



Projektarbeit 3SWS des Studiengangs:
Elektrotechnik - Toningenieur

Untersuchung der nichtlinearen Verzerrungen von Kondensatormikrophonkapseln

durchgeführt von
Boris Müller 0030869, F750

16. Mai 2010

Stephan Peus
Georg Neumann GmbH Berlin, Ollenhauerstr. 98, D-13403 Berlin
PeusS@Neumann.com

Jürgen Breitlow
Georg Neumann GmbH Berlin, Ollenhauerstr. 98, D-13403 Berlin
Juergen.Breitlow@Neumann.com

Betreuer: Höldrich, Robert, o.Univ.-Prof. Mag. DI Dr.

Vorbemerkung

Zur geschlechtsneutralen Formulierung:

Diese Arbeit ist gleichermaßen für weibliche und männliche LeserInnen geschrieben. Da es bei den Themen einer wissenschaftlichen Arbeit aber nicht immer leicht ist einen durchgängigen Lesefluss zu bewahren, möchte ich diesen nicht weiter durch umständliche Formulierungen blockieren. Ich habe mich bemüht eine geschlechtsneutrale Schreibweise zu verwenden, möchte aber auf Doppelnennungen (z.B. Studentinnen und Studenten) oder Großbuchstaben innerhalb von Wörtern im Sinne einer besseren Lesbarkeit verzichten. Dies bedeutet keine Unterscheidung zwischen den Geschlechtern. Im Gegenteil hoffe ich, sowohl Leserinnen als auch Leser mit meiner Arbeit gleichermaßen anzusprechen.

Trotz sorgfältiger Recherche und Korrektur ist es nicht ausgeschlossen, das sich Fehler eingeschlichen haben. Sollte ein Fehler auftauchen, oder der Verdacht bestehen, eine Warenzeichen- oder Copyright Bestimmung könnte nicht beachtet worden sein, bitte ich um ein kurze Mail an mailings@borismueller.de, um die Fehler korrigieren zu können.

Danksagung

Danke an die Firma Neumann in Berlin, insbesondere an Jürgen Breitlow für die großartige Unterstützung bei dieser Arbeit!

Abstract

Inhalt des Projektes ist das Erstellen eines Messaufbaus und das Schreiben eines Programms zur Untersuchung der Kapselanteile an den nichtlinearen Verzerrungen eines Kondensatormikrophones.

Dabei wird das Prinzip der Differenztonmessung angewendet. Vor dem Programmieren wird eine Literaturrecherche durchgeführt, die unter anderem AES-Papers, Normen und Veröffentlichungen sowie interne Untersuchungen der Georg Neumann GmbH enthält. Das Messprogramm wird als PD – Patch (Pure Data) erstellt. Pure Data ist eine Objektorientierte Programmiersprache mit graphischer Oberfläche, die von Miller Puckette entworfen wurde und am IEM weiterentwickelt wird. Es wird gezeigt, dass die als Computermusiksystem gedachte Programmieroberfläche sich auch als Signalverarbeitungssoftware für Messzwecke verwenden lässt. Ansonsten werden für den Messaufbau eine handelsübliche Soundkarte und Studiomonitore auf einem speziellen Stativ im reflexionsarmen Raum verwendet.

Mit dem Aufbau werden Messungen an verschiedenen Mikrofonen durchgeführt, wobei das Augenmerk speziell auf die Unterschiede zwischen verschiedenen Mikrofontypen (dynamisch / Kondensator), verschiedenen Kapselgrößen (Großmembran / Kleinmembran) und verschiedenen Kapselbauformen (symmetrisch / asymmetrisch) gerichtet ist. Da das Klirrverhalten der Elektronik im Mikrofon bekannt ist, kann es meistens herausgerechnet werden.

Das Projekt wird bei der Firma Georg Neumann GmbH in Berlin durchgeführt.

Zur Erweiterung werden im Rahmen des Mikrophonvergleichs der Studierendenvertretung Toningenieur eine große Anzahl an Messungen von Mikrofonen anderer Hersteller als Neumann vermessen. Im Rahmen der Vorstellung des Studiengangs auf der Tonmeistertagung wird ein portabler Messaufbau konstruiert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Differenztonmessung	4
2.1	Normen	6
2.1.1	Klirrfaktor	7
2.2	DIN 45 403 Blatt 3 - Differenztonverfahren	8
2.2.1	Unterschiede zu IEC 268-3	9
2.3	Kapselanteile und andere Anteile am Klirrfaktor von Mikrofonen	10
2.4	Kapselaufbau und Klirrfaktor bei Mikrofonen	11
2.4.1	Druckempfänger:	12
2.4.2	Druckgradientenempfänger	13
2.4.3	Mikrophone mit symmetrischem Kapselaufbau und 2 Gegen- elektroden	16
3	Messaufbau	18
3.1	Reflexionsarmer Raum	19
3.2	Anordnung von Lautsprechern und Mikrofonen	20
3.3	Kalibrierung und Positionierung	21
3.4	Voraussetzungen zur Differenztonmessung	23
3.5	Messaufbau und verwendetes Equipment bei Neumann in Berlin	24
3.6	Messaufbau und verwendetes Equipment am IEM in Graz	26
3.7	Portabler Messaufbau auf der Tonmeistertagung	28
4	Messung mit PD	32
4.1	Aufbau	32
4.2	Eingangsmodul	33
4.3	Berechnung des k_2	33
4.4	Steuerung des Messablaufs	34
4.5	Lesen und Speichern von Daten	34
4.6	Ungenauigkeiten und Fehlerquellen	34
4.7	Frequenzliste für die Messung	35
4.8	Darstellung der Messdaten	35
4.9	Anmerkungen aus heutiger Sicht	36
4.10	Anwenderfreundlichere Implementation der Software bei Neumann	37
5	Kategorisierung von Mikrofonen anhand der frequenzabhängigen Klirrverläufe	39
5.1	dynamische Mikrophone	39
5.2	Bändchenmikrophone	41

5.3	Kondensatormikrophone	41
5.3.1	Kleinmembranmikrophone	42
5.3.2	Großmembranmikrophone	42
5.4	Mikrophone mit symmetrischem Aufbau der Kapsel	43
5.5	Auffällige Bereiche im Klirrfaktor und typische Einsatzgebiete von Mikro- phonen	43
5.5.1	Gesangsmikrophone oder universelle Solistenmikrophone	44
5.5.2	Gesangsmikrophone	44
5.5.3	Stützmikrophone	45
5.5.4	Messmikrophone	46
5.5.5	verzerrte Mikrophone	47
5.5.6	Hauptmikrophone	48
5.5.7	weitere Kategorisierung	49
6	Zusammenfassung und Ausblick	49
6.1	Ausblick	51
A	Literaturverzeichnis	52
B	Anhang	53
C	Weiterführende Literatur und Nachschlagwerke	53
D	Kurzbedienungsanleitung Differenztonmessung	54
E	Messdaten	56
E.1	Messungen bei Neumann in Berlin	56
E.2	Messungen beim Mikrophonvergleich in Graz	56
E.3	Portable Messungen bei der Tonmeistertagung in Hanover	100
F	CD	102

Abbildungsverzeichnis

1	Mittlerer Differenztonfaktor bei Studio-Kondensatormikrofonen mit Druckgradientenwandlern (gestrichelt: Eigenverzerrung des Schallmediums)	2
2	Aufbau für die Differenztonmessung	5
3	Frequenzen der Obertöne und zugehörige Ordnungszahl	7
4	Differenzfrequenzfaktor bei 107dB SPL, Kleinmembrandruckmikrophone KM63, KM83, KM130	13
5	Schematischer Aufbau und vereinfachte akustische Ersatzschaltung eines Druckgradientenwandlers mit Nierencharakteristik	14
6	Ersatzschaltung für tiefe Frequenzen und zugehöriger Frequenzgang	15
7	Schematischer Aufbau und Wirkungsweise eines symmetrisch aufgebauten Wandlers	17
8	Differenztonmesssetup wie es früher beispielsweise bei Sennheisser verwendet wurde	19
9	Neues Setup für die Differenztonmessung mit PD	19
10	Nahbesprechungseffekt eines Nierenmikrophons bei verschiedenen Abständen zum Lautsprecher (Referenz 1,2m) im Vergleich mit dem Frequenzgang im freien Schallfeld	21
11	Messaufbau im reflexionsarmen Raum bei Neumann	24
12	Messaufbau am IEM in Graz	27
13	Messgrenze des Differenztonfaktors am IEM	28
14	Messfehler durch die nötige Korrektur	28
15	Portabler Messaufbau auf der Tonmeistertagung	29
16	Messung eines ECM 8000 am Messestand auf der Tonmeistertagung	30
17	Messung eines ECM 8000 im IEM	30
18	Messung eines KMD 184 am Messestand auf der Tonmeistertagung	30
19	Messung eines KM184 bei Neumann	30
20	Nötiger Korrekturfrequenzgang für einen Lenco Lautsprecher (blau) und Differenztonfaktor des ECM8000 (rot), mit Matlab ausgewertet.	31
21	Oberfläche des Messpatches in PD	32
22	Auswertung von Frequenzgang und Differenzton eines Behringer B5 mit Matlab	36
23	Oberfläche der Messsoftware bei Neumann	38
24	Dynamisches Großmembranmikrophon RE20 von Elektro Voice mit sehr ungewöhnlicher Ausführung des Laufzeitgliedes	40
25	Microtech Gefell UM92 als Kugel	42
26	Microtech Gefell UM92 als Niere	42
27	Differenztonfaktor und Frequenzgang des Neumann TLM 103	44
28	Differenztonfaktor und Frequenzgang des Brauner Phantom C	45

29	Der Differenztonfaktor des DPA 4091 Kleinstmembran-Kugel-Mikrophons ist so gering, dass er im gesamten Frequenzbereich im Eigenrauschen versinkt	47
30	Differenztonfaktor des DPA 4015	48
31	Differenztonfaktor des Behringer B5 mit Kugel- und Nierenkapsel (rechts)	50

Tabellenverzeichnis

1	Gegenseitige Abweichungen der k_2 und d_2 Werte (nach Notizen von Boré)	11
---	---	----

1 Einleitung

Der Dynamikbereich von Mikrofonen ist ein wichtiges Kriterium für die Qualität einer Aufnahme. Im Rahmen der Umwandlung von akustischen in elektrische Signale treten hier die ersten Verluste bei der Aufnahme auf. Er wird einerseits durch das Eigenrauschen und andererseits durch die Aussteuerbarkeit der Mikrophonelektronik begrenzt. Konnten beide Faktoren bei der Analogaufzeichnung noch weitgehend vernachlässigt werden, ermöglicht die heutige Digitaltechnik einen deutlich höheren Dynamikumfang.

Somit sind auch die Anforderungen an die Dynamikreserven der Mikrophone gestiegen. Bei modernen Mikrofonen konnten diese durch hochwertige Schaltungen so weit gesteigert werden, dass sie heutzutage nur noch sehr selten ein Problem darstellen. Dennoch werden die Grenzen der Mikrophondynamik immer noch durch die elektronischen Baugruppen definiert. Ausser bei dynamischen Mikrofonen, wo das Eigenrauschen durch den Kupferwiderstand der Tauchspule bestimmt wird, und durch die meist geringere Empfindlichkeit und den höheren Ausgangswiderstand der Vorverstärker die entscheidende Rauschquelle darstellt, hat die eigentliche Kapsel kaum eine begrenzende Wirkung auf den Dynamikumfang. Das Eigenrauschen in Kondensatorkapseln durch die Molekularbewegung bewegt sich im Rahmen deutlich unterhalb 5dB(A), gleichzeitig verkräften die Kapseln problemlos Schalldrücke über 130 dB, ohne an ihre mechanischen Begrenzungen zu stoßen. Ein Dynamikbereich über 130 dB ist somit konstruktiv kein Problem. Die Elektronik begrenzt derzeit den Dynamikumfang bei modernen Mikrofonen auf unter 120dB. Hierbei zählt die Dynamik, die ohne schaltbare Vordämpfung erreichbar ist. Dabei wird die physikalische Rauschgrenze von einigen guten Großmembranmikrofonen schon fast erreicht, oberhalb eines gewissen Eingangspiegels steigen die Verzerrungen der Mikrophonelektronik jedoch schlagartig an. Die Norm bestimmt den Wert als maximale Aussteuerbarkeit, bei welchem der Klirrfaktor 0,5% erreicht. Dies ist der Dynamikbereich der in den Datenblättern angegeben wird. Dabei sind die Werte mit Vorsicht zu betrachten, da einige Hersteller andere Klirrfaktoren (0,3 %, 1%) verwenden oder die höhere Aussteuerbarkeit, die durch eine Vordämpfung erreicht werden kann zum Dynamikbereich hinzuaddieren.

In jedem Fall werden die Werte durch einfaches elektrisches Vermessen der Elektronik ermittelt.

Allerdings ist es nicht so, dass die Akustischen Baugruppen des Mikrophons keine Verzerrungen hervorrufen würden. Vor allem bei höheren Schallpegeln werden schon in der Mikrofonkapsel durchaus relevante Verzerrungen erzeugt, die jedoch stark vom Kapseltyp und der Frequenz abhängig sind. Diese Verzerrungen liegen durchaus im hörbaren Bereich. Dabei können sie je nach Stärke und Art positiv oder negativ bewertet werden. Mit diesen Verzerrungen, insbesondere mit der Messung derselben wird sich die vorliegende Arbeit befassen.

