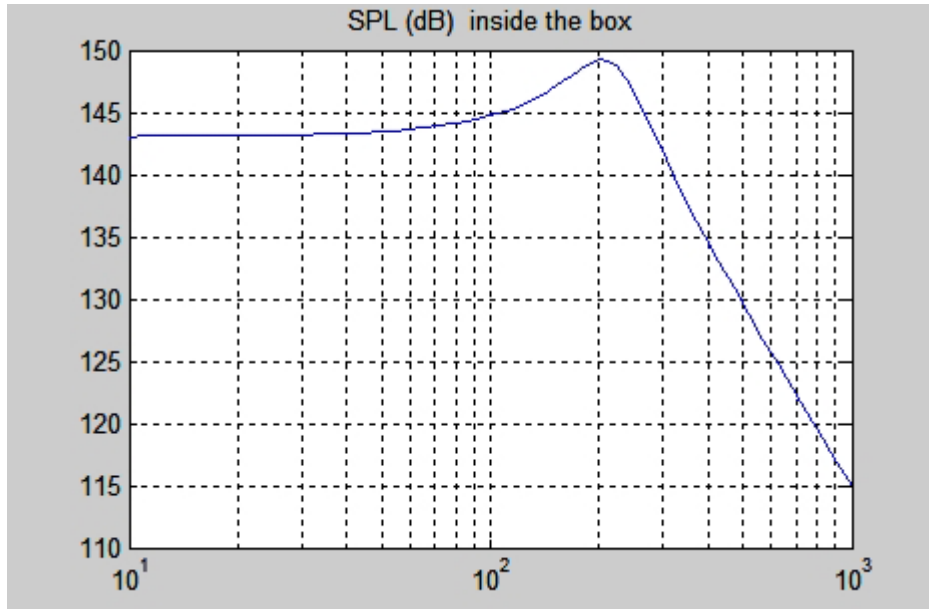


Bild 5: Schalldruckverlauf innerhalb der Messkammer (Matlab-Simulation)

Beachtenswert ist der hohe Schalldruck in der Kammer bei 2,83 Volt. Unterhalb der Resonanzfrequenz beträgt er ca. 145 dB, also weit über dem Grenzschalldruck gängiger Mikrofone (siehe hierzu auch weiter unten).

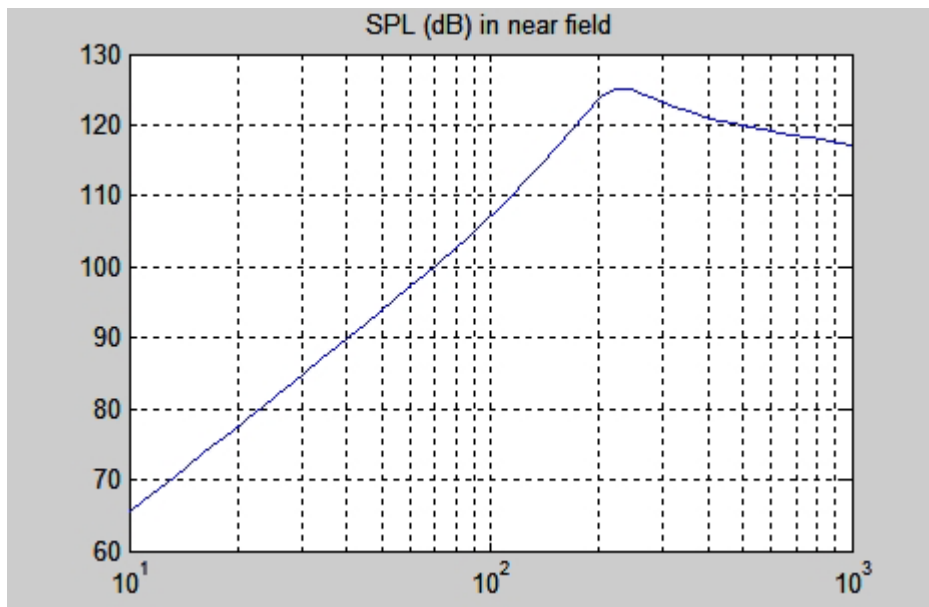


Bild 6: Schalldruckverlauf im Nahfeld (Matlab-Simulation)

Zu guter Letzt wurde noch der Schalldruckverlauf im Nahfeld simuliert, um später einen Vergleich mit Messungen vornehmen zu können.

Wie bereits aus der Simulation in Bild 5 zu sehen, ist in der Kammer mit einem hohen Schalldruck zu rechnen. Um die zu untersuchenden Mikrofone vor Schäden zu schützen, wurde daher als erstes die Empfindlichkeit der Druckkammer gemessen.

Bild 7 zeigt die Ergebnisse für den relevanten Schalldruck-Spannungsbereich bei 200 Hz und 1000 Hz.

