



## Mikrofonkalibrierung für Messungen in Wohnräumen

definiteAudio GmbH  
Peter-Vischer-Str.2  
D-91056 Erlangen

Tel: 09131 – 758691  
Fax: 09131 – 758691  
e-Mail: [info@definiteAudio.de](mailto:info@definiteAudio.de)  
Web: <http://www.definiteAudio.de>  
Umsatzsteueridentnummer: DE254963094  
HRB 11085 Fürth

### Inhalt

Inhalt.....	2
Einleitung.....	3
Warenzeichen.....	3
Grundlagen.....	4
Vorbereitungen.....	5
Allgemeines.....	5
Messaufbau.....	5
Mikrofone.....	7
Eartworks M30BX.....	7
Behringer ECM8000.....	7
Rational Acoustics RTA-420.....	8
Mikrofon Vorverstärker.....	8
Messergebnisse der Mikrofone.....	9
Rohmessung.....	9
Geglätteter Amplitudenfrequenzgang.....	10
Zeitverhalten.....	11
Berechnung der Kalibrierfunktion.....	12
Ergebnisse der Kalibrierung.....	14
Geglätteter Amplitudenfrequenzgang.....	14
Zeitverhalten.....	16
Zusammenfassung.....	18

## Einleitung

Im folgenden Artikel wird ein Verfahren vorgestellt mit dem es möglich ist, Messmikrofone so zu kalibrieren, dass Sie zwischen 20Hz und 20kHz in Betrag und Phase einem sehr hochwertigen Referenzmikrofon (hier Earthworks M30BX) entsprechen.

Neu an dem vorgestellten Verfahren ist, dass es sich der Substitutionsmethode über den gesamten Frequenzbereich bedient. Durch die Verwendung eines logarithmischen Sinus-Sweep als Messsignal lassen reproduzierbare Ergebnisse erreichen. Für die Kalibrierung wird deshalb kein reflektionsarmer Messraum benötigt, sondern lediglich ein ganz „normaler“ HiFi-tauglicher Hörraum. Besondere Ansprüche an eine Außendämpfung des Hörraums oder an andere akustische Eigenschaften werden wegen des verwendeten Messverfahrens nicht gestellt. Als einzige Anforderung wird eine Musikwiedergabeanlage benötigt, die im Hörraum über den gesamten Audiofrequenzbereich hinreichenden Schalldruck erzeugen kann.

In den folgenden Betrachtungen wird als Referenzmikrofon ein **Earthworks M30BX** eingesetzt, und die beiden Mikrofone **Behringer ECM8000** und **Rational Acoustics RTA-420** damit verglichen.

Für beide Mikrofone wird je eine Korrekturfunktion (Impulsantwort, also Amplitude und Phase) berechnet.

Unter Verwendung der Korrekturfunktionen werden die Messergebnisse der beiden Mikrofone mit dem Referenzmikrofon verglichen und bewertet.

Im Ergebnis zeigt sich, dass sich mit dem vorgestellten Verfahren nahezu beliebige Mikrofone in Amplitude und Phase so kalibrieren lassen, dass sie zwischen 20Hz und 20kHz einem Referenzmikrofon entsprechen.

## Warenzeichen

**AudioVolver**<sup>®</sup> ist ein eingetragenes Warenzeichen der definiteAudio GmbH.

**((acourate)))**<sup>®</sup> ist ein eingetragenes Warenzeichen von Dr. Ulrich Brüggemann, AudioVero.

## Grundlagen

### Wie kann man beliebige Mikrofone zum Messen in Hörräumen und zum Einmessen von Audioanlagen einfach kalibrieren?

Zur Einmessung eines AudioVolvers in einem Hörraum muss eine akustische Messung vorgenommen werden und zwar genau am Hörplatz. Anhand dieser Messung wird anschließend mit der **((acourate)))**<sup>®</sup>-AV Audio Toolbox der Optimizer für den AudioVolver berechnet. Nachdem bei der Berechnung des Optimizers eine Linearisierung des Amplitudenfrequenzgangs und eine Optimierung der Sprungantwort erfolgen, werden besonders hohe Anforderungen bezüglich Amplituden- und Phasenlinearität an das verwendete Messmikrofon gestellt, denn jede Amplituden- und Phasenabweichung des Mikrofons hat direkten Einfluss auf den berechneten Optimizer.