Die zugrunde liegenden Messmethoden wurden dabei schon 2006 programmiert,

und das Projekt wurde auch im Rahmen des „Student Science Spot“ auf der AES Convention in Wien präsentiert. Aufgrund eines Festplattendefekts gingen jedoch sämtliche schriftlichen Arbeiten verloren. Die Messsoftware und die Messergebnisse lagen zum Glück noch auf dem Messrechner vor. Aufgrund anderer Prioritäten konnte diese Arbeit jedoch erst 2010 verfasst werden. Dies erklärt, dass einige heute erhältliche Mikrophone noch nicht berücksichtigt werden konnten, und dass die Programmierung des PD-Patches nicht mehr ganz dem Stil der Zeit entspricht. Aufgrund der zahlreichen vorhanden Messungen und der damals ausführlichen Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse wurde jedoch davon abgesehen, Änderungen an der Software vorzunehmen. Soweit ich die Mikrophonentwicklung beobachtet habe, ist auch nicht von neuen Kapseltechnologien auszugehen, die die Ergebnisse maßgeblich beeinflussen.

Den Klirrfaktor der Mikrophonkapsel findet man noch heute in keinem Mikrophondatenblatt. Somit ist davon auszugehen, daß die Ergebnisse immer noch als aktuell betrachtet werden können.

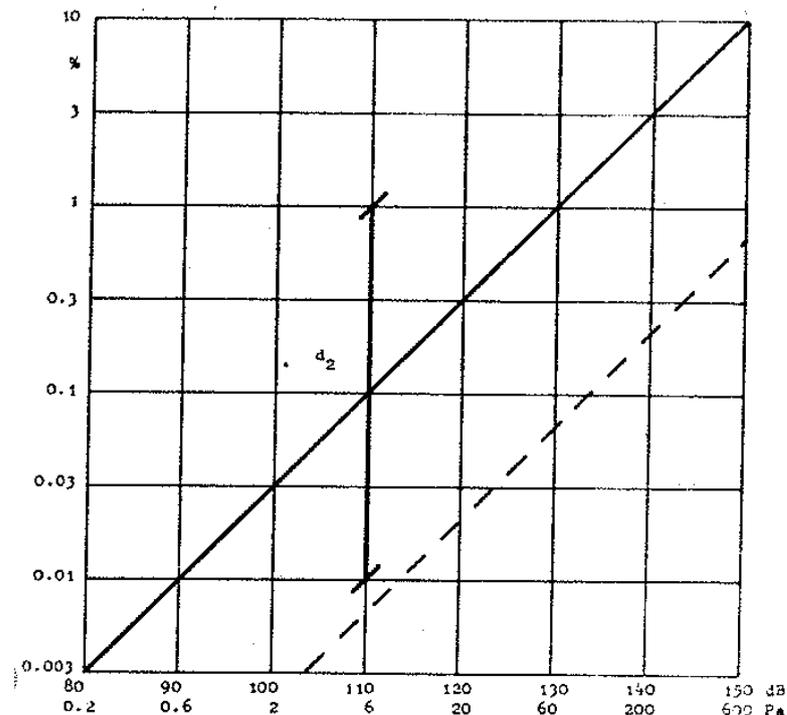


Abbildung 1: Mittlerer Differenztonfaktor bei Studio-Kondensatormikrofonen mit Druckgradientenwandlern (gestrichelt: Eigenverzerrung des Schallmediums)

(4)

Aufgrund der Begrenzung auf ein 3 stündiges Projekt konnte leider nicht auf die Auswirkungen des Klirrfaktors auf die Wahrnehmung eingegangen werden. Allerdings

wurden auffällige Ähnlichkeiten in der Frequenzabhängigkeit der Verzerrung von verschiedenen Mikrofonen festgestellt, die zumindest teilweise mit dem typischen Einsatzbereich dieser Mikrofone in Verbindung gebracht werden können. Darauf wird in Kapitel 5 kurz eingegangen. Untersuchungen zur Hörbarkeit von Verzerrungen findet man beispielsweise in (9), (10) und (14). Dabei müssen auch die Verzerrung des Schallmediums, also der Luft und des menschlichen Gehörs in Betracht gezogen werden die sich allein schon im Prozent Bereich bewegen.

Hibbing (4) hat in seiner Graphik den Streubereich der Verzerrungen von Kondensatormikrofonen sowie die Eigenverzerrung des Schallmediums angegeben. Er geht dabei von einer mittleren Verzerrung von 0,1% für die Mikrofonkapsel aus, was mir fast etwas zu gering erscheint. Allerdings gibt er mit 40 dB auch einen recht großen Streubereich an, den viele Mikrofone jedoch in Abhängigkeit der Frequenz auch ausnutzen.

Die Verwendung einer Standardsoundkarte mit integriertem Mikrofonvorverstärker, und von gewöhnlichen Studiomonitoren oder Aktivlautsprechern, sowie die Programmierung der Messsoftware auf der Basis von frei verfügbaren Programmierumgebungen erleichtert den Aufwand bei der Implementierung. Zu beachten bleiben der Störabstand durch den Umgebungspegel (und teilweise auch durch die Qualität der Eingänge), sowie die maximale Aussteuerbarkeit der Lautsprecher.

2 Differenztonmessung

In der Regel wird heutzutage zur Angabe des Dynamikbereichs nur die Mikrophonelektronik vermessen, da die Kapselanteile der Verzerrung nicht in den Grenzschalldruck eingehen. Moderne Mikrophonschaltungen mit Transistoren und ohne Übertrager sind weitgehend linear, die Verzerrungen steigen sprunghaft am Grenzschalldruck.

Die direkte Messung von Kapselverzerrungen ist ohnehin nur für reine Druckempfänger in speziellen, kleinen Druckkammern und für wenige Frequenzen möglich. Man benötigt bei den kleinen Verzerrungen von Druckempfängern sehr hohe Schalldrücke zur Messung, wobei keine Verzerrungen durch den Erreger eingehen dürfen. Dies ist mit gewöhnlichen Lautsprechern nicht möglich. (Vergleiche (8))

Auch können keine Druckgradientenempfänger vermessen werden, da die Druckkammer abgeschlossen sein muss, was den Einsatz von Mikrofonen mit rückseitigen Schalleinlässen nicht zulässt. Diese Technik kommt somit höchstens für die Messung hochwertiger Messmikrophone zum Einsatz.

Eine direkte Messung im freien Schallfeld ist nicht möglich, da jeder Lautsprecher bei den hierfür nötigen Schalldruckpegeln deutlich höhere Verzerrungen erzeugt, als typische Studiomikrophone (vergl. (15)). Deshalb wird das Verfahren der Differenztonmessung angewandt!

Hierbei werden 2 Lautsprecher verwendet, die je einen Sinus-Ton mit dem gewünschten Pegel wiedergeben. Dabei unterscheiden sich beide Lautsprecher um einen bekannten Betrag Δf in der Frequenz, aber nicht im Pegel. Entstehen bei der Schallaufnahme Verzerrungen, so äussern sich diese als Summen- und Differenztöne. Da jeder Lautsprecher nur eine einzelne Frequenz wiedergibt, können diese nicht in den Membranen und Antriebssystemen der Lautsprecher entstehen. Der gemessene Anteil des Differenztons bei der Frequenz Δf kann also nur im Mikrophon selbst entstanden sein, auf dessen Membran die Schwingungen zusammen treffen.

Für die Messung können natürlich nicht nur einzelne Frequenzen verwendet werden, sondern auch Sweeps. In der vorliegenden Arbeit wird mit „diskreten Sweeps“ gearbeitet, wobei eine große Anzahl diskreter Frequenzen, die logarithmisch verteilt sind nacheinander „abgefahren“ wird. (Dadurch entstehen Vorteile bei der Reproduzierbarkeit und bei der Vergleichbarkeit der Datensätze mit anderen Messungen bei Neumann, die die selbe Frequenzliste verwenden. Vor allem können aber durch geschicktes Wählen der Messzeit pro Frequenz Störungen unterdrückt werden.) Der Frequenzabstand der beiden Sweeps muss dabei konstant gehalten werden. Somit bleibt der erzeugte Differenzton immer auf der gleichen Frequenz und es wird lediglich ein schmalbandiges Filter mit der Frequenz Δf benötigt, um seinen Anteil zu bestimmen. In der Regel wird ein Abstand von 80Hz verwendet.

Das Verfahren wird in IEC 60 268-4 und DIN 45 403 beschrieben. Den prinzipiellen Aufbau erkennt man schön in der Abbildung von Peus:

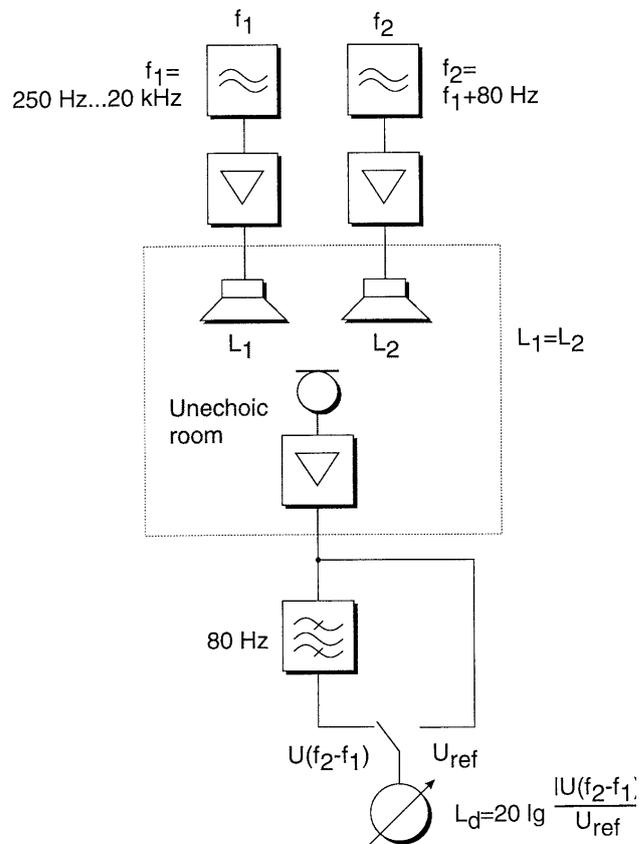


Abbildung 2: Aufbau für die Differenztonmessung
(15)

Etwas unklar ist, welche Frequenz als Messfrequenz gelten soll, da ja in Wirklichkeit zwei Frequenzen an der Messung beteiligt sind. So verwendet Hibbing in (4) den höheren der beiden Töne als Messfrequenz. Die Norm schlägt den Mittelwert vor. In den Programmen bei Neumann und in meinem Messprogramm wird der untere der beiden Töne als Referenz verwendet. Im Endeffekt ist die Auswirkung jedoch sehr gering, da die Verzerrungen und die Unterschiede erst im kHz-Bereich relevant hervortreten, und die Messung unterhalb von etwa 250 Hz ohnehin keine nutzbaren Ergebnisse erzeugt. In diesem Bereich fällt eine Verschiebung der x-Achse um maximal 80 Hz nicht wirklich ins Gewicht.

Der Messpegel wird meist mit 110 dB am Mikrophon angegeben, wobei interessanterweise verschiedene Quellen von 103 bis 107 dB pro Lautsprecher ausgehen. Daher wurde bei meinen Messungen als Messpegel der Schalldruck eines einzelnen Lautsprechers angegeben! Es wurde ein Messpegel von 104 dB gewählt, da sich dieser in allen Situationen generieren ließ, ohne daß die Begrenzungsschaltungen der Lautsprecher an-

sprachen oder die nötige Mikrofonposition so nah am Lautsprecher lag, daß größere Ungenauigkeiten durch die Positionierung zu erwarten waren.

Der Anteil der Verzerrung sollte dabei innerhalb des Dynamikbereichs des Mikrofonverstärkers linear mit dem Pegel verlaufen. Dies wurde mit Messungen bei niedrigeren Pegeln überprüft, bei welchen der Differenztonpegel um den selben Wert wie der Gesamtpegel abgesunken ist.

Dies gilt allgemein für Verzerrungen zweiter Ordnung solange die Verzerrungen höherer Ordnung vernachlässigbar bleiben. Da die Nichtlinearitäten bei Kondensatormikrofonen recht gering sind trifft dies zu. Dadurch ist es auch möglich aus dem Differenztonfaktor direkt auf den Klirrfaktor zu schließen. Den Messungen zufolge liegt dieser für Kondensatormikrophone im mittleren Frequenzbereich bei etwa 0,2%. Es bleibt anzumerken, dass die Verzerrungen des Gehörs bei den Pegeln welchen die Mikrophone ausgesetzt wurden bereits in der Größenordnung von über 1% liegen.

2.1 Normen

Die Prüfung und Beschreibung der Daten von Mikrofonen wird in verschiedenen Normen geregelt. In Deutschland ist dies insbesondere die DIN 45 591 „Mikrofon-Prüfverfahren, Meßbedingungen und Meßverfahren für Typprüfung“ für die Grundlagen der Messung und die DIN 45 593 „Mikrophone, Angabe von Eigenschaften“ für die Beschreibung.

In Bezug auf die Verzerrungen bei Mikrofonen wurde in älteren Normen nur der Überlastschalldruck generell definiert. Für Studiomikrophone wird der der Schalldruck angegeben, bei welchem die gesamten harmonischen Verzerrungen (THD) unter 0,5% bleiben. Neuere Normen wie die IEC 60 286-4 oder die DIN 45403 „Messung von nichtlinearen Verzerrungen in der Elektroakustik“ regeln die Messung von Verzerrungen bei Mikrofonen:

„Als Maß für die nichtlinearen Verzerrungen werden die Größenwerte (z.B. Spannungen, Pegel) der zusätzlichen Frequenzen im eingeschwungenen Zustand benutzt“
(5)

Die Eigenschaften nichtlinearer Glieder sind durch physikalische Ursachen bestimmt und äussern sich in den Kennlinien. Solange die Kennlinienform nicht von der Aussteuerung abhängig ist (z. B. durch Hyterese-Einflüsse), lässt sich diese allgemein durch die Potenzreihe

$$i = A_1 * u + A_2 * u^2 + A_3 * u^3 + \dots \quad (1)$$

mit

u ...Eingangssignal

i ...Ausgangssignal

darstellen.