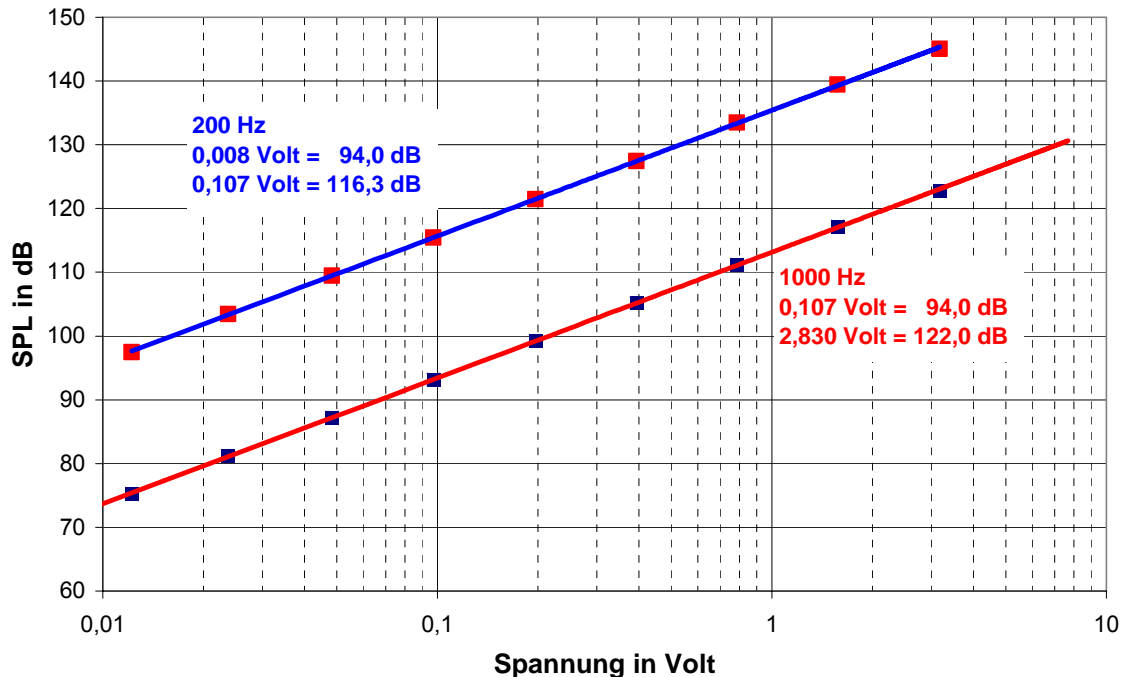


Bild 7: Empfindlichkeit der Messkammer in Abhängigkeit von der Eingangsspannung

Bei 1000 Hz, der für Kalibratoren üblichen Testfrequenz, benötigt die Kammer für einen Schalldruck von 94 dB eine Eingangsspannung von 0,107 V.

Im hier interessierenden Frequenzbereich unterhalb 500 Hz sollten Eingangsspannungen über 0,1 Volt vermieden werden. Darüber muss zwangsläufig mit hohen Verzerrungen oder im Extremfall sogar mit Schäden am Mikrofon gerechnet werden (s. auch Anhang Nr. 2). Im hier vorliegenden Aufbau ist eine Eingangsspannung von ca. 0,01 Volt RMS für die Kalibrierung geeignet.

Die oben gezeigten Messdaten gelten nur für die hier untersuchte Anordnung. Bei genauer Einhaltung der Kammerabmessungen und des Volumens sowie Einsatz des gleichen Treibers sollte das Ergebnis jedoch mit relativ geringer Abweichung reproduzierbar sein.

Im zweiten Schritt wurde der Nahfeldfrequenzgang des FRS 8 ermittelt. Aufgrund des Einbaues konnte nur der korbseitig abgegebene Schall direkt hinter dem Magneten gemessen werden (siehe Bild 8). Im Vergleich zur Simulation fehlen ca. 15 dB Schalldruck, was möglicherweise an der Messanordnung liegen könnte. Eine Kontrollmessung mit einem FRS8 auf einer offenen Schallwand bestätigte diese Vermutung. Die Pegeldifferenz zwischen Vorder- und Rückseite beträgt im Nahfeld bei 200 Hz ca. 13,9 dB.