Die hohen Anforderungen werden z.B. durch das Earthworks M30BX erfüllt (ca. 1000€), das in Kombination mit dem AudioVolver hervorragende akustische Ergebnisse liefert. Nicht erfüllt werden sie durch preiswerte Mikrofone wie z.B. das Behringer ECM8000 (ca. 60€). Optimizer die mit Hilfe dieses Mikrofons erzeugt worden sind, klingen weit schlechter als die, bei denen die Messung mit einem M30BX erfolgte.

Ziel ist es eine Methode zu finden, mit der preiswerte Mikrofone so kalibriert werden können, dass sie als kostengünstiger Ersatz des M30BX benutzt werden können.

Messmikrofone wie z.B. das M30BX werden von Earthworks oberhalb von 500Hz mit Hilfe der Substitutionsmethode gemessen. Dazu wird die Messung des Testkandidaten vor einer quasi unendlichen Schallwand im schalltoten Raum mit der Messung eines Referenzmikrofons verglichen. Die Differenz wird festgehalten und in Form eines Frequenzgangschriebs zusammen mit dem Mikrofon ausgeliefert.

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.

Diese Messmethode hat den Nachteil, dass zum einen ein reflektionsarmer Messraum benötigt wird und dass zum andere wegen der Aufteilung der Messung zwei Messungen passend aneinander gesetzt werden müssen. Weiterhin stellt das Verfahren keine Phaseninformation zur Verfügung.

Eine, für den AudioVolver geeignete Mikrofon Kalibrierfunktion, besteht dagegen aus einer Impulsantwort (64k Abtastwerte) und beinhaltet damit automatisch Informationen über den kompletten Amplitudenfrequenzgang und den zugehörigen Phasengang des Mikrofons.

Wir zeigen im Folgenden, wie man eine solche Kalibrierfunktion mit Hilfe der Substitutionsmethode allein durch Messung in einem nicht reflexionsarmen Hörraum ermitteln kann. Bei dem Verfahren wird kein Wert auf den absoluten Schalldruck gelegt, sondern nur auf die relative Abweichung, die das untersuchte Mikrofon im Vergleich zu einem Referenzmikrofon aufweist.

## Vorbereitungen

### Allgemeines

Das Einmessen von AudioVolvern erfolgt immer am Hörplatz. Demzufolge ist entscheidend, dass beim Vergleich und bei der Kalibrierung von Mikrofonen, die Vergleichsmessungen auch am Hörplatz durchgeführt werden.

Messungen in einem „normalen“ Hörraum sind wegen der auftretenden Reflexionen und Moden extrem abhängig von der Position des Mikrofons im Hörraum, von der Position der Lautsprecher und auch von Einrichtungsgegenständen und Personen im Raum.

Um eine erfolgreiche Substitutionsmessung durchführen zu können müssen deshalb folgende Randbedingungen eingehalten werden:

- Die Mikrofone müssen an exakt derselben Position im Raum angebracht werden.
- Zwischen den Vergleichsmessungen gibt es keinerlei Veränderung am Raum.
- Das Messsignal ist analytisch und energiereich, damit reproduzierbare Messergebnisse entstehen. MLS scheidet deshalb aus.
- Die Lautsprecher decken den gesamten Audio Frequenzbereich ab.

### Messaufbau

Zur Verfügung steht der Hörraum der Firma definiteAudio, der als „typisches“ Wohnzimmer ausgeführt ist.



Abbildung 1: Hörplatz der Firma definiteAudio

Das Wiedergabesystem ist mit einem AudioVolver II in Amplitude und Phase linearisiert und deckt den gesamten Audio Frequenzbereich ab. Moden und sonstige Nichtlinearitäten sind durch den AudioVolver weitestgehend eingeebnet, so dass sich am Hörplatz unter Verwendung des M30Bx ein „relativ“ linearer Amplitudenfrequenzgang und eine „relativ“ perfekte Sprungantwort ergeben.

Das Wort „relativ“ wurde benutzt, da in einem Hörraum durch Raumreflexionen und Moden immer Nichtlinearitäten auftreten.