Unsymmetrische Verzerrungen erzeugen Teilschwingungen von geradzahlicher Ordnung, symmetrische solche ungeradzahlicher Ordnung.

Aus den Ordnungszahlen werden die Verzerrungsfaktoren k und d hergeleitet. Es ergeben sich Obertöne deren Frequenz von der Grundfrequenz und der Ordnungszahl abhängt. Der Pegel wird dabei durch den Grad der Verzerrung der jeweiligen Ordnung bestimmt. Bei Kondensatormikrophonen entstehen aufgrund der Kennlinie hauptsächlich Verzerrungen 2. Ordnung.

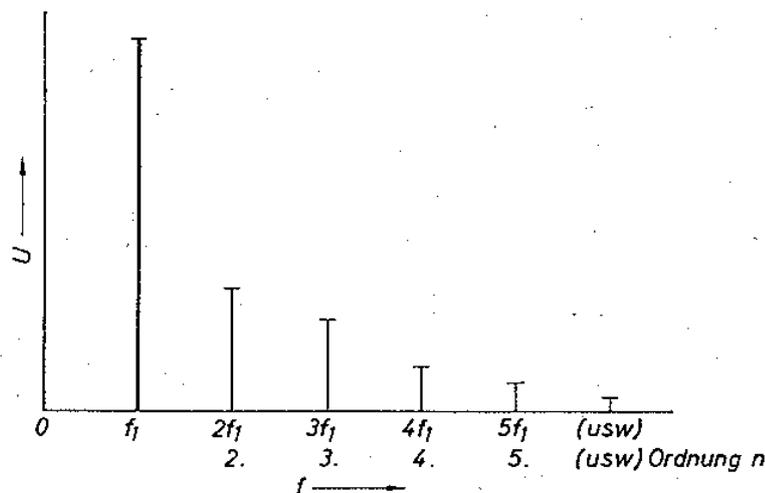


Abbildung 3: Frequenzen der Obertöne und zugehörige Ordnungszahl
(5)

Die Bewertung der Verzerrungen nach Gehör ist dabei recht unterschiedlich. Sie hängt vom Wiedergabeschalldruck, der Frequenzlage, der Verdeckung, aber auch von persönlichen, subjektiven Faktoren ab. Dabei stören Summen und Differenzöne, wie sie bei mehrstimmigen Spektren entstehen können wesentlich mehr, da sie meist nicht harmonisch sind. Obertöne die ins Spektrum eines Klanges passen werden in einigen Fällen auch positiv wahrgenommen.

2.1.1 Klirrfaktor

Der Klirrfaktor beschreibt den Mittelwert der Summe aller Oberschwingungen im Verhältnis zur Grundschwingung. Zur Berechnung werden alle Effektivwerte der neu entstanden Oberschwingungen in aufsummiert. Die Wurzel aus der Summe wird in Bezug zum gesamten Ausgangssignal gesetzt.

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_h} U_n^2}}{U_a} \quad (2)$$

mit

k ... Klirrfaktor

n ... Ordnungszahl der Teilschwingungen

U_n ... Effektivwerte der neu entstandenen Teilschwingungen

U_a ... Effektivwert des gesamten Signals am Ausgang

n_h ... höchste Ordnung der zur Messung kommenden Teilschwingungen

In der Praxis kann hierzu oft mittels eines Tiefpassfilters die Grundschiwingung von den Oberschwingungen separiert werden.

Sind nur gewisse Oberschwingungen von Interesse, oder kann davon ausgegangen werden, dass eine Schaltung nur bestimmte Oberwellen erzeugt, kann man auch den Klirrfaktor einer bestimmten Ordnung berechnen, in dem man nur die dafür relevanten Frequenzen betrachtet. Es ergibt sich der Klirrfaktor n-ter Ordnung k_n :

$$k_n = \frac{U_n}{U_a} \quad (3)$$

In (5) werden des weiteren die Messverfahren, die Messdurchführung und die Darstellung der Messergebnisse geregelt.

2.2 DIN 45 403 Blatt 3 - Differenztonverfahren

DIN 45 403 stimmt sachlich überein mit IEC 268. Beide beschreiben wie anstelle des Klirrfaktors der Differenztonfaktor bestimmt werden kann, und wie man daraus auf den Klirrfaktor schließt:

Zwei Signale gleicher Amplitude mit den Frequenzen f_1 und f_2 und dem Frequenzabstand $\Delta f = f_2 - f_1$ werden auf den Eingang gegeben. Bei unsymmetrischen Verzerrungen entstehen Differenztöne die einen Abstand von einem ganzen Vielfachen von Δf von der Grundfrequenz haben. Bei symmetrischen Verzerrungen entstehen Frequenzen, die um ganze Vielfache von Δf von den Frequenzen f_1 und f_2 entfernt sind. Aus der Summe der Amplituden lässt sich wie beim Klirrfaktor der Differenztonfaktor d bestimmen. Der Differenztonfaktor zweiter Ordnung berechnet sich dabei zu:

$$d_2 = \frac{U_{(f_2-f_1)}}{U_a * \sqrt{2}} \quad (4)$$

mit

$U_{(f_2-f_1)}$... Effektivwert des Differenztons

U_a ... Effektivwert des gesamten Gemisches am Ausgang

Bei Mikrofonen entsteht aufgrund der Form der Kennlinie hauptsächlich der Differenztonfaktor 2. Ordnung. Der Differenztonfaktor 3. Ordnung berechnet sich zu:

$$d_3 = \frac{U_{(2*f_2-f_1)} + U_{(2*f_1-f_2)}}{U_a * \sqrt{2}} \quad (5)$$

mit

$U_{(2*f_2-f_1)}$ und $U_{(2*f_1-f_2)}$... Effektivwerte des Differenztons
 U_a ... Effektivwert des gesamten Gemisches am Ausgang

In dieser Arbeit wird lediglich der Differenztonfaktor 2. Ordnung betrachtet. Eine Änderung des Programms, so dass zusätzlich der Faktor 3. Ordnung betrachtet werden kann wäre aber in PD recht leicht möglich und ein interessanter Ausblick, gerade im Bezug auf die später noch erwähnten symmetrischen Kapselbauformen.

Für jeden Differenztonfaktor gilt entsprechend das Differenztondämpfungsmaß:

$$a_{d_n} = 20 * \lg \frac{1}{d_n} \text{ in dB} \quad (6)$$

Es werden in der Norm auch die Messfrequenzen beschrieben. Einerseits gibt es einige feste Frequenzen die berücksichtigt werden sollen, ansonsten ist es wichtig, daß Δf konstant sein soll und vorzugsweise 80 Hz beträgt.

Als Messfrequenz gilt der Mittelwert der Doppeltonfrequenzen:

$$f_m = \frac{f_2 + f_1}{2} \quad (7)$$

Auch der Aussteuerungswert für die Messung wird beschrieben: Da sich die Effektivwerte von U_1 und U_2 gleich sind entspricht der Aussteuerungswert U_s dem doppelten Pegel:

$$U_s = 2 * U_1 \quad (8)$$

Dies ist besonders interessant in Bezug auf die Pegel der einzelnen Lautsprecher und den Summenpegel, der in den angeführten Papers teilweise abweicht.

2.2.1 Unterschiede zu IEC 268-3

In IEC 268-3 werden dem Differenztonfaktor 2. Ordnung der Faktor 2 und dem Differenztonfaktor 3. Ordnung der Faktor 4/3 vorangestellt, um die Ergebnisse der Klirrfaktormessung und der Differenztonmessung zahlenmäßig anzugleichen. Diese Übereinstimmung gilt jedoch nur in besonders einfachen Fällen, ein enger Zusammenhang ist nicht zwingend, deshalb verzichtet die DIN auf die Faktoren.

2.3 Kapselanteile und andere Anteile am Klirrfaktor von Mikrofonen 10

Differenztonfaktor 2. Ordnung nach IEC 268-3

$$d_2 = 2 * \frac{U_{(f_2-f_1)}}{U_a * \sqrt{2}} \quad (9)$$

Des Weiteren wird in EN 60286-4 angemerkt, daß der Abstand so gewählt werden muss, daß der notwendige Schalldruckpegel am Mikrofon erreicht wird. Keine der Normen geht auf die Effekte der Nahbesprechung ein. Somit sollte man eigentlich zusätzlich zum Differenzton bei der Messung von Mikrofonen mit Druckgradientenanteil auch immer den Frequenzgang des Mikrophones bestimmen, der Messkonfiguration auftritt. Nachdem der Verlauf der Differenztonkurve linear mit dem Frequenzgang des Mikrophons verläuft ist es bei Mikrofonen mit ungewöhnlichen Kurven sinnvoll zusätzlich die Abweichungen vom linearen Frequenzgang zu berücksichtigen. Deshalb wurden zumindest bei den Messungen am IEM zusätzlich die Frequenzgangskurven der Mikrophone aufgenommen.

2.3 Kapselanteile und andere Anteile am Klirrfaktor von Mikrofonen

Der Klirrfaktor von Mikrofonen unterteilt sich in Anteile die in der Kapsel selbst entstehen, entweder aufgrund der Wandlerkennlinie oder aufgrund des Schallflusses durch die Hohlräume in der Mikrofonkapsel, und in die Anteile die im elektrischen Teil, also in der nachfolgenden Schaltung entstehen. Einen entscheidenden Einfluss hat dabei auch die Anpassung der Schaltung an die verwendete Kapsel. Dies erkennt man unter anderem an den Messungen verschiedener Mikrophone, die die selbe Kapsel, aber unterschiedliche Schaltungen verwenden (vergleiche 2.4.1). Dabei unterscheiden sich die Messungen deutlich, obwohl die Elektronik immer im linearen Bereich der Aussteuerung betrieben wurde.

Peus beschreibt die quadratische Abhängigkeit der Kondensatorwandler („square-law transducer response“), und die resultierenden Verzerrungen. Sie sind proportional zu $\frac{1}{\omega}$ und somit bei richtiger Dimensionierung und im gebräuchlichen Frequenzbereich praktisch vernachlässigbar (15).

Hibbing beschreibt den Einfluss des elektrischen Abschlusses bei tiefen Frequenzen (Shuntung), und Einfluss des veränderlichen Luftspaltwiderstandes (11).

Die Nichtlinearitäten der elektronischen Verstärker werden nur im Übersteuerungsfall deutlich. Hier steigt deren Absolutwert deutlich an. Darunter fallen kaum nennenswerte Defizite der Linearität von Verstärkern auf. Sie begrenzen erst durch ihr Eigenrauschen wieder die Dynamik und bilden dadurch die untere Messgrenze bei der Verzerrungsmessung.

Als wesentlicher Einfluss für den Klirrfaktor von Mikrofonen bleiben somit die Nichtlinearitäten in der akustischen Impedanz. Sie entstehen aufgrund der Luftkompressibilität vor und hinter der Membran, sowie in den Löchern und Kanälen der Gegenelektrode. Bei gerichteten Mikrofonen oft auch im Laufzeitglied, welches die Charakteristik steuert, hinter der Gegenelektrode. Die Auswirkungen hängen dabei stark von der Geometrie, bzw. der Kapselbauweise und der Abstimmung der Kapsel ab.

Unsymmetrische Verhältnisse in der Kapsel entstehen bei den gebräuchlichen Bauformen dadurch, daß die Verhältnisse für die auswärts geschwungene Membran anders sind, als für die einwärts geschwungene. Im äußeren Zustand werden die Luftsäulen in den Kanälen hinter der Membran verlängert, im einwärts geschwungenen Zustand verkürzt. Dadurch werden die Verhältnisse auch abhängig von der Auslenkung und von den Schwingungsformen der Membran.

Diese Phänomene sind aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Luftteilchen bei verschiedenen Frequenzen und deren Trägheit teilweise von der Frequenz abhängig.

k_2 ist dabei oft größer als vermutet, andere Anteile sind jedoch kaum vorhanden. Daraus folgt bei einstimmigen Instrumenten die Bildung einer zusätzlichen Oberschwingung mit der Frequenz der Oktave. Dies kann durchaus als positiv empfunden werden. Unangenehme Summen und Differenzöne können nur bei komplexen Signalen und gleichzeitig hohen Pegeln entstehen.

Andere Ursachen als die nichtlineare Luftkompressibilität in Spalten oder Schlitzen sind möglich und sollten zunächst untersucht werden. Sie sind meist aus dem Frequenzgang ersichtlich:

	Ursache im Frequenzgang	Auswirkung:
$k_2 > d_2$	Tiefenabfall	d_2 zu schwach wiedergegeben
$d_2 > k_2$	Tiefenanstieg	d_2 zu stark wiedergegeben
$k_2 < d_2$	Höhenabfall	2. Harmonische zu schwach wiedergegeben
$d_2 < k_2$	Höhenanstieg	2. Harmonische zu stark wiedergegeben

Tabelle 1: Gegenseitige Abweichungen der k_2 und d_2 Werte (nach Notizen von Boré)

2.4 Kapselaufbau und Klirrfaktor bei Mikrofonen

Kondensatormikrophone arbeiten nach einem quadratischen Kraftgesetz. Es entsteht hauptsächlich k_2 , also Schwingungen mit der doppelten Frequenz. Bei mehreren Eingangsschwingungen entstehen auch Anteile mit der Summen oder Differenzfrequenz,

welche bei streng quadratischer Kennlinie und linearem Frequenzgang in der Amplitude der 2. Harmonischen entsprechen. (vergleiche z.B. (16) Kapitel 29) Somit lässt sich aus dem Differenztonfaktor der Klirrfaktor von Kondensatormikrofonen einfach durch Verdoppeln berechnen.