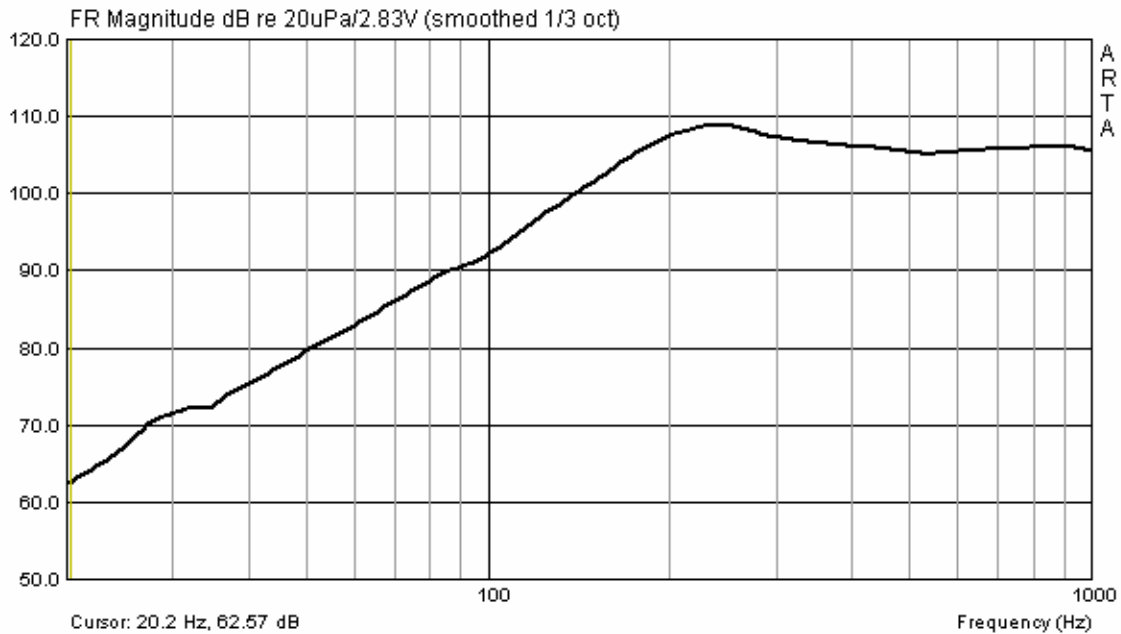


Bild 8: Schalldruckverlauf im Nahfeld, Mitte Magnet (MB 550)

Als nächstes wurde untersucht, inwieweit die Position des Mikrofons in der Kammer einen Einfluss auf das Ergebnis hat. Dazu wurde ein Mikrofon an 8 verschiedenen Positionen jeweils im Abstand von 1 cm mit STEPS von 5 Hz bis 1000 Hz gemessen (siehe Bild 2 und Bild 5). Position 1 ist dabei mikrofonseitig in 1 cm Abstand von der MDF-Platte lokalisiert.

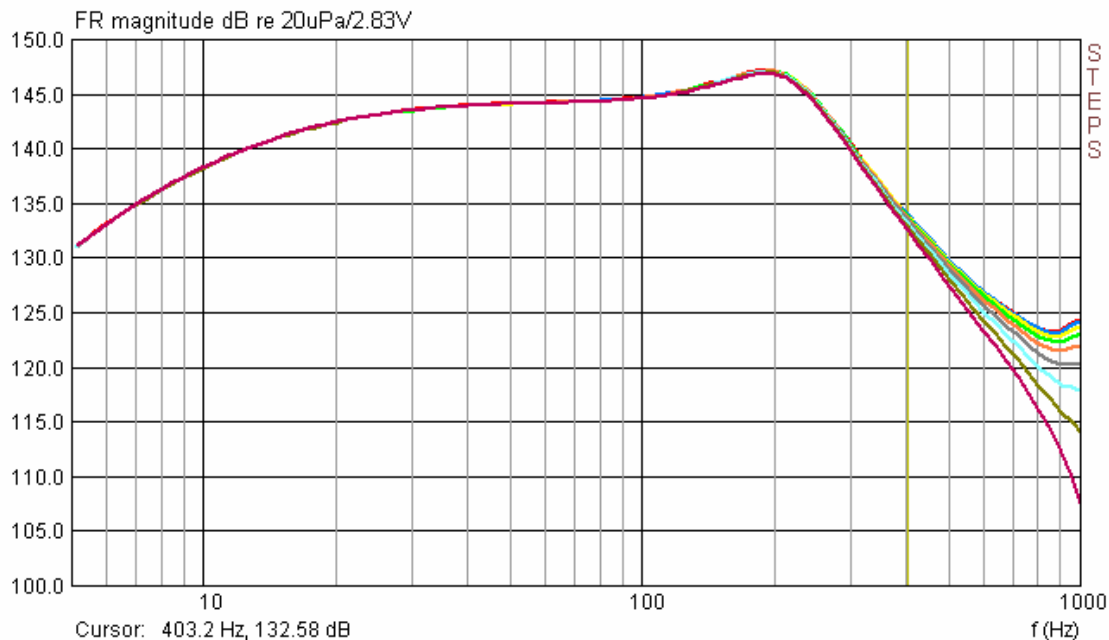


Bild 9: Amplitudenfrequenzgang in Abhängigkeit von der Mikrofonposition (WM 60)

Zunächst fällt auf, dass die Messung oberhalb 20 Hz recht gut mit der Simulation übereinstimmt (siehe Bild 5). Sowohl der absolute Pegel als auch der Amplitudenverlauf werden durch die Simulation gut beschrieben.

Ferner ist zu sehen, dass sich ab 400 Hz deutlich der Einfluss der Messposition bemerkbar macht. Die Auswertung der beiden am weitesten auseinander liegenden Messpunkte für verschiedene Frequenzen ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Position	100 Hz	200 Hz	300 Hz	400 Hz	500 Hz
Pos 1 cm	144,73	147,12	140,25	134,00	129,62
Pos 8 cm	144,65	146,82	139,48	132,58	127,21
Range	0,08	0,30	0,77	1,42	2,41

Tabelle 2: Abhängigkeit von der Messposition

Sofern die Position des Messmikrofons auf +/- 1 cm konstant gehalten wird, ist davon auszugehen, dass die Abweichungen bis 500 Hz kleiner als 1 dB sein werden.

Als dritter Parameter wurde der Einfluss der Abdichtung der Kammer untersucht. Bild 10 zeigt die Ergebnisse.