Alle Messungen erfolgen über das Meßsystem des AudioVolver II. Gemessen wird mit Hilfe eines logarithmischen Sinus-Sweep von 60s Länge im Bereich von 10Hz bis 22kHz. Aus dem gemessenen Signal wird im AudioVolver mittels Faltung mit der zuvor berechneten Inversen des logarithmischen Sinus-Sweep die Impulsantwort errechnet.

Das verwendete Messverfahren ist wenig anfällig für Umgebungseinflüsse und hat einen sehr hohen Rauschabstand. Dieser kann durch die zeitliche Verlängerung des Sinus-Sweeps praktisch beliebig vergrößert werden und liegt selbst in lauten Umgebungen mit einem 45s langen Sinus-Sweep bei ca. 90dB.

Das analytische Messsignal, das auch hohe Energie im Bereich unter 500Hz aufweist, sichert (anders als eine Messung mit MLS-Rauschen) reproduzierbare Messergebnisse bei Verwendung desselben Mikrofons am gleichen Ort im Raum und ist unabdingbare Voraussetzung für eine Substitutionsmessung in einem „normalen“ Hörraum!

Um die zu untersuchenden Mikrofone an exakt derselben Stelle positionieren zu können (Substitutionsmethode) wurde an der Spitze des Hördreiecks ein Senklot an der Decke befestigt. Ein Knoten in seiner Schnur ist die Markierung, an der sich mittig die Mikrofonspitze befinden muss.



Abbildung 2: Senklot am Hörplatz mit dem Referenzmikrofon M30BX

**Mikrofone**

**Eartworks M30BX**

Dem M30BX liegt ein Frequenzgangschrieb des Herstellers bei, aus dem hervorgeht, dass es bis 20kHz um maximal  $\pm 1$ dB von der Ideallinie abweicht. Dieses Mikrofon wird für die durchgeführten Messungen als Referenz benutzt. Auf eine Korrektur seiner geringen Amplitudenunregelmäßigkeit wurde verzichtet

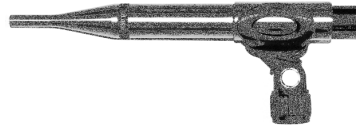


Abbildung 3: Das Messmikrofon M30BX von Earthworks

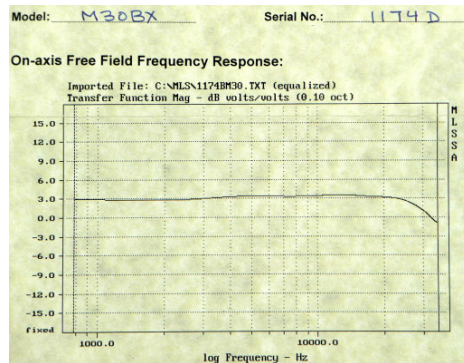


Abbildung 4: Frequenzgangschrieb des M30BX

**Behringer ECM8000**

Das wohl bekannteste und auch preiswerteste Messmikrofon kommt aus dem Hause Behringer.



Abbildung 5: Behringer ECM8000

**Rational Acoustics RTA-420**

Rational Acoustics ist ein in Deutschland relativ unbekannter amerikanischer Hersteller, der vor allem durch seine Test- und Messsoftware Smaart bekannt geworden ist.



Abbildung 6: Rational Acoustics RTA-420

**Mikrofon Vorverstärker**

Das M30BX verfügt über einen eigenen, batteriebetriebenen Vorverstärker und wurde für die Messung direkt mit dem AudioVolver II verbunden.

Die beiden anderen Mikrofone benötigen einen Vorverstärker der ihnen auch die Phantomspannung zuführt. Zum Einsatz kommt ein Vorverstärker aus dem Profifager, der LH-045 von Omnitronic.

Es wurde bewusst ein preiswerteres Gerät gewählt um feststellen zu können, ob selbst mit so einem Gerät gute Ergebnisse erzielt werden können.

Nachdem der Mikrofoneingang des AudioVolver II sehr empfindlich ist, wurde am Vorverstärker der Pegelregler auf Linksanschlag (Verstärkung  $+6$ dB) gestellt.



Abbildung 7: Omnitronic LH-045

## Messergebnisse der Mikrofone

### Rohmessung

Die Rohmessungen (gemessene Impulsantworten) sind dominiert von den Reflexionen im Raum, die sich als schmale tiefe Einbrüche im Amplitudenfrequenzgang darstellen. Aufgrund der exakten Positionierung der Mikrofone sind die rohen Amplitudenfrequenzgänge erfreulich deckungsgleich. Insbesondere die Auslöschungen durch die Reflexionen treten an genau den gleichen Frequenzen auf.