2.4.1 Druckempfänger:

Druckempfänger haben den einfachsten Kapselaufbau aller Mikrophone. Die Membran ist einfach vor einem (bis auf ein Druckausgleichsloch für statische Luftdruckschwankungen) geschlossenen Volumen vor der Gegenelektrode gespannt. Die Membranabstände zur Gegenelektrode sind dabei geringer als bei Druckgradientenmikrofonen. Somit ist weniger Luft eingeschlossen. Die geringe Luftmasse und die geringe Masse der Membran ergeben zusammen mit der hohen Rückstellkraft der Membran ein hoch abgestimmtes System. Da die Kapsel nur auf den Schalldruck und nicht auf die Schallschnelle reagiert, ist die Luftteilchengeschwindigkeit zudem frequenzunabhängig. Nichtlinearitäten hängen also im wesentlichen nur vom Schalldruck ab!

Dadurch begründen sich die sehr geringen Verzerrungswerte bei Druckempfängern. Sie sind so gering, dass die Einflüsse der Elektronik, insbesondere der Anpassung an die Kapsel sichtbar werden.

Da die Elektronik in den letzten Jahren stark verbessert wurde, entstehen wahrnehmbare Verzerrung nur, wenn der Verstärker übersteuert wird.

„The over-all distortion of a microphone then is caused by acoustical non-linearities and mismatching of the acoustical transducer to the electrical circuit.“ (11)

Die kapazitive Last auf den Wandler wird jedoch in diesem Paper als elementarer Einfluss genannt

Eine Studie von Neumann verdeutlicht den Einfluss der Mikrophonelektronik auf den Klirrfaktor. Drei Mikrophongenerationen, welche die selbe Druckkapsel mit unterschiedlicher Elektronik verwenden wurden auf den Differenztonfrequenzgang untersucht. Da bei Neumann der Frequenzgang durch akustische Maßnahmen in der Kapsel bestimmt wird, und die Elektronik in der Regel keine entzerrenden Aufgaben übernimmt, ist der Frequenzgang bei allen drei Mikrofonen ident. Der Klirrverlauf unterscheidet sich jedoch deutlich. Es sticht hervor, dass die Verzerrungen bei der ersten Transistorschaltung gegenüber der Röhrenschaltung im mittleren Frequenzbereich sogar angestiegen sind. Erst die moderne transformatorlose Elektronik konnte den Klirrverlauf deutlich absenken.

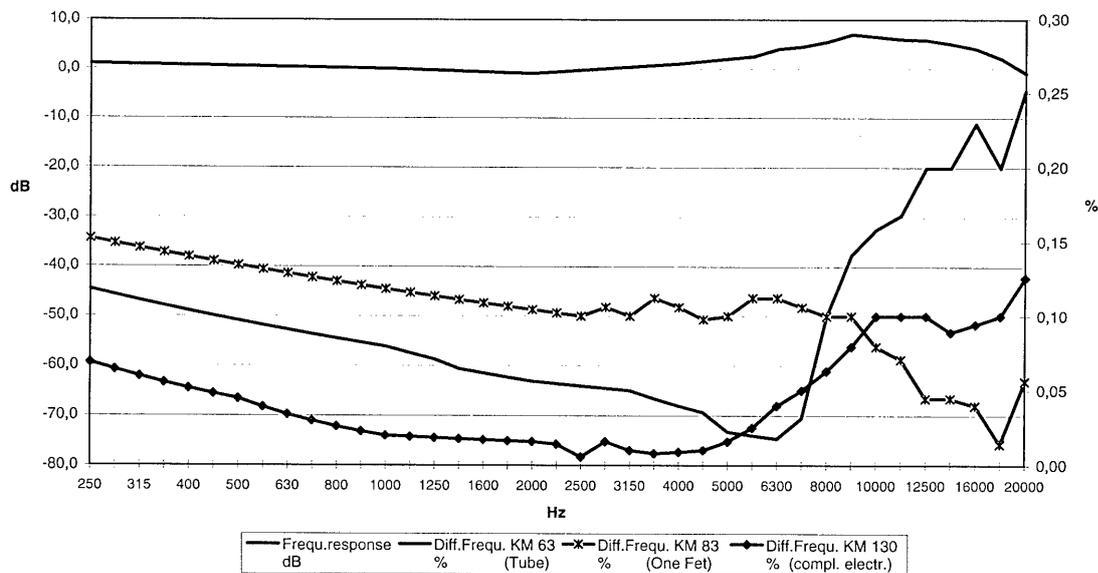


Abbildung 4: Differenzfrequenzfaktor bei 107dB SPL, Kleinmembrandruckmikrophone KM63, KM83, KM130

(15)

Laut Hibbing machen die Verzerrungen, die durch die kapazitive Last verursacht werden bis 5 kHz am Meisten aus. Daher erscheint die Erweiterung des oberen Endes des Dynamikbereichs durch Shuntung nur sehr begrenzt sinnvoll. Zwar wird ein Übersteuern des Verstärkers vermieden, der Klirrfaktor wird aber dennoch erhöht. Teilweise wird der Einfluss der Elektronik auf die Verzerrung aber auch bewusst ausgenutzt um eine besondere Färbung des aufgenommenen Materials zu erreichen.

2.4.2 Druckgradientenempfänger

Beim Druckgradientenempfänger erfolgt der Antrieb durch die Differenz der Drücke p_1 (vor der Membran) und p_2 am rückwärtigen Einlass.

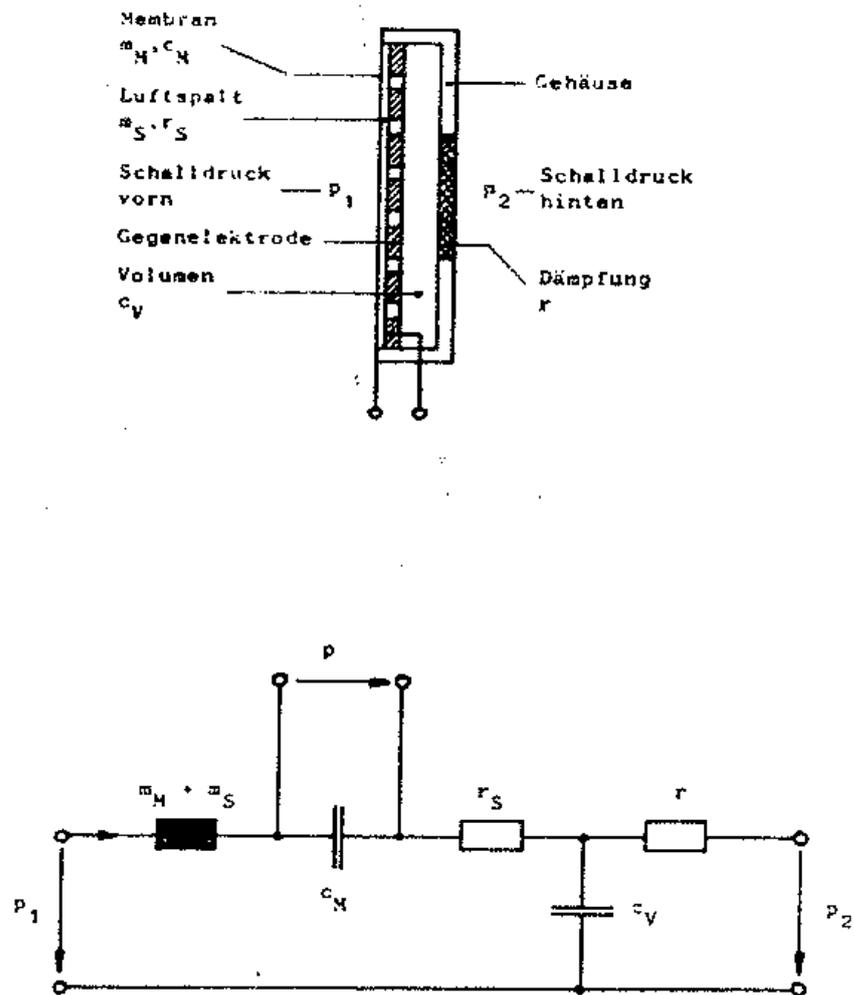


Abbildung 5: Schematischer Aufbau und vereinfachte akustische Ersatzschaltung eines Druckgradientenwandlers mit Nierencharakteristik

(4)

Dadurch ergibt sich ein prinzipbedingt ein Anstieg im Frequenzgang zu den hohen Frequenzen. Der Antriebsverlust bei tiefen Frequenzen muss durch akustische oder elektrische Entzerrung ausgeglichen werden, um einen linearen Übertragungsfaktor zu erreichen. Hier gehen die Hersteller unterschiedliche Wege.

Bei der akustischen Entzerrung bilden die Reibwiderstände r und r_S zusammen mit der Membrankapazität c_M einen Tiefpassfilter.

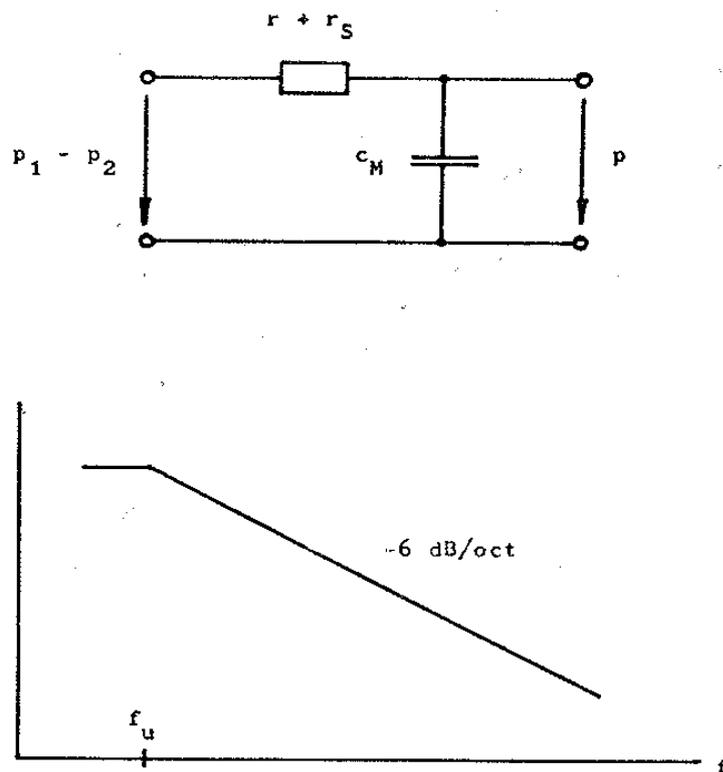


Abbildung 6: Ersatzschaltung für tiefe Frequenzen und zugehöriger Frequenzgang
(4)

Dadurch wird der Frequenzgang linearisiert. Bei hohen Frequenzen wird zusätzlich der Druckstau vor der Membran zur Linearisierung herangezogen. Die akustische Entzerrung wird traditionell von den meisten Herstellern verwendet.

Bei der elektrischen Entzerrung wird der Frequenzgang der Kapsel mittels elektronischer Filter begradigt. Am Ersatzschaltbild ändert das wenig, es werden lediglich Teile der Schaltung vom akustischen ins elektrische transformiert. Allerdings kann die Kapsel nun für einen höheren Output optimiert werden, wodurch sich das Eigenrauschen des Mikrophons verringern lässt. Es genügt eine schwächere Bedämpfung, und die Reibungshemmung kann reduziert werden. Laut der Unterlagen von Sennheiser / Hibbing ist es am günstigsten, die Kapsel für einen maximalen Output um 5kHz zu optimieren, da dort das Gehör am empfindlichsten auf Rauschen reagiert.

Durch die Art der Entzerrung wird die Kapselgeometrie verändert, was auch einen Einfluss auf die nichtlinearen Anteile zu haben scheint. Ein wesentlicher Einfluss ist bei Druckgradientenmikrofonen die mit der Membranauslenkung veränderliche Luftspaltmasse. Deren Veränderung wird durch die Reibungshemmung reduziert. Eine stärkere

Reibungshemmung führt daher zu weniger Verzerrungen, allerdings auch zu weniger Empfindlichkeit und damit zu stärkerem Rauschen des Mikrophons.

Durch den komplexeren Aufbau bewegen sich verglichen mit Druckempfängern weit größere Luftmassen in der Kapsel. Auch ist der Abstand zwischen Membran und Gegenelektrode größer und das Laufzeitglied bildet zusätzliche Volumen. Da das Mikrofon auf die Schallschnelle reagiert steigt die Luftteilchengeschwindigkeit mit der Frequenz. Somit steigt auch die Verzerrung bei hohen Frequenzen an. Durch die Filterung mit dem Tiefpass zur Frequenzgangsentzerrung wird bei manchen Mikrofonen ein Minimum der Verzerrung im mittleren Frequenzbereich erzeugt. Wobei die Verzerrung im tieffrequenten Bereich wiederum auch von der Belastung durch die Elektronik abhängen kann. Ab etwa 1kHz überwiegen in der Regel die Verzerrungen durch reine Kapselteile. Ein weiterer Übergang ergibt sich, wenn die Kapsel aufgrund ihrer Größe in den Staudruckbereich übergeht und auch ohne Druckgradientenanteil gerichtet wird.

Die maximalen Verzerrungen ergeben sich jedoch wenn die Phasendrehung des umlaufenden Schalls aufgrund der Frequenz und der Kapselgeometrie 180° beträgt. Nun ist die Druckdifferenz zwischen p_1 und p_2 am größten, und es entsteht die größte Luftteilchengeschwindigkeit.