Die blaue Kurve zeigt die sorgfältig mit Kitt abgedichtete Kammer, die rote Kurve gilt für eine Messung mit Mikrofonadapter, aber ohne Kittdichtung (kleiner Spalt) und die schwarze Kurve wurde ohne Adapter und ohne Dichtungskitt (großer Spalt) gemessen.

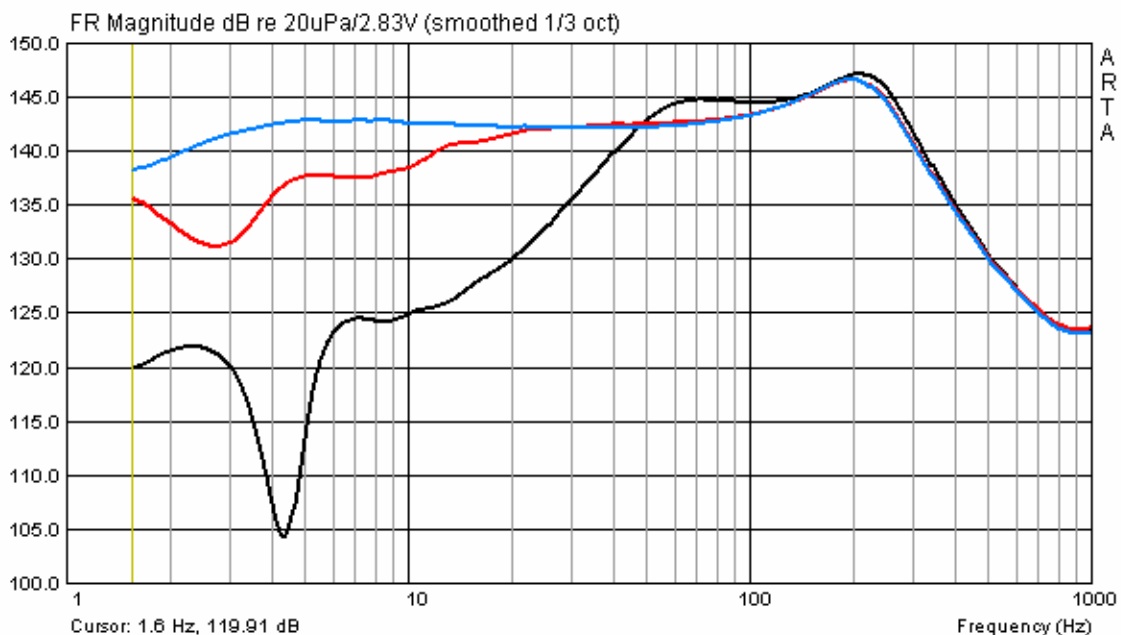


Bild 10: Frequenzgang in Abhängigkeit von der Dichtigkeit der Messkammer (MK 221)

Es bedarf keiner langen Erklärung, die Messkammer muss gut abgedichtet sein, sonst werden die Messungen nicht reproduzierbar sein.

Mit Kitt und ein wenig Erfahrung sollte die Abdichtung kein Problem sein, da Undichtigkeiten relativ leicht am Frequenz- bzw. Impedanzgang zu erkennen sind. Bild 11a zeigt



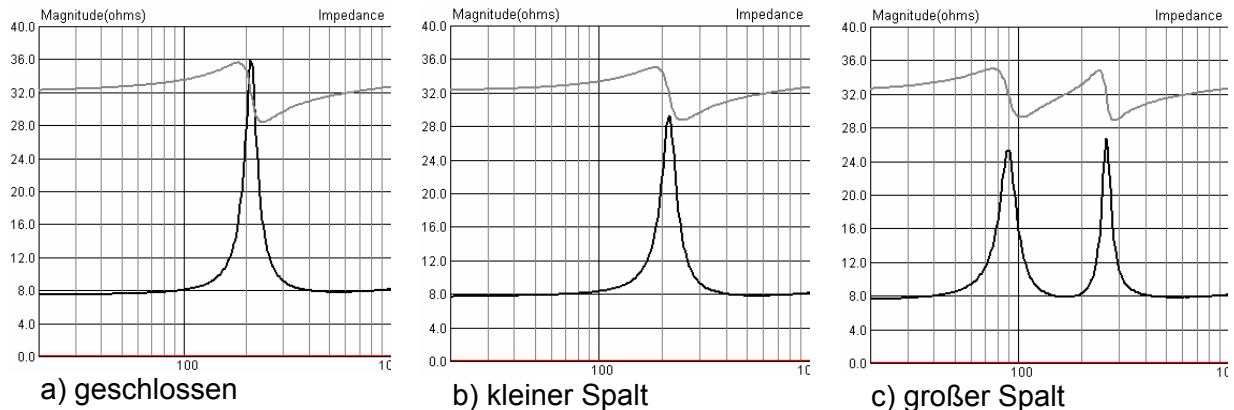


Bild 11: Auswirkung der Dichtigkeit der Messkammer auf den Impedanzgang

die geschlossene Kammer, Bild 11b die mit Mikrofonadapter und Mikrofon verschlossene Kammer (kleiner Spalt) und Bild 11c die Kammer mit offenem 13 mm Adapter.