Eine exakte Aussage über die Abweichung zwischen den Mikrofonen ist anhand der Rohmessungen noch nicht möglich, es zeigen sich aber erste Trends:

So ist das ECM8000 (rot) oberhalb von 8kHz deutlich lauter als das M30BX (blau). Auch das RTA-420 (grün) zeigt eine solche Überhöhung, allerdings erst bei einer höheren Frequenz. Unterhalb von 25Hz ist das ECM8000 weiter vom M30BX entfernt als das RTA-420. Ein ganz ähnliches Bild ergibt sich für den rechten Kanal.

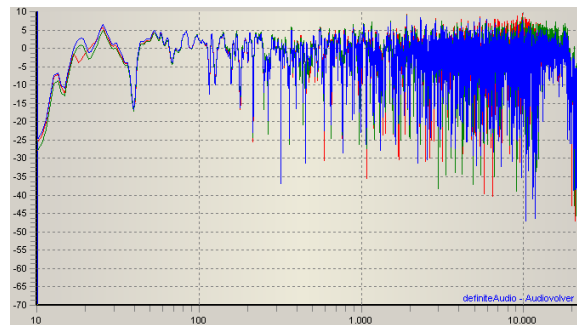


Abbildung 8: Rohmessung linker Kanal:  
ECM8000 = rot, RTA-420 = grün, M30BX blau.

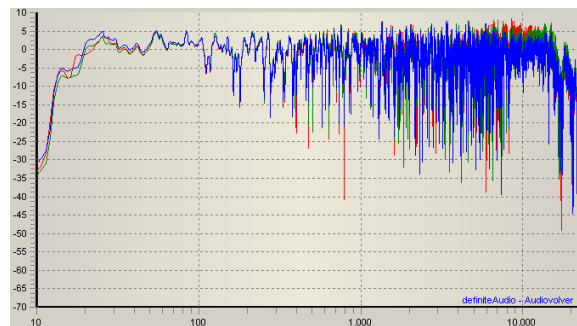


Abbildung 9: Rohmessung rechter Kanal:  
ECM8000 = rot, RTA-420 = grün, M30BX blau.

### Geglätteter Amplitudenfrequenzgang

Mit der ((acourate)))<sup>®</sup>-AV Audio Toolbox wird der Amplitudenfrequenzgang vor der Berechnung des Optimizers mit einem frequenzabhängigen Fenster geglättet. Der geglättete Amplitudenfrequenzgang liefert so den Input für alle folgenden Amplitudenberechnungen.

Um die Messmikrofone miteinander zu vergleichen wurden die geglätteten Amplitudenfrequenzgänge gegeneinander aufgetragen, denn sie sind die Basis für die späteren Optimizer.

Im Ergebnis zeigt sich dasselbe Verhalten, das sich bereits bei der Rohmessung abgezeichnet hatte, allerdings deutlich klarer.

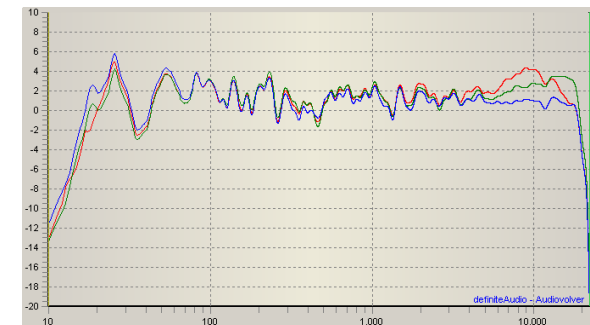


Abbildung 10: Geglätteter Amplitudenfrequenzgang linker Kanal:  
ECM8000 = rot, RTA-420 = grün, M30BX blau.