Daraus lässt sich die Beobachtung erklären, dass Nierenmikrophone ohne spezielles Laufzeitglied, die zur Hälfte aus Druck- und zur Hälfte aus Druckgradientenempfänger bestehen unter Umständen weniger verfälschen. Hier entfällt ein spezielles Laufzeitglied und die Luftmasse in der Kapsel wird reduziert. Eventuell kann die Frequenz der 180° Phasendrehung durch eine kleinere Bauweise erhöht werden.

Bei Doppelmembranstrukturen entstehen zusätzliche Anteile durch die Koppelglieder zwischen den beiden Membranhälften. Daher ist hier der Einfluss der „Übergangsfrequenz“, wenn jede Membranhälfte für sich gerichtet wird am deutlichsten zu erkennen.

2.4.3 Mikrophone mit symmetrischem Kapselaufbau und 2 Gegenelektroden

Eine interessantes Verbesserungspotential stellen symmetrisch aufgebaute Kapseln dar. Hier wird die Membran nicht vor einer Gegenelektrode, sondern zwischen 2 Gegenelektroden eingespannt, von welchen mindestens eine schalldurchlässig ausgeführt sein muss.

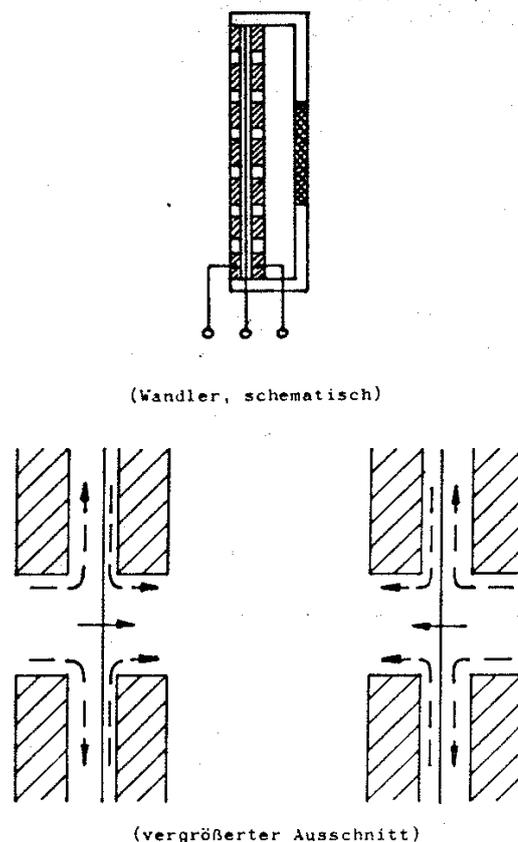


Abbildung 7: Schematischer Aufbau und Wirkungsweise eines symmetrisch aufgebauten Wandlers

(4)

Durch den Gegentakt-Betrieb werden bei ideal symmetrischem Aufbau die Kapselverzerrungen theoretisch vollständig eliminiert. Die Verzerrung ist nun nicht mehr von der Richtung der Membranbewegung abhängig, die Verzerrungen geradzahligter Ordnung entfallen.

Es ist allerdings nicht geklärt, wie sehr sich dies auf den Klang auswirkt. Dazu wären gezielte psychoakustische Versuchsreihen mit speziellen Kapseln unter verschiedenen Einsatzbereichen nötig. Da derzeit ausser Sennheiser meines Wissens nach niemand symmetrische Kapseln fertigt, ist ein solcher Versuch wohl nur mit Unterstützung der dortigen Kapselentwicklung möglich. Derzeit ist ein Vergleich schwierig, weil Sennheiser im Vergleich zu anderen Herstellern auch einen anderen Weg bei der Kapselentzerrung geht und zudem die HF-Schaltung in Kondensatormikrofonen verwendet, wohingegen die meisten anderen Hersteller die NF-Schaltung bevorzugen. Es ist somit schwierig, die Messdaten zu vergleichen da die Ergebnisse vermutlich nicht nur vom Kapselaufbau beeinflusst sind.

Es ist durchaus denkbar, daß Kapseln ohne k_2 vor allem bei lauten, komplexen Signalen bessere Ergebnisse erzielen. Andererseits könnten durch den Wegfall der harmonischen Verzerrungen vor allem beim Stützen von Soloinstrumenten auch Nachteile entstehen, oder solche die bisher durch die Verzerrungen geradzahligter Ordnung verdeckt wurden hervortreten. In diesem Rahmen wäre es sicher interessant die Messung des Differenztons auch auf höhere Ordnungszahlen, insbesondere d_3 zu erweitern.

Ein weiteres Problem ergibt sich dadurch, daß der ideal symmetrische Aufbau der Kapsel eigentlich nur bei reinen Druckgradientenempfängern mit Achtercharakteristik möglich ist. Ansonsten sind entweder zusätzliche Laufzeitglieder oder ein einseitig geschlossenes Volumen nötig, wodurch der Kapselaufbau nur teilweise symmetrisch wird. Da aber die Kapselverzerrungen beim Druckanteil ohnehin geringer sind, scheint es interessant gerade den Druckgradientenanteil bei den Verzerrungen zu reduzieren.

Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch das Ausnutzen beider Membranseiten beim Gegentaktbetrieb. Somit wird die effektive Membranfläche vergrößert, und dadurch die Empfindlichkeit gesteigert und das Rauschen reduziert, ohne die Richtwirkung der Kapsel durch größere Ausdehnung zu verändern.

Konstruktiv ist die Umsetzung einer symmetrischen Kapsel in der NF-Schaltung durch die entstehenden Isolationswegprobleme schwieriger als in der HF-Schaltung.

3 Messaufbau

Der prinzipielle Messaufbau für die Differenztonmessung wurde bereits beschrieben, und ist auch durch die Norm geregelt. Im Gegensatz zu den früheren Setups bei Neumann oder Sennheisser, konnte der Aufwand durch die Messung mit Computer, Soundkarte und gewöhnlichen Studiomonitoren oder Aktivlautsprechern jedoch deutlich verringert werden. Früher wurde die gesamte Audioelektronik aus einzelnen, analogen Komponenten und Messgeräten aufgebaut, was einen teuren und umständlichen Hardwareaufbau zur Folge hatte. Ein PC wurde maximal zur Steuerung des Messablaufes eingesetzt.

Beim neuen Aufbau findet die gesamte Signalverarbeitung, das Erzeugen der Ausgangssignale, das Filtern und das Messen der Anteile in PD statt. Die Soundkarte beinhaltet bereits die nötige Mikrophonvorstufe und die Phantomspeisung. Die Leistungsverstärker sind bereits in die Lautsprecher integriert. Die Abbildung verdeutlicht die Unterschiede.

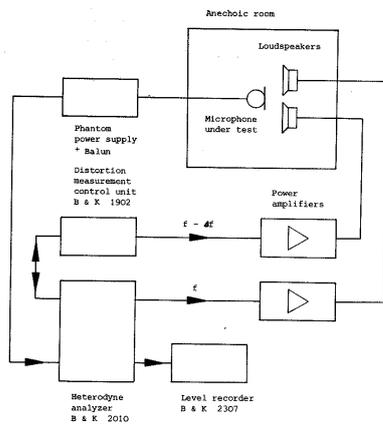


Abbildung 8: Differenztonmesssetup wie es früher beispielsweise bei Sennheisser verwendet wurde

(11)

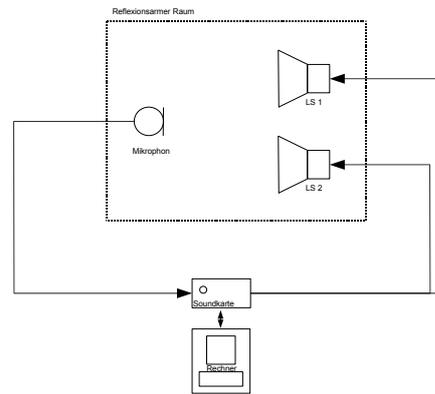


Abbildung 9: Neues Setup für die Differenztonmessung mit PD

3.1 Reflexionsarmer Raum

Die Norm fordert bei der Messung ein ungestörtes, freies Schallfeld mit einer Wellenfront parallel zur Membran. Reflexionen stören die Messung. Im Gegensatz zur reinen Frequenzgangmessung ist es nicht einfach möglich, mittels Fensterung Reflexionen aus dem Eingangssignal heraus zu filtern. Auch sind die Messsignale auf Sinustöne bzw. Sinussweeps begrenzt. Ein reflexionsarmer Raum ist somit zur korrekten Messung unerlässlich.

Da die Messung aber erst bei ca. 250 Hz gültig wird, genügen relativ kleine reflexionsarme Räume. Da die Messung in der Praxis meist im Nahfeld der Lautsprecher durchgeführt werden muss um ausreichende Schalldrücke zu erreichen, sind die Anforderungen weniger kritisch zu sehen.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass auch im Messraum am IEM, der eine untere Grenzfrequenz von ca. 500 Hz hat, keine relevanten Unterschiede zu den Messungen bei Neumann aufgetreten sind. Der dortige reflexionsarme Raum ist wesentlich aufwändiger konstruiert, und funktioniert bis unter 100 Hz. Selbst bei den Messungen auf der Tonmeistertagung mit stark verkleinertem Aufbau und ohne reflexionsarmen Raum haben sich Ergebnisse erzielen lassen, die durchaus ausreichen um eine Mikrofonkapsel grob zu kategorisieren.

Zu beachten sind in jedem Fall die Abschirmung von Störgeräuschen, vor allem im tieffrequenten Bereich. Diese werden oft vom Gehör aufgrund dessen Empfindlichkeitskurve kaum wahrgenommen, stören aber bereits die Messung, da sie 80Hz Anteile hinzufügen. Bei Neumann war hier das Hauptproblem der nahe Flughafen mit

landenden Flugzeugen. Im IEM konnten Störungen durch vorbei fahrende LKW und tieffrequenten Gebäudelärm (z.B. Zufallen von Türen) registriert werden. Auf der Tonmeistertagung wurde die Messung durch den allgegenwärtigen Störpegel auf der Messe und den geringeren Pegel der kleinen Lautsprecher deutlicher gestört.

3.2 Anordnung von Lautsprechern und Mikrofonen

Bei der Lautsprecheranordnung wird im wesentlichen gefordert, dass beide Quellen am Mikrofon für jede Frequenz den gleichen Pegel erzeugen. Dies lässt sich realisieren, indem man beide Lautsprecher in gleichem Abstand und symmetrisch zur Hauptachse des Mikrophons aufstellt. Dabei sollte auch darauf geachtet werden, dass man nicht zu weit von der Hauptachse der Aufnahmerichtung des Mikrophons abweicht, da sonst Einflüsse durch die Richtcharakteristik, insbesondere durch die Anteile die durch die Kapseldimension bestimmt werden falsch erfasst werden.

Der Lautsprecher muss dabei den gesamten Frequenzbereich der Messung (ca. 200Hz bis 20 kHz) linear und mit ausreichendem Schalldruck (ca. 103bis 107 dB SPL am Ort des Mikrophons) wiedergeben können. Daher sind in der Regel Mehrweglautsprecher nötig. Der Aufbau und die Kalibrierung wird dadurch geringfügig komplizierter. Entweder muss man in 2 Durchgängen messen, oder eine Position finden, in welcher das Mikrofon von allen Lautsprechern im gleichen Winkel erfasst wird. Sind die Lautsprecher nicht koaxial aufgebaut ist ein größerer Abstand zu den Boxen nötig, um nicht durch die unterschiedlichen Mikrophoneometrien von Messmikrofon und zu testendem Mikrofon schon Fehler durch das nicht homogene Schallfeld zu erhalten. Als „Faustwert“ wurde hier die aus dem Boxenbau bekannte Raumdiagonale des Lautsprechers als minimaler Messabstand verwendet.

Zusätzlich ist bei Mikrofonen mit Druckgradientenanteil der Nahbesprechungseffekt zu beachten, sobald der Abstand zwischen Mikrofon und Lautsprecher kleiner als die Wellenlänge der gemessenen Frequenz wird. Im Vergleich zum Messmikrofon steigt dadurch der Pegel bei tiefen Frequenzen abstandsabhängig an, und somit auch die Verzerrungen. Somit macht es Sinn, bei hohen Verzerrungen im tieffrequenten Bereich von Druckgradientenmikrofonen auch die zugehörigen Frequenzgänge zu betrachten.

Bei typischen Messräumen tritt im tieffrequenten Bereich immer der Nahbesprechungseffekt auf, da sie nur sehr selten groß genug sind, um Messungen mit größerem Abstand als die Wellenlänge zu ermöglichen. Auch wären bei der Differenztonmessung in diesem Fall Lautsprecher mit extremem Schalldruck nötig. Die Abbildung zeigt, dass im tieffrequenten Bereich mit deutlichen Pegelanhebungen zu rechnen ist. Im Bereich um 250Hz, also bei der unteren Messgrenze der Differenztonmessung, beträgt die Pegelanhebung aber nicht mehr als 3dB.