### Kalibrierungsmessungen

Für die Kalibrierungsmessungen wurde als Referenz ein Messmikrofon des Typs MK 221 der Firma Mikrotech Gefell verwendet.


<b>Technische Daten/Specifications MK 221</b>  Wandlertyp Transducer type  *Frequenzbereich des Freifeldübertragungsmaßes *Frequency range free-field response  *Feld-Leerlauf-Übertragungsfaktor/Sensitivity Grenzschalldruckpegel für 3 % Klirrfaktor bei 1 kHz Max. SPL for THD ≤ 3 % at 1 kHz	21.31 92.58	PTB-Zulassung-Nr. zur amtlichen Eichung	
	Kapazitiver Druckempfänger Capacitive pressure transducer  3,5 Hz ... 20 kHz (± 2 dB)  50 mV/Pa 146 dB		

Bild 12: Auszug aus der Spezifikation des Referenzmikrofons

Der Frequenzbereich des Referenzmikrofons ist mit 3,5 Hz bis 20 kHz +/- 2 dB angegeben, auch bzgl. des Grenzschalldruckpegels haben wir mit 146 dB im Vergleich zu üblichen DIY-Mikrofonen einige Reserve.

Das nächste Bild zeigt den mit STEPS ermittelten Frequenzgang des MK 221 in der Messkammer. Hier deckt sich die Messung fast exakt mit der Simulation.

Somit könnte theoretisch auch ohne Referenzmikrofon eine Kalibrierung, zumindest aber ein Vergleich von Mikrofonen im Frequenzbereich bis 200 – 300 Hz vorgenommen werden.

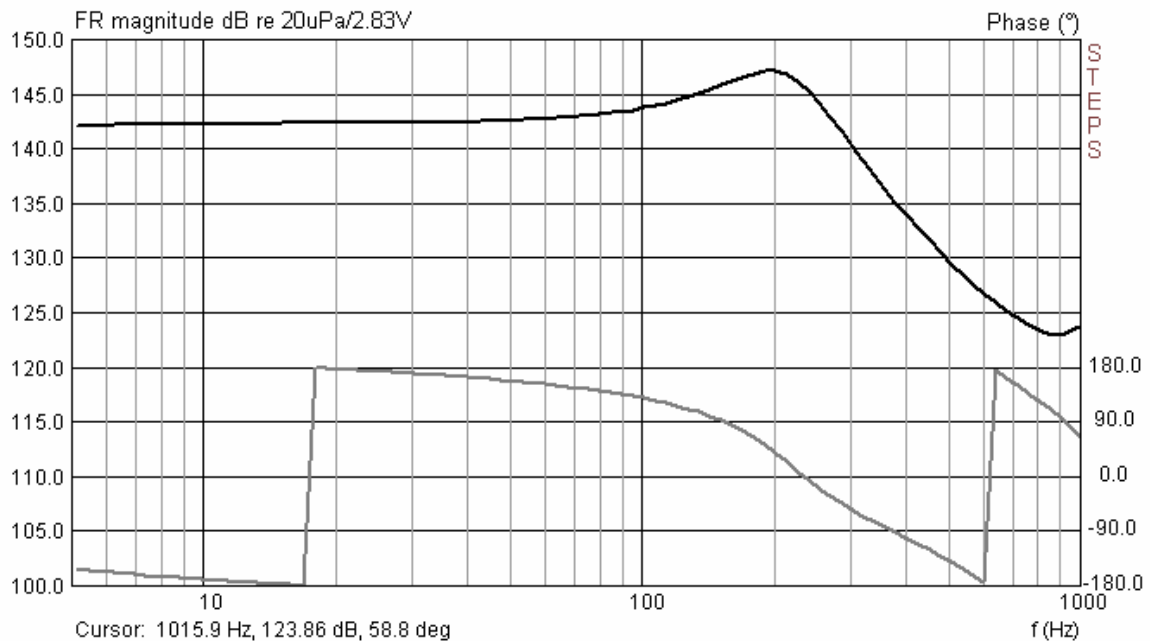


Bild 13: Referenzfrequenzgang in Messkammer

Für die Kalibrierversuche standen folgende Mikrofone zur Verfügung:

- Messmikrofon MB 550
- 2 Sennheiser KE4-211 (Kapseln in unterschiedlichen Gehäusen)
- MCE 2000, Monacor
- WM 60, Panasonic