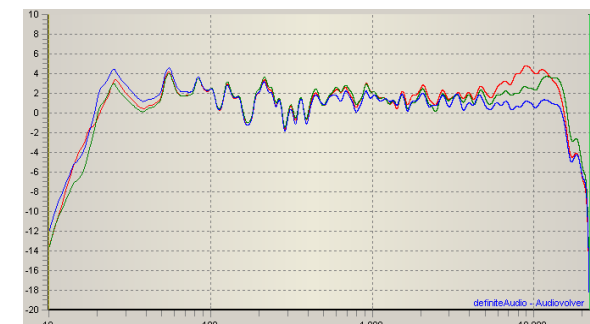


Abbildung 11: Geglätteter Amplitudenfrequenzgang rechter Kanal:  
ECM8000 = rot, RTA-420 = grün, M30BX blau.

**Zeitverhalten**

Ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Phasenlinearität ist die Untersuchung der Sprungantwort.

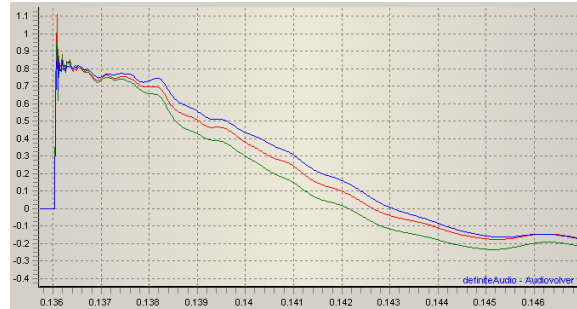


Abbildung 12: Sprungantwort linker Kanal 10ms:  
ECM8000 = rot, RTA-420 = grün, M30BX blau.

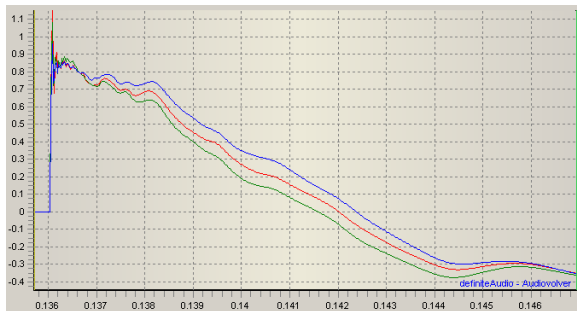


Abbildung 13: Sprungantwort rechter Kanal 10ms:  
ECM8000 = rot, RTA-420 = grün, M30BX blau.

Beim Vergleich der Sprungantworten der unkalibrierten Rohmessungen fallen starke Unterschiede gleich zu Beginn des Sprungs auf, was auf Phasenfehler im Hochtonbereich hindeutet.

Des Weiteren beginnen sich die Sprünge nach der ersten ms voneinander zu trennen, ebenfalls ein Hinweis auf Phasenfehler.

**Berechnung der Kalibrierfunktion**

Aus den Rohmessungen der Mikrofone für den linken und den rechten Kanal wurden mit einem speziellen, von uns entwickelten mathematischen Verfahren, die Kalibrierfunktionen für die Mikrofone in Bezug auf das M30BX ermittelt. Das M30BX wurde dabei als „Referenz“ mit linearem Amplitudenfrequenzgang und glatter Phase definiert.

Das genaue Vorgehen, wie aus den Rohmessungen der Mikrofone die Kalibrierfunktionen (Impulsantworten) gewonnen werden, ist geistiges Eigentum der Firma definiteAudio GmbH und wird daher nicht veröffentlicht.

Der Amplitudenfrequenzgang der Mikrofone ist im Bereich von  $\pm 7\text{dB}$  aufgetragen, der Phasenfrequenzgang im Bereich von  $\pm \text{PI}/4$  ( $\pm 45^\circ$ ).

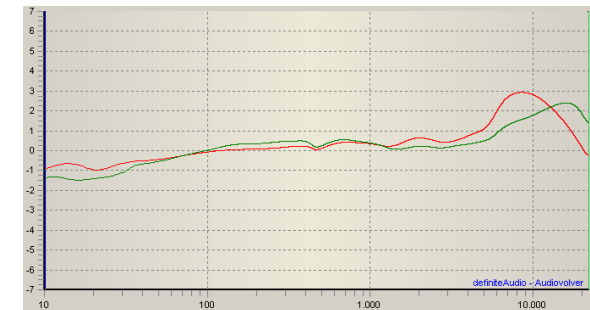


Abbildung 14: Amplitudenfrequenzgang bezogen auf M30BX Referenz:  
ECM8000 = rot, RTA-420 = grün.