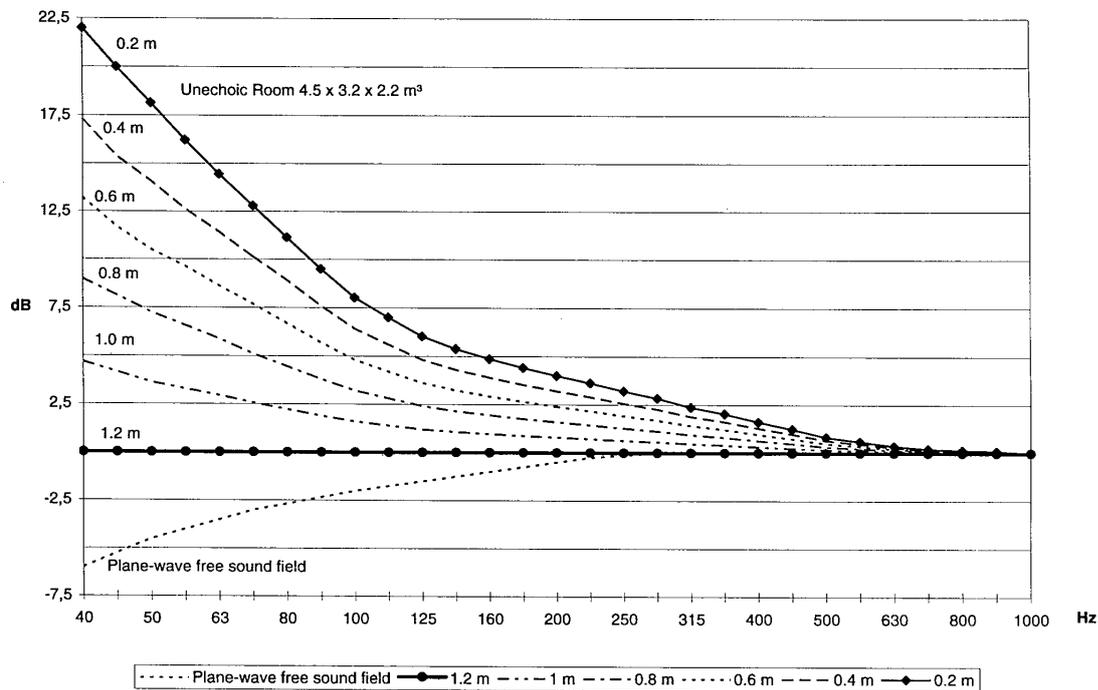


Abbildung 10: Nahbesprechungseffekt eines Nierenmikrophons bei verschiedenen Abständen zum Lautsprecher (Referenz 1,2m) im Vergleich mit dem Frequenzgang im freien Schallfeld

(15)

Andererseits simuliert die nahe Aufstellung auch teilweise die Art der Anwendung in der Praxis. Auch hier werden die Mikrophone, insbesondere gerichtete Stütz- oder Solistenmikrophone, oft im Nahbereich der Instrumente aufgestellt. Bei entfernterer Positionierung sind auch die zu verarbeitenden Schalldrücke und somit die Verzerrungen geringer.

3.3 Kalibrierung und Positionierung

Jeder Lautsprecher, bzw. jede Lautsprecherbox muss kalibriert werden, um am Ort des Mikrophons für den gesamten Frequenzbereich der Messung den gleichen Schalldruck zu erzeugen. Dabei ist zu beachten, dass die geforderten Pegel verhältnismäßig hoch sind, insbesondere für die kleinen Aktivlautsprecher, die sich für die Messung als vorteilhaft erwiesen haben. Es ist also die Belastbarkeit der Lautsprecher zu beachten. Aktive Studiomonitore besitzen zwar meist Schutzschaltungen gegen Überlastung, allerdings sind diese für den Betrieb mit Musik und nicht mit Messsignalen ausgelegt. So ist insbesondere darauf zu achten, daß der der Hochtöner nicht überlastet wird,

und der Hub im unteren Frequenzbereich den Tieftöner nicht an seinen mechanischen Anschlag bringt.

In der Praxis lagen die erreichbaren Pegel merklich unter denen, welche die Hersteller der Boxen im Datenblatt angegeben hatten. Diese bezogen sich auf die Aufstellung im Halbraum, was im Bassbereich höhere Pegel ermöglicht, die im reflexionsarmen Raum nicht erreicht wurden. Da bei musikalischen Signalen der Leistungsbedarf im hochfrequenten Bereich deutlich zurück geht, sind auch die Hochtöner meist nicht für die gleiche Belastbarkeit wie die Tieftöner ausgelegt.

Ein besonderes Problem zeigte sich bei den ersten Kalibriermessungen. Ein gemessener Frequenzgang unterhalb dem vom Hersteller angegebenen Maximalpegel der Box wurde entzerrt. Die Messungen wurden aber dennoch mit der Zeit unglaublich, und auch der eingestellte Referenzpegel wurde nicht mehr erreicht. Nach einiger Suche entpuppte sich eine thermische Schutzschaltung als Ursache des Problems. Beim dauerhaften Betrieb mit hohen Pegeln hatte sie den Pegel des Hochtöners etwas abgesenkt. Durch die recht lange Einstellzeit konnte der Unterschied jedoch nicht direkt nach der Kalibrierung festgestellt werden, sondern die Box veränderte allmählich ihre Eigenschaften. Auch die Eigenschaften der Lautsprecher selbst können sich verändern, wenn sich die Schwingspule erwärmt. Somit ist hier vorsichtig vorzugehen, und es macht Sinn die Kalibrierung im Betrieb zu überprüfen.

Speziell bei großen Pegelsprüngen in der Entzerrkurve ist es somit nötig, vorsichtig zu sein. Unter Umständen muss man einen geringeren Messpegel tolerieren, auch wenn dadurch der Störabstand der Messung verschlechtert wird, und damit Effekte der Kapselverzerrung im tief- und mittelfrequenten Bereich nicht mehr messbar sind. In seltenen Fällen macht es auch Sinn, die Entzerrkurve der Lautsprecher von Hand zu bearbeiten, z.B. wenn nur eine einzelne Frequenz den vorgegebenen Pegel nicht erreicht. Entweder handelt es sich um einen Messfehler, oder um ein akustisches Problem des Lautsprechers oder des Versuchsaufbaus. Durch die Korrektur stimmt dann zwar ein einzelner Messwert nicht mehr, aber dafür kann der restliche Frequenzbereich mit entsprechend höherem Pegel gemessen werden.

Bei Mikrofonen mit ausgeprägtem Frequenzgang oder deutlichem Nahbesprechungseffekt macht es Sinn, diesen zumindest zum Vergleich heran zu ziehen. Eine Entzerrung des Mikrofonfrequenzgangs ist allerdings fragwürdig, da das Mikrofon auch in der praktischen Anwendung diesen Frequenzgang vorweisen wird.

Auch die Positionierung des Mikrophons ist nicht unkritisch. Um hohe Pegel und einen möglichst hohen Störabstand zu erreichen, muss man den Abstand zu den Lautsprechern verhältnismäßig gering wählen. Gleichzeitig vergrößert man damit aber Ungenauigkeiten und Messfehler, die sich durch eine ungenaue Positionierung der Membran ergeben. Deren Position ist je nach Mikrophonegehäuse insbesondere bei vielen Großmembranmikrofonen aber nicht immer ohne weiteres von außen ersichtlich.

Bei Neumann wurde zur Positionierung eine Schablone angefertigt, die zwischen Mikrofon und Lautsprecher gehalten wird, um die Position möglichst genau einzuhalten. Vorteilhaft war hier auch das Wissen über den genauen inneren Aufbau der eigenen Mikrophone, und die Möglichkeit diese bei Unklarheiten zu zerlegen.

Am IEM wurde der Punkt der Mikrofonmembran mittels 3 Laserpointern markiert. Somit war eine optische Kontrolle der Einstellung möglich.

Weitere Ungenauigkeiten entstehen durch den Nahbesprechungseffekt und die Richtcharakteristik der Mikrophone. Die Berücksichtigung des Nahbesprechungseffekts wurde bereits beschrieben. Um Effekte der Richtcharakteristik zu minimieren, macht es Sinn, beide Lautsprecher direkt nebeneinander aufzustellen, und die Entfernung nicht zu gering zu wählen.

3.4 Voraussetzungen zur Differenztonmessung

Einige Voraussetzungen die für die Differenztonmessung erfüllt werden müssen sollen hier nochmals wiedergegeben werden.

- Der Differenzton muss linear wiedergegeben werden können. Das bedeutet, daß das Mikrofon zumindest ab 80 Hz einen linearen Frequenzgang haben muss.
- Gleichzeitig muss der Übertragungsbereich der Lautsprecher ausreichend für die Messung sein, und deren Frequenzgang zwischen etwa 200Hz und 20kHz, bzw. innerhalb der Messgrenzen f_{1min} und f_{2max} komplett linear sein. Und dies auch bei hohen Pegeln und über längere Zeit.
- Um einen messbaren Differenzton zu erzeugen muss die Differenz der erzeugten Frequenzen kleiner als eine Oktave sein. Gleichzeitig muss der Differenzton im linearen Übertragungsbereich liegen. Damit der Differenzton überhaupt entstehen kann muss die niedere der beiden Erregerfrequenzen oberhalb der Differenzfrequenz sein. Da die Filter nicht unendlich steil sind, muss auch ein gewisser Abstand zu f_d gewährleistet sein.

80Hz als Differenzfrequenz stellen insofern einen guten Kompromiss dar. Die Messung wird etwa ab 200Hz gültig.

- Um vom Differenztonfaktor d_2 auf den Klirrfaktor $k_{(2)}$ schließen zu können muss der gesamte Frequenzgang bei den Frequenzen von Δf , f_1 und f_2 sowie bei $2*f_1$ und $2*f_2$ den selben Absolutwert haben. Nur solange dies zutrifft kann von d_2 auf k_2 geschlossen werden. Und nur wenn k_2 den Klirrfaktor deutlich dominiert kann aus dem Differenztonfaktor d_2 auf den Klirrfaktor des Mikrophons geschlossen werden.

Bei Kondensatormikrofonen hat jedoch $2 * d_2$ normalerweise den gleichen Zahlenwert wie k solange der Frequenzgang dies zulässt, und die Mikrophonelektronik im linearen Bereich betrieben wird.

Vergleichbare Messungen sind als nur im mittleren Frequenzbereich, meist von etwa 250Hz bis etwa 6kHz möglich. Ausserhalb, bzw. für Mikrophone mit starken Abweichungen vom linearen Frequenzgang muss der frequenzabhängige Übertragungsfaktor des Mikrophons bei der Berechnung berücksichtigt werden.

3.5 Messaufbau und verwendetes Equipment bei Neumann in Berlin



Abbildung 11: Messaufbau im reflexionsarmen Raum bei Neumann

Bei der Messung in Berlin wurde die Software in PD programmiert, und die Vorgehensweise ausführlich besprochen. Hier wurden die meisten Tests durchgeführt, und die Reproduzierbarkeit und die Verwendbarkeit der Software getestet. Es wurden die meisten aktuellen und älteren Mikrophone der Firma Neumann vermessen, sowie einige Mikrophone anderer Hersteller. Für die Messung wurde folgendes Equipment verwendet:

- PC mit Windows - Betriebssystem, PD, Tcl/Tk
- Soundkarte: M-Audio 1841 Der nutzbare Dynamikbereich wurde mit einigen Neumann Mikrofonen überprüft, und lag in der Praxis bei etwa 90 dB)
- Reflexionsarmer Vollraum der Firma Neumann, nutzbar ab etwa 100Hz
- Klein & Hummel O110 2-Wege Studiomonitore
- In der Werkstätte von Neumann angefertigtes Gestell zur Lautsprecheraufstellung mit angebautem Mikrofonhalter, und Schablonen zur Positionierung (Abstand der Kapsel von den Lautsprechern 43cm, Höhe über der Unterkante der Lautsprecher 15cm)
- Phantomgespeistes 1/2 Zoll Messmikrofon mit XLR-Ausgang der Firma Microtech Gefell

Für einige Mikrofone wurde zusätzlich eine externe Phantomspeiseeinheit benötigt, um deren Funktion zur Fernumschaltung der Richtcharakteristik zu verwenden. In diesem Zusammenhang ist es es interessant zu erwähnen, dass die Fernumschaltung der Richtcharakteristik bei den Mikrofonen von Neumann in der Schalterstellung R über die Spannung der Phantomspeisung erfolgt. Da die Phantomspeisung nur innerhalb des in der Norm angegebenen Bereichs von $\pm 2V$ verändert werden darf, ist es nötig, daß die Speiseeinheit die Spannung nach den $6,3 k\Omega$ Widerständen zur Einspeisung direkt auf der Mikrofonleitung misst, und die Spannung unabhängig vom Stromverbrauch des Mikrofons nachregelt. Diese Spannungsversorgung für Mikrofone arbeitet also wesentlich genauer als übliche Phantomspannungsquellen, bei welchen in Abhängigkeit vom Stromverbrauch des Mikrofons und von der Kabellänge deutliche Spannungsschwankungen auftreten.

Hochwertige Mikrofone verfügen in der Regel über interne Maßnahmen zur Spannungsregelung und reagieren unempfindlich auf Spannungsschwankungen der Phantomspeisung. Gerade bei älteren Mikrofonen oder sehr einfachen Fabrikaten, welche die Phantomspeisung nur glätten und direkt als Kapselvorspannung verwenden, wurde ein interessantes Phänomen festgestellt. So war die Phantomspeiseeinheit versehentlich beim Test nicht auf P48 gestellt, sondern gab 2V weniger aus. Einzelne Mikrofone reagierten darauf mit deutlicher Veränderung des Klirrverhaltens und der Empfindlichkeit! Insbesondere ein altes U87 (ohne nachgestelltes i) reagierte mit deutlichen Änderungen im Klirrverlauf auf die Änderung der Phantomspannung. Da dieses Mikrofon in vielen Studios aber immer noch als „Referenzmikrofon“ verwendet wird, verwundert es nun weniger, wenn in diesem Zusammenhang oft Diskussionen über den geeigneten Vorverstärker und die geeignete Verkabelung geführt werden. Diese haben nicht nur aufgrund ihrer Verstärkungseigenschaften einen Einfluss auf den Klang, sondern beeinflussen über die Phantomspeisung auch direkt den Klirrfaktor. Bei anderen

Mikrofonen konnte ein entsprechender Zusammenhang nicht festgestellt werden! Allerdings sind moderne Mikrophone von Neumann immer intern spannungsstabilisiert, so daß solche Veränderungen nicht mehr möglich sind, und es standen bei Neumann nur relativ wenige Mikrophone von Fremdherstellern zur Verfügung. Bei den späteren Messungen in Graz, stand leider die Phantomspeiseeinheit von Neumann nicht zur Verfügung, so dass dieses Phänomen nicht weiter untersucht werden konnte.