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

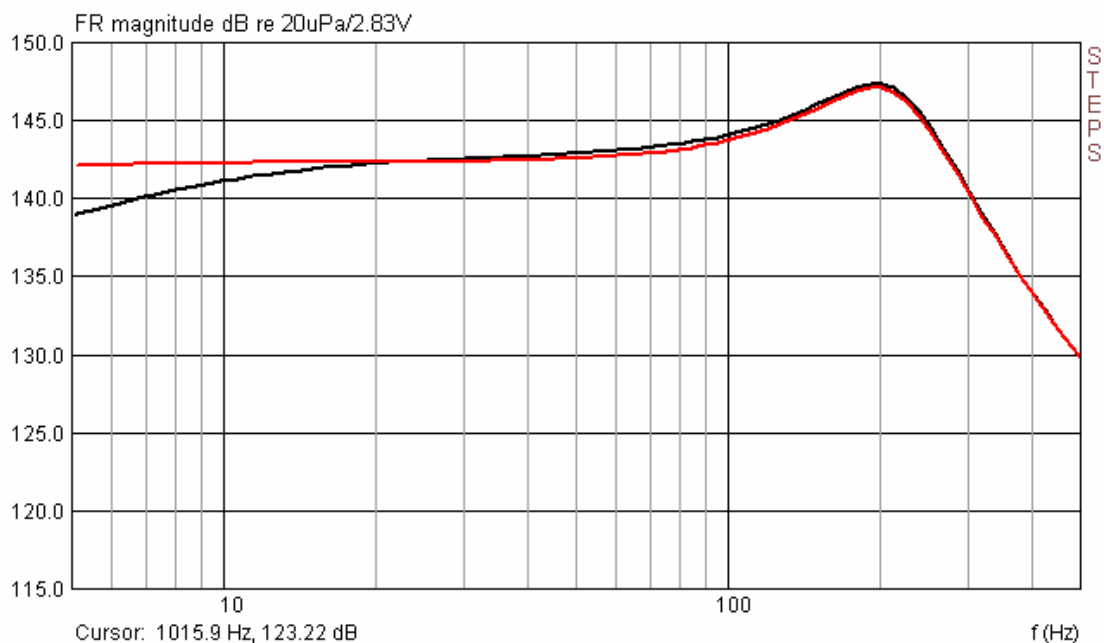


Bild 14: MB 550 (schwarz) und Referenzfrequenzgang nach Pegelanpassung

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 wird (hier 300 Hz) und die jeweilige Empfindlichkeit am Cursor abgelesen wird. Die Differenz ist anschließend mittels ‚Scale‘ auszugleichen (s. Bild 14).

Sofern mit ARTA gemessen wurde, kann die erforderliche Differenzbildung direkt mit ‚Edit → Subtract Overlay‘ erfolgen.

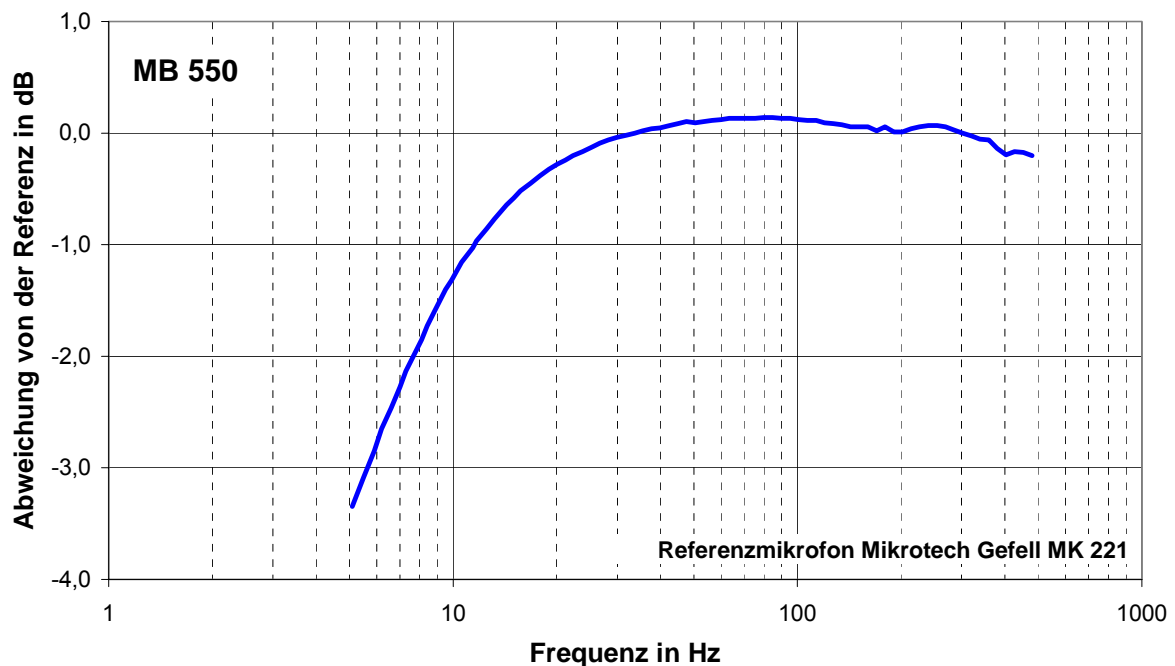


Bild 15: MB 550, Abweichungen vom Referenzfrequenzgang

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 14 zeigt das mit STEPS ermittelte Ergebnis für das Mikrofon MB 550. Die Ergebnisse für die restlichen Mikrofone sind in Bild 16 zusammengefasst.

Es bestätigt sich, dass unterhalb 50 Hz mit deutlichen Abweichungen zwischen verschiedenen DIY-Mikrofonen zu rechnen ist. Selbst der Erwerb relativ hochwertiger Mikrofonkapseln (KE4-211) ist anscheinend keine Gewähr dafür, dass Abweichungen von der Spezifikation oder Streuungen vernachlässigbar sind.