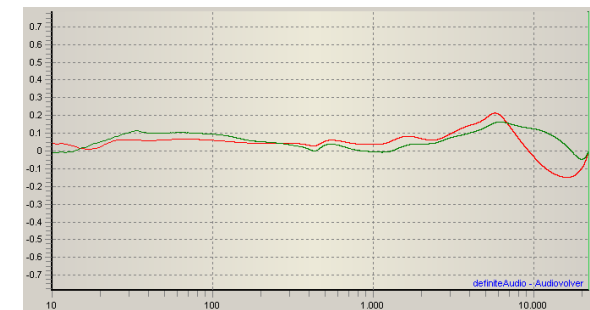


Abbildung 15: Phasenfrequenzgang bezogen auf M30BX Referenz:  
ECM8000 = rot, RTA-420 = grün.

Deutlich ist bei beiden Mikrofonen eine Amplitudenüberhöhung im Hochtonbereich festzustellen, wobei das Maximum der Überhöhung beim RTA-420 mit 16kHz eine Oktave höher liegt als beim ECM8000 mit 8kHz. Dabei ist es mit +2,5dB etwas weniger stark ausgeprägt ist als beim ECM8000.

Nachdem auch der Phasengang deutlich linearer ist als beim ECM8000 kann man das RTA-420 als das „bessere“ Mikrofon bezeichnen.

Die dargestellten Kurven basieren auf der berechneten Kalibrierfunktion (Impulsantwort), die direkt als Mikrofon-Kalibrierkurve in der (((acourate)))<sup>®</sup>-AV Audio Toolbox verwendet werden kann.

## Ergebnisse der Kalibrierung

### Geglätteter Amplitudenfrequenzgang

Unter Benutzung der berechneten Kalibrierfunktionen wurden die Glättungen mit der (((acourate)))<sup>®</sup>-AV Audio Toolbox erneut durchgeführt.

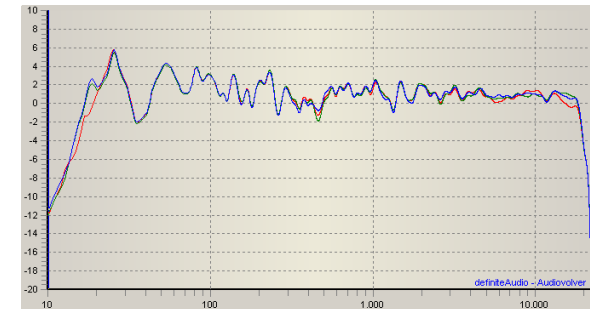


Abbildung 16: Geglätteter Amplitudenfrequenzgang linker Kanal mit Kalibrierung: ECM8000 = rot, RTA-420 = grün, M30BX blau.

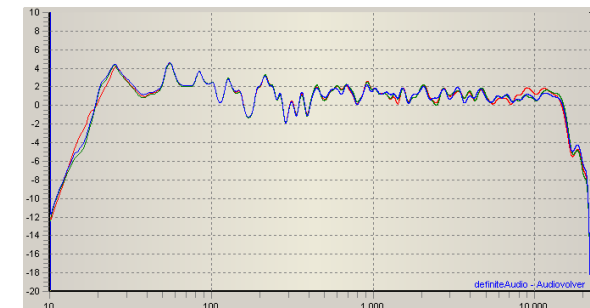


Abbildung 17: Geglätteter Amplitudenfrequenzgang rechter Kanal mit Kalibrierung: ECM8000 = rot, RTA-420 = grün, M30BX blau.

Die Nutzung einer Kalibrierfunktion wird dabei von der (((acourate)))<sup>®</sup>-AV Audio Toolbox durch eine Eingabemöglichkeit für eine Impulsantwort-Datei im Macro1 unterstützt.

Das Ergebnis (Abbildung 16 und 17) zeigt die Wirksamkeit der Kalibrierung im Vergleich zu Abbildung 10 und 11. Die Überhöhungen im Hochtonbereich sind verschwunden und auch der Tieftonbereich ist weitestgehend identisch mit dem Referenzmikrofon.

Es zeigt sich ferner, dass die Kalibrierung des RTA-420 besser zu gelingen scheint als die des ECM8000, denn die blaue und die grüne Kurve sind über weite Strecken deckungsgleich, wohingegen die rote Kurve einige Ausreißer besitzt.