Durch die vorsichtige Wahl des Messabstandes war dieser leider tendenziell etwas groß, was zu einigen Problemen bei der Kalibrierung führte. Die Lautsprecher zeigten eine langsame Drift bei den hohen Messpegeln, was eine Kalibrierung unmöglich machte. Der Messpegel wurde deshalb von den ursprünglich angestrebten 107dB auf 104dB SPL abgesenkt. Gerade bei dynamischen Mikrophenen mit geringerer Empfindlichkeit entpuppte sich auch die Mikrophonvorstufe der Soundkarte als begrenzendes Messglied. So wie bei Mikrophenen mit stärkerem Eigenrauschen sank die Messkurve des Kapselklirrfaktors dann unterhalb einer Grenzfrequenz auf einen konstanten Wert, so dass keine Aussage mehr darüber gemacht werden konnte, woher der Klirrfaktor stammt, oder wie er sich äussert.

Für einen weiteren ärgerlichen Fehler sorgte das Messmikrophon, welches für diese Aufgabe zum ersten Mal verwendet wurde. Durch einen Defekt war die Höhenwiedergabe leider nicht korrekt, so dass alle Messungen mit einem neuen Exemplar wiederholt werden mussten.

3.6 Messaufbau und verwendetes Equipment am IEM in Graz

Im Rahmen des Mikrophonvergleichs der Studierendenvertretung Toningenieur war eine große Anzahl Mikrophone verschiedener Hersteller verfügbar. Es wurde die Differenztonmessung auf der Universität aufgebaut, um eine große Menge an Datensätzen zum Klirrverhalten von Mikrophenen anderer Hersteller als Neumann zu bekommen. Da die Mikrophone für Testaufnahmen unter vergleichbaren Bedingungen von den Studierenden verwendet wurden, gab es subjektive Eindrücke und Meinungen, die mit den Messergebnissen vergleichen werden konnten.



Abbildung 12: Messaufbau am IEM in Graz

In Graz wurde das Setup zur Messung mit folgendem Equipment aufgebaut:

- PC mit Linux - Betriebssystem und PD, Windows Rechner für die Messdatenauswertung
- RME Madi - Interface + RME Madi-Adat Bridge. Behringer 8fach AD Converter mit Mikrofonvorverstärker
- Reflexionsarmer Testraum des Instituts, reflexionsarm ab ca. 500 Hz
- Koaxial aufgebaute Studiemonitore von Tannoy auf Studiolausprecherstativ
- 3 Laserpointer auf Mikrofonstativen befestigt, die den Mittelpunkt der Membran im Abstand von 30cm vor der Box und auf der Höhe des Hochtöners durch den Schnittpunkt ihrer Strahlen optisch markierten.
- Audix TR40 Messmikrophon

Durch die Laserpointer konnten die Membranen sehr genau in Position gebracht werden, somit war auch der geringere Abstand zu den Boxen aufgrund des begrenzten Schalldrucks derselben kein Problem.

Allerdings zeigte eine Box bei der Kalibrierung einen Pegelverlust von etwa 10dB bei 17kHz. Dieser trat nur bei einer einzelnen Frequenz und auch nur bei einer der Boxen auf, und ließ sich durch den Aufbau nicht ausgleichen. Vermutlich handelt es sich um eine Fertigungstoleranz des Hochtöners. Da der Messpegel nicht um 10 dB abgesenkt werden sollte, um den Frequenzgang zu linearisieren, und eine Anhebung den Lautsprecher übersteuert hätte, wurde der Korrekturfrequenzgang von Hand bei dieser Frequenz editiert. Somit ergab sich ein deutlicher Messfehler bei 17kHz, dafür aber ein guter nutzbarer Dynamikbereich bei anderen Frequenzen. Der Messfehler ist bei den Messungen deutlich sichtbar und kann leicht ignoriert werden.

In den Diagrammen sieht man einerseits die Auswirkungen auf die Messgrenze, andererseits auf die Frequenzgänge des Differenztonfaktors.

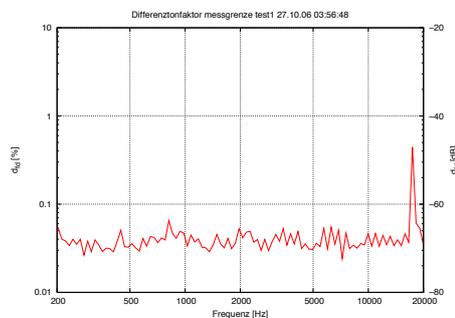


Abbildung 13: Messgrenze des Differenztonfaktors am IEM

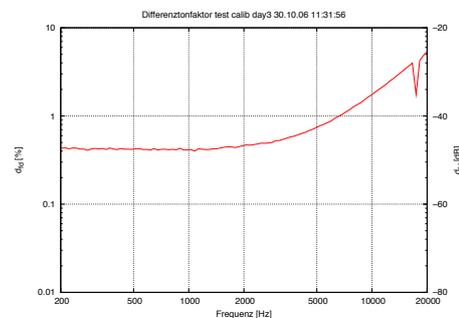


Abbildung 14: Messfehler durch die nötige Korrektur

3.7 Portabler Messaufbau auf der Tonmeistertagung

Zur Vorführung des Projektes „Differenztonmessung“ wurde ein stark verkleinerter Messaufbau konstruiert, anhand dessen das Prinzip auf der Tonmeistertagung am Stand der Universität vorgeführt wurde.

Ursprünglich nur als Demonstrationsobjekt gedacht, stellte sich jedoch heraus, daß man damit sogar - in deutlichen Grenzen - verwertbare Messungen durchführen kann.

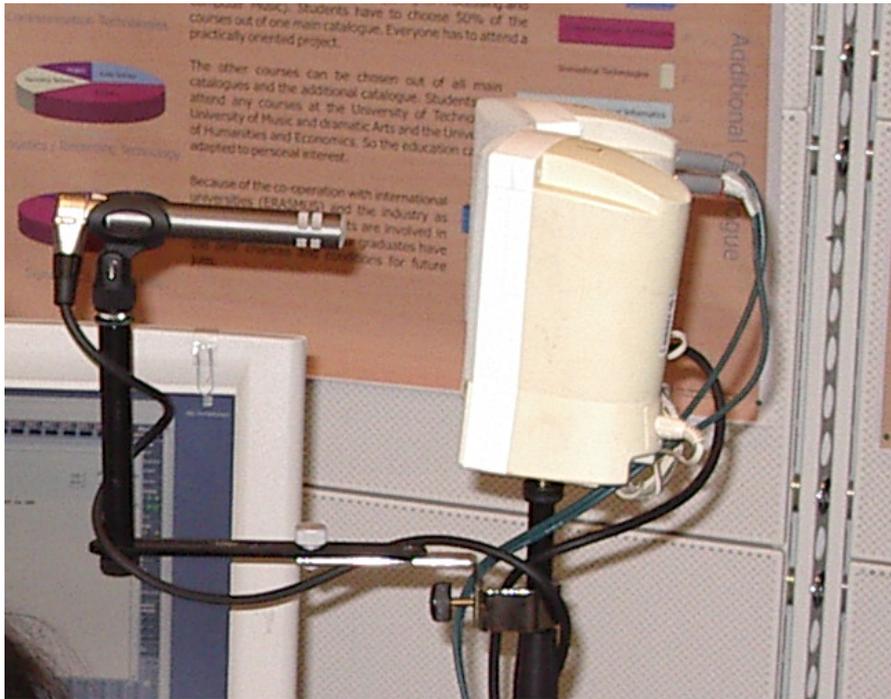


Abbildung 15: Portabler Messaufbau auf der Tonmeistertagung

- Laptop mit Windows - Betriebssystem, PD, Tcl/Tk
- RME Fireface
- Kein reflexionsarmer Raum, der Aufbau stand auf einem kleinen Tischstativ auf einem Schreibtisch am Messestand
- Alte PC-Aktivlautsprecher mit kleinem, ovalen Breitbandchassis von Lenco. Ca. 2.5Watt, modifiziert mit externem Netzteil (wegen Brummproblemen) und eingeklebten Mikrophongewinden zur Befestigung
- Halterung aus mehreren Stereoschienen, einer Klemmhalterung für Mikrophonstative und Distanzstücken. Mikrofonabstand unter 10cm.
- Behringer ECM8000 Messmikrophon (älteres Exemplar mit freifeldentzerrtem Frequenzgang!)

Da kein reflexionsarmer Raum vorhanden war, die Lautsprecher nur sehr wenig Schalldruck erzeugen konnten und der Aufbau in einer Messehalle mit starken Umgebungsgeräuschen stand, wurde eigentlich nicht mit verwertbaren Ergebnissen gerechnet. Dennoch stellte sich heraus, dass die Messergebnisse im mittleren Bereich durchaus den Ergebnissen der anderen Messsituationen entsprachen.

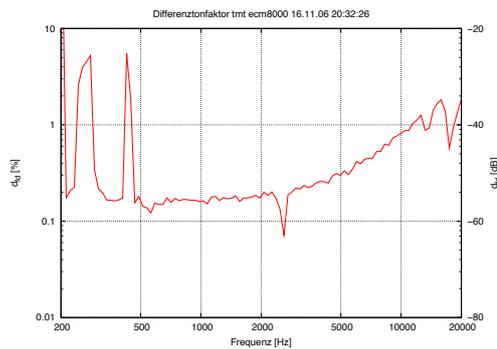


Abbildung 16: Messung eines ECM 8000 am Messestand auf der Tonmeistertagung

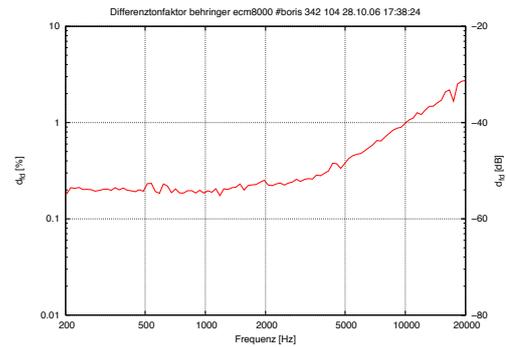


Abbildung 17: Messung eines ECM 8000 im IEM

Die kleinen Lautsprecher produzierten dabei erst oberhalb von 500Hz ausreichend Pegel für ein auswertbares Ergebnis. Durch Reflexionen vom Tisch und vor allem durch die Veränderlichen Störgeräusche ergeben sich einzelne Ausreisser auch im mittleren Frequenzbereich. Oberhalb von 15kHz kann der Lautsprecher auch nicht mehr ausreichend linearisiert werden. Bei diesen Frequenzen dürfte die Positionsungenauigkeit bei dem kleinen Aufbau aber auch schon eine sehr große Rolle im Messfehler spielen.

Durch die sehr nahe Positionierung spielt der Nahbesprechungseffekt trotz der hohen unteren Grenzfrequenz eine Rolle. Sein Einfluss ist noch sichtbar.

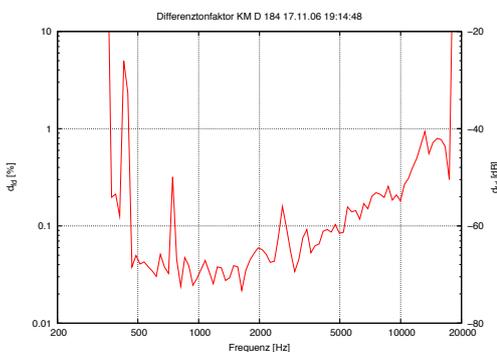


Abbildung 18: Messung eines KMD 184 am Messestand auf der Tonmeistertagung

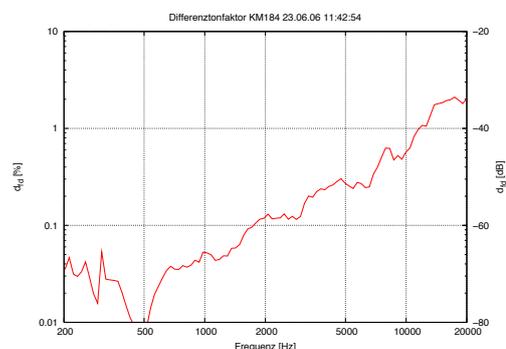


Abbildung 19: Messung eines KM184 bei Neumann

Bei den beiden Mikrofonen wird die selbe Kapsel verwendet und die Elektronik des Impedanzwandlers ist auch vergleichbar. Abgesehen vom kleineren Frequenzbereich und

der eingeschränkten Dynamik mit einzelnen Störungen unterscheidet sich das Ergebnis nur durch den leichten Bassanstieg durch den Nahbesprechungseffekt. Dabei wurde keine der Messungen nachträglich geglättet!

Es sind also mit diesem primitiven Aufbau durchaus Messungen möglich, z. B. um den frequenzabhängigen Klirrverlauf eines Mikrofons vor Ort grob einzuschätzen. Bei etwas ruhigerer Umgebung und etwas hochwertigeren Komponenten dürften mit einem Messaufbau in dieser Größe durchaus interessante Ergebnisse zu erzielen sein!