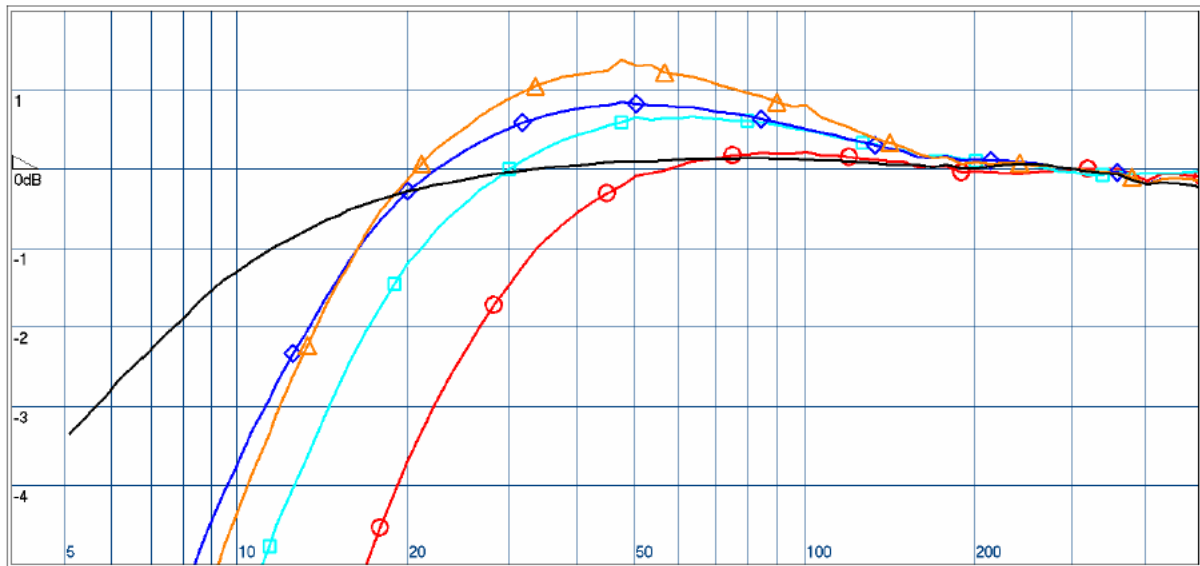


Bild 15: Ergebnisse der untersuchten Mikrofone: Schwarz (MB 550), Rot (KE4-211, Nr1L), Hellblau (KE4-211, Nr2K), Blau (MCE 2000), Orange (Panasonic WM 60)

### Zusammenfassung

Mit der beschriebenen Druckkammer und ARTA lassen sich sehr einfach Mikrofone bis ca. 500 Hz kalibrieren. Optimal ist, die Messanordnung einmal mit einem Referenzmikrofon zu vermessen und im Beipack der Druckkammer das STEPS- oder ARTA-Kalibrierungsfile mitzuliefern. Eine Referenzmessung sollte bei der intensiven Kommunikation zwischen Lautsprecherherstellern oder sonstigen Akustikprofis und DIY-lern heute problemlos zu organisieren sein, aber selbst ohne Referenzmikrofon sollte eine Kalibrierung auf Basis einer Simulation möglich sein, wie obiges Ergebnis zeigt.

Die Kosten für den Bau - und im Falle eines Ringversuches auch für den Transport - der kleinen Messkammer stellen keinen ernstzunehmenden Grund dar, sich diesem kleinen Experiment zu verweigern.

HWE / IM  
11.06.2006

### Literatur

[1] Alex Khenkin, How Earthworks Measures Microphones

### Anhang 1

#### Anpassung der Messkammer an eigene Bedürfnisse

Wenn das Materiallager die oben gelisteten Komponenten nicht hergeben, dann kann mittels einer AJ-Horn-Simulation und etwas Nacharbeit die Messkammer an das vorhandene Material angepasst werden. Dazu wird zunächst mit den TSP-Parametern des Lautsprechers und den Abmessungen der Messkammer der Verlauf von Amplitude, Impedanz und Membranauslenkung in AJ-Horn ermittelt (siehe Bild A1).