Um das genauer darzustellen wurden die Amplitudenunterschiede berechnet und als Fehlerkurven (0,5dB pro Teilung!) visualisiert.

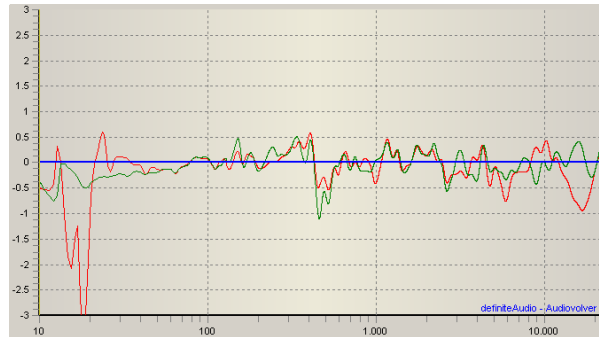


Abbildung 18: Differenzen der Amplitudenfrequenzgänge in Bezug auf M30BX linker Kanal: ECM8000 = rot, RTA-420 = grün, M30BX blau.

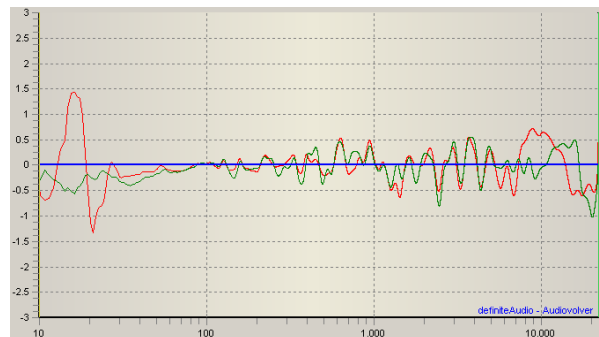


Abbildung 19: Differenzen der Amplitudenfrequenzgänge in Bezug auf M30BX rechter Kanal: ECM8000 = rot, RTA-420 = grün, M30BX blau.

Es ist gut sichtbar, dass die Fehlerkurve des RTA-420 mit Kalibrierung (bis auf wenige Ausreißer) in einem Bereich von  $\pm 0,5\text{dB}$  um die Nulllinie schwankt und sich damit praktisch an das Messergebnis des M30BX für den linken und rechten Kanal komplett angeglichen hat.

Das ECM8000 kann sich trotz Kalibrierung vor allem am unteren und am oberen Ende des Frequenzbereichs nicht in diesem schmalen Band halten, zeigt für seinen geringen Preis nach der Kalibrierung aber durchaus ein sehr akzeptables Verhalten.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass  $\pm 0,5\text{dB}$  ein Bereich ist, der die Grenze der Messgenauigkeit markiert. Daher können Schwankungen in diesem Bereich nicht mehr als tatsächliche „Fehler“ betrachtet werden.

### Zeitverhalten

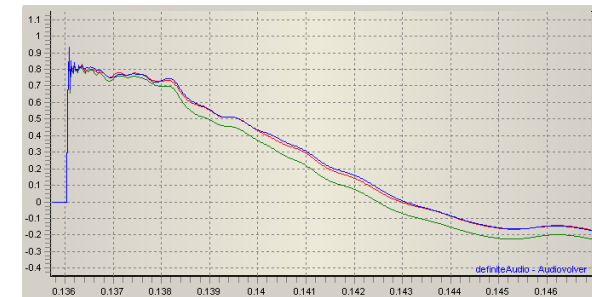


Abbildung 20: Sprungantwort linker Kanal 10ms kalibriert: ECM8000 = rot, RTA-420 = grün, M30BX blau.

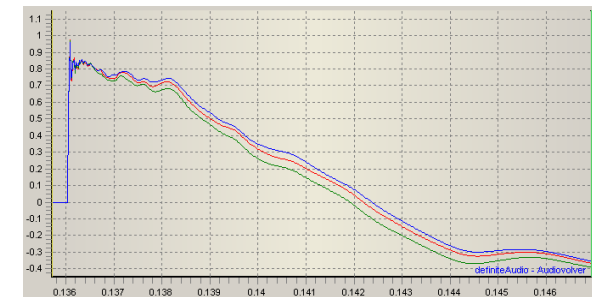


Abbildung 21: Sprungantwort rechter Kanal 10ms kalibriert: ECM8000 = rot, RTA-420 = grün, M30BX blau.



Im Gegensatz zu Abbildung 12 und 13 zeigen die Abbildungen 20 und 21 Sprungantworten, die sich weitestgehend einander angenähert haben. Die Sprungantworten aller Mikrofone sind nach der Kalibrierung in den kritischen ersten 2ms praktisch deckungsgleich, was in den gespreizten Darstellungen in Abbildung 22 und 23 deutlich zu sehen ist.

Nach zwei ms trennt sich das Signal des RTA-420 etwas ab, was auf ein minimales Phasenproblem zurückzuführen ist, das durch die Kalibrierung nicht vollständig beseitigt werden kann.

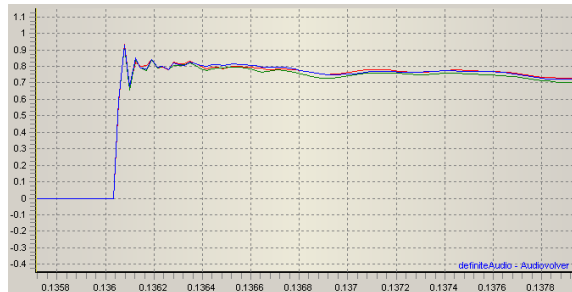


Abbildung 22: Sprungantwort linker Kanal 2ms kalibriert:  
ECM8000 = rot, RTA-420 = grün, M30BX blau.

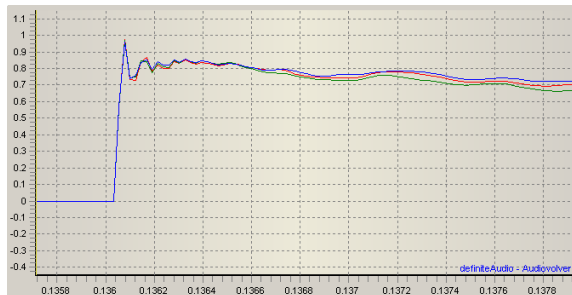


Abbildung 23: Sprungantwort rechter Kanal 2ms kalibriert:  
ECM8000 = rot, RTA-420 = grün, M30BX blau.

## Zusammenfassung

Bei dem hier vorgestellten Verfahren zur Kalibrierung von Messmikrofonen sind weder spezielle Messräume noch Druckkammerverfahren für die tiefen Frequenzen notwendig.

Im vorliegenden Beitrag wurde gezeigt, dass auch in einem „normalen“ Hörraum mittels Substitutionsverfahren die Kalibrierung von preiswerten Messmikrofonen gelingen kann und das über den gesamten Audioübertragungsbereich. Voraussetzung dafür ist ein analytisches Messsignal (hier ein logarithmischer Sinus-Sweep) das genügend Energie im unteren Frequenzbereich bereitstellt und das reproduzierbare Ergebnisse ermöglicht.

Obwohl das Verfahren zur Berechnung der Kalibrierfunktion hier nicht offengelegt wird, ist anhand der Messergebnisse klar, dass die Kalibrierung von preiswerten Messmikrofonen mittels Substitutionsverfahren in einem „normalen“ Hörraum tatsächlich hervorragend gelingt und das mit einer Genauigkeit, die allein durch die Genauigkeit des Messverfahrens begrenzt ist.

Entscheidend ist, dass es mit dem vorgestellten Verfahren erstmals möglich ist, extrem einfach, praktisch beliebige Messmikrofone (hier Behringer ECM8000 und Rational Acoustics RTA-420) auf ein gutes Messmikrofon hin zu kalibrieren. Diese Aussage bezieht sich auf den Audioübertragungsbereich (20Hz bis 20kHz) und setzt voraus, dass die zu kalibrierenden Mikrofone diesen noch mit nennenswertem Pegel abdecken.

Selbst ein preiswerter Mikrofonvorverstärker (hier Omnitronic LH-045) wird zusammen mit den Mikrofonen perfekt kalibriert und stört das erzielte Ergebnis in keiner Weise.

Damit können wir in Zukunft beliebige Messmikrofone unserer Kunden kalibrieren bzw. preiswerte kalibrierte Messmikrofone für unsere Kunden anbieten.