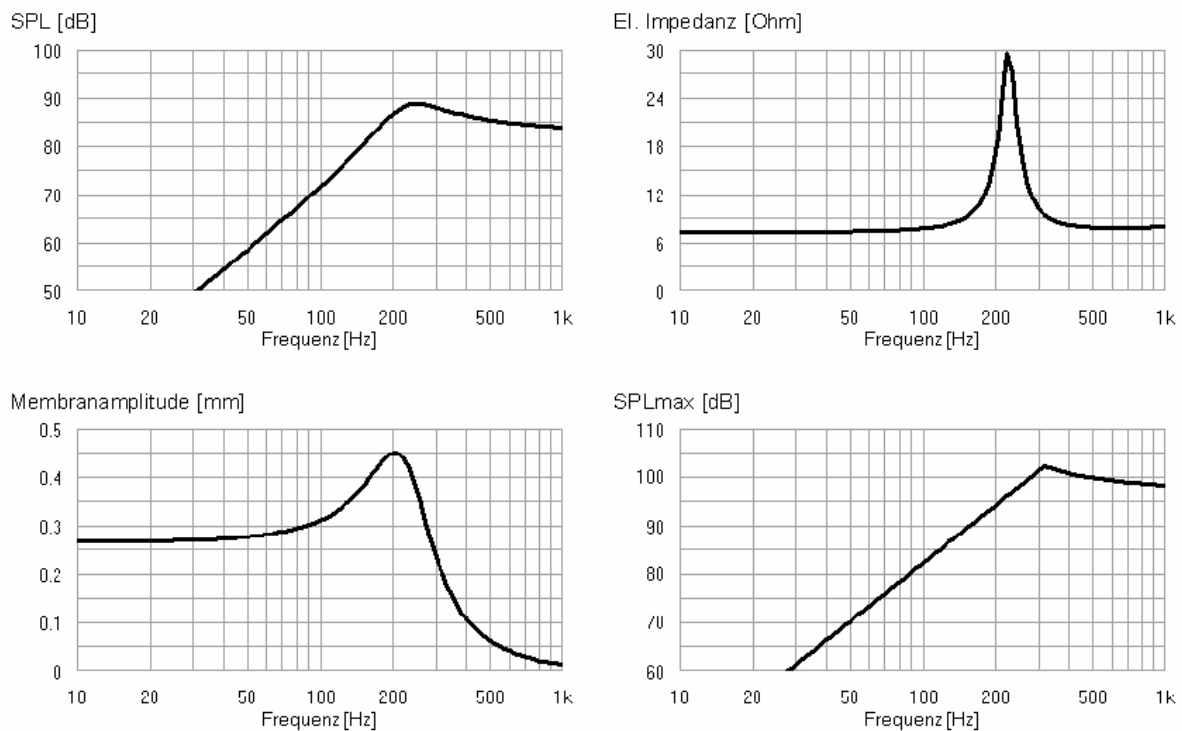


Bild A1.1: AJ-Horn Simulationsergebnisse (1m / 2,83V)

Nach der Simulation werden die Daten als ASCII exportiert. Dabei hat die Datentabelle folgenden Aufbau:

Frequenz	SPL	Impedanz	Membranamplitude X	SPL max	P max	Kontur	Ak. Imp.
10.00	30.11	7.262	2.67E-01	42.10	17.450	-0.010	0.005

Für die weiteren Berechnungen sind lediglich Frequenz und Membranamplitude von Interesse. Mit den auf Seite 1 angegebenen Formeln können wir nun den Schalldruck innerhalb der Messkammer für jede beliebige Eingangsspannung berechnen.

F	Membranamplitude X	$V_D$	$P_K$	SPL
10,00	0,26700	0,00000083	304,00	143,64

$$V_D = X \cdot S_D ; \text{SPL} = 20 \log (P_K / P_0) ; P_0 = 2E-5.$$

### Anhang 2

#### Verzerrungsmessungen an Mikrofonen

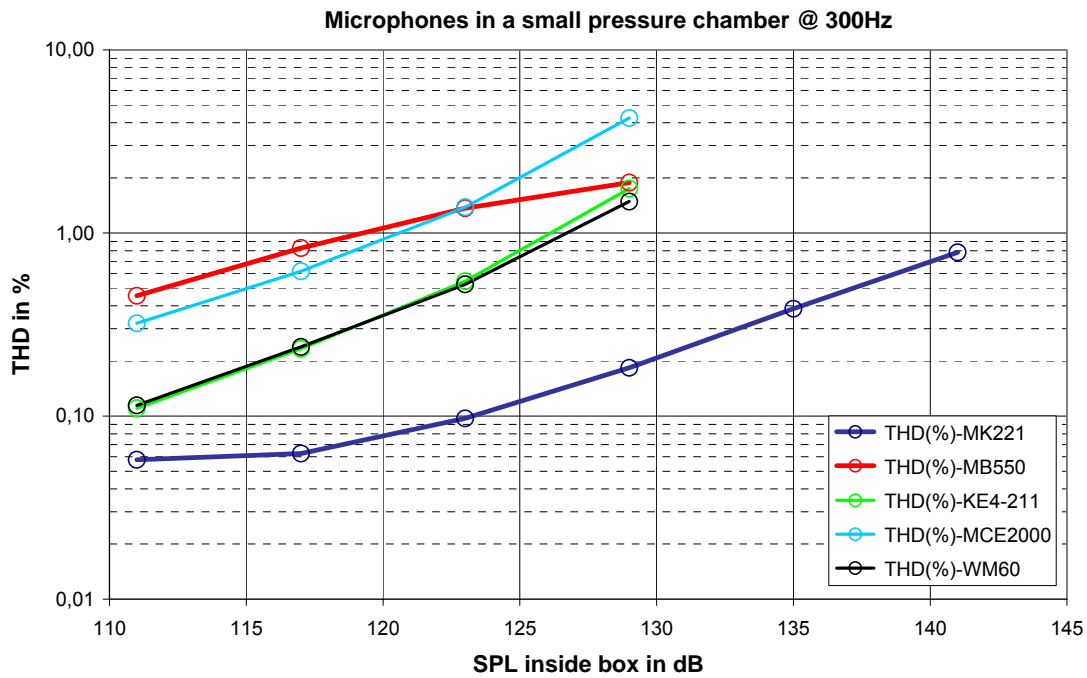


Bild A2.1: Relativer Vergleich des Klirrverhaltens von Mikrofonen bei 300 Hz