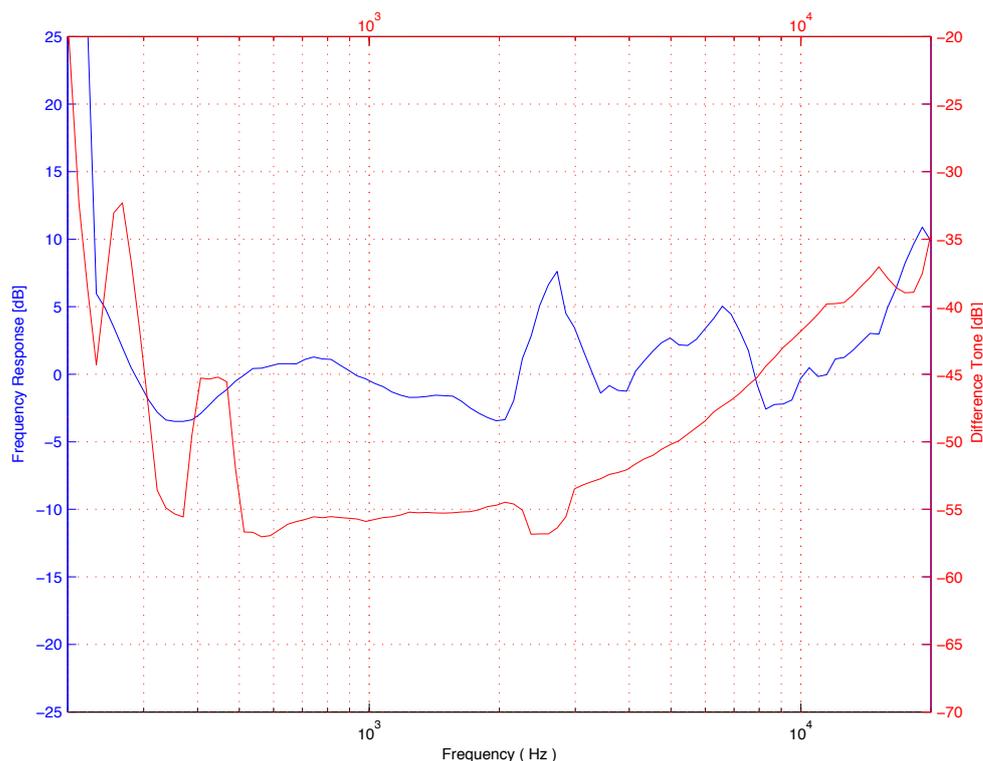


Abbildung 20: Nötiger Korrekturfrequenzgang für einen Lenco Lautsprecher (blau) und Differenztonfaktor des ECM8000 (rot), mit Matlab ausgewertet.

Die Grafik zeigt nochmals die extremen Korrekturen die zur Korrektur der Lautsprecherfrequenzgänge nötig waren, sowie den Differenztonverlauf des ECM8000. In der hier gezeigten Auswertung mit Matlab wurden die Kurven mit der Standardfunktion „smooth(X)“ der Software geglättet.

Auf der Messe war es mit diesem Aufbau möglich den verbauten Kapseltyp in einem unbekanntem Mikrophon zu identifizieren!

4 Messung mit PD

Es ist mit PD nicht nur möglich künstlerische Projekte der elektronischen Musik zu verwirklichen, sondern die objektorientierte, graphische Programmiersprache von Miller Puckette mit ihrer „Wahlheimat“ am IEM hat sich inzwischen zu einem leistungsfähigen Tool in der Signalverarbeitung entwickelt, mit dem noch deutlich komplexere Messabläufe realisiert werden können. Für mich war dieses Projekt der Einstieg in die Programmierung mit Pure Data.

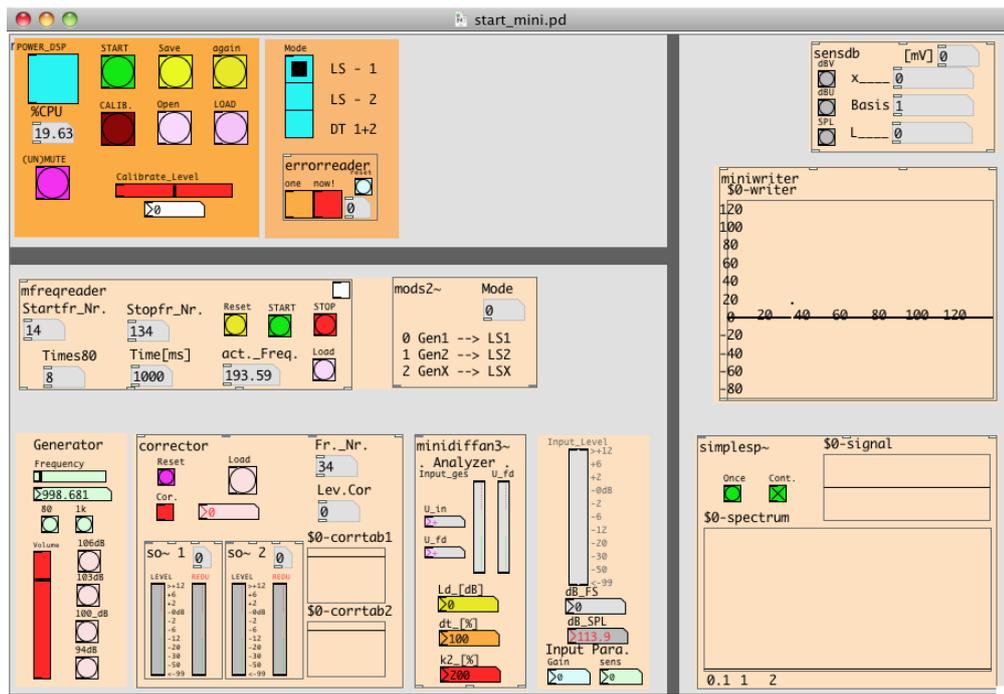


Abbildung 21: Oberfläche des Messpatches in PD

4.1 Aufbau

Die Oberfläche ist in 3 Teile gegliedert: Im linken oberen Teil befinden sich alle Bedienelemente, die der Anwender normalerweise benötigt, sobald das Messsetup einmal eingerichtet ist. Zur Bedienung reicht dann die Kurzbedienungsanleitung (D).

Ausserdem wird hier der Messmodus umgeschaltet und es werden Messfehler die vom Programm erkannt werden (Übersteuerung, Überschreitung vorgegebener Wertebereiche) angezeigt.

Im unteren linken Teil befinden sich die Module, welche die eigentliche Messung übernehmen. Hier werden die aktuellen Ein- und Ausgabewerte angezeigt. Zum Einrichten des Systems können hier zusätzliche Eingaben gemacht werden.

Im rechten Teil befinden sich zusätzliche Module. Einerseits wird hier das Array mit dem Messergebnis angezeigt, um den Messfortschritt überprüfen zu können und das grobe Ergebnis zu sehen. Andererseits befinden sich hier zwei zusätzliche Module, die nichts mit der direkten Messung zu tun haben, aber hilfreich beim Konfigurieren und Überwachen sind:

Ein kleiner Rechner zur Umrechnung der Empfindlichkeit von Mikrofonen in dBV, dBU oder dB SPL. Und ein sehr einfacher Echtzeit-Spektrums-Analyzer, mit dessen Hilfe die Vorgänge im Messraum grob abgeschätzt werden können.

4.2 Eingangsmodul

Im Eingangsmodul wird der Eingangspegel in dB-Fullscale angezeigt. Bei korrekter Eingabe der Verstärkung des Eingangs der Soundkarte (Gain) und der Empfindlichkeit des Mikrophons (sens) in Millivolt, wird auch der Schalldruckpegel korrekt angezeigt.

Für die korrekte Berechnung innerhalb von PD mussten teilweise recht gewöhnungsbedürftige Skalierungen vorgenommen werden. So konnten manche Objekte z.B. nicht mit negativen dB-Werten rechnen, weshalb der gesamte Wertebereich für die interne Berechnung zunächst deutlich nach oben verschoben wurde. Vor den Ausgaben wurde dann wieder eine Rücktransformation in den realen Wertebereich vorgenommen.

Alle Berechnungen wurden mit den zu erwartenden Ein- und Ausgangspegeln überprüft, und mit anderen Messungen verglichen um sicherzustellen, dass im Betriebsbereich keine relevanten Fehler erzeugt werden.

4.3 Berechnung des k_2

Über einen Bandpass 10. Ordnung wird der 80 Hz Anteil aus dem Gesamtsignal gefiltert. Entsprechend erhält dieses einen schmalbandigen Bandstopfilter 10. Ordnung bei der gleichen Frequenz. Alle aufgenommenen Werte werden über die eingestellte Messzeit gemittelt. Diese ist sinnvollerweise als ein ganzzahliges Vielfaches einer 80 Hz Periode zu wählen, um Störungen zu reduzieren und den 80 Hz Anteil möglichst genau zu messen. Voreingestellt ist eine Messzeit von 1000 ms pro Frequenz. In diesem Takt werden die Frequenzen durchgestept. Dabei wird allerdings nicht die gesamte „Spielzeit“ einer Frequenz gemessen. Es wird zunächst abgewartet bis das System eingeschwungen ist. Erst nach 850ms wird das Signal für 10 Perioden auf einen Tiefpassfilter mit 125ms Mittelungszeit gegeben. Dessen Ausgang wird abgefragt und gespeichert, bevor die Frequenzen auf den nächsten Wert erhöht werden.

Die Pegelfehler der Filter wurde experimentell ermittelt und mittels Skalierungsfaktoren ausgeglichen. Die korrigierten Pegel werden angezeigt und ausgegeben. Vor der Berechnung der Verzerrungen kann auch noch eine Pegelkorrektur zur Kalibrierung vorgenommen werden.

Der Differenztonanteil wird durch Division mit dem Pegel des 80Hz Anteils im Zähler und dem Pegel des verbleibenden Signals im Nenner durchgeführt. Skalierungen werden keine durchgeführt, da sich die Normen über den Skalierungsfaktor nicht einig sind und dieser leicht später hinzugefügt werden kann.

Die Werte werden in Prozent und dB ausgegeben. Eine näherungsweise Anzeige des Klirrfaktors erfolgt einfach durch Multiplikation des Differenztonfaktors mit dem Faktor 2.

4.4 Steuerung des Messablaufs

Zur Steuerung des Messablaufs wird eine Frequenzliste aus einer Datei gelesen. Die entsprechenden Frequenz sowie die um 80 Hz erhöhte Frequenz werden von zwei Sinusgeneratoren erzeugt und auf die zwei Lautsprecher gegeben. Dabei wird die Lautstärke entsprechend des gemessenen Frequenzgangs der Lautsprecher angepasst. Hierzu wird einfach der vorher gemessene Pegel bei der gleichen Frequenz mit dem Sollpegel verglichen, und die Lautstärke entsprechend der Frequenz angepasst. Wird dabei der mögliche Wertebereich der Ausgabe überschritten wird ein Fehler ausgegeben.

Mit der eingestellten Messzeit wird die Frequenz von der eingestellten Startfrequenz bis zur Endfrequenz erhöht, und die der Vorgang für jede Frequenz durchgeführt.

4.5 Lesen und Speichern von Daten

Die Eingangswerte werden in ein Array geschrieben und können nach einem Messdurchlauf gespeichert werden. Je nach eingestelltem Modus wird entweder der Pegel des ersten Lautsprechers, der Pegel des zweiten Lautsprechers oder der der Pegel des Differenztons aufgezeichnet.

Die Daten werden in eine Textdatei mit der Endung die dem Messmodus entspricht gespeichert. Somit kann anhand der Dateiendung bestimmt werden um welche Werte es sich handelt. Die Korrekturwerte für die beiden Lautsprecher müssen vor der Messung im Differenztonmodus wieder eingelesen werden.

Alle Werte werden in dB gespeichert, so können insbesondere bei Ausreißern im Frequenzgang einzelne Werte - beispielsweise zum Lautsprecherschutz - von Hand editiert werden.

4.6 Ungenauigkeiten und Fehlerquellen

Ungenauigkeiten entstehen hauptsächlich im Messaufbau durch falsche Mikrofonpositionierung, und dadurch veränderte Pegel. Auch bei der Messung des Referenzpegels oder der Eingabe der Mikrofonempfindlichkeit können Fehler entstehen. Als weitere Fehlerquellen im Messaufbau wurden bereits die Temperaturdrift und Fehler des Referenzmikrophons erwähnt.

Durch das Rauschen der Verstärker und den maximalen erreichbaren Pegel wird der Dynamikbereich begrenzt. Insbesondere tieffrequente Geräusche können zu Messausreißern führen.

Der Betrieb mit gänzlich anderen Pegeln als zur Messung vorgesehen könnte die Skalierungen und Umrechnungen, die im PD-Patch gemacht wurden in Frage stellen. Für die voreingestellten Werte wurde die Funktion recht ausführlich überprüft.

Wie bei jeder Messung bleiben Bedienfehler als potentielle Fehlerquelle.

4.7 Frequenzliste für die Messung

Es wurden die Frequenzen für die Messung verwendet, die bei Neumann auch zur Frequenzgangsmessung der Mikrophone verwendet werden:

40.00 41.90 43.89 45.97 48.15 50.44 52.83 55.34 57.97 60.72 63.60 66.62 69.78
73.10 76.57 80.20 84.01 88.00 92.17 96.55 101.13 105.93 110.96 116.23 121.75
127.53 133.58 139.92 146.56 153.52 160.81 168.44 176.44 184.81 193.59 202.78
212.40 222.48 233.05 244.11 255.70 267.83 280.55 293.87 307.82 322.43 337.73
353.77 370.56 388.15 406.57 425.87 446.09 467.27 489.45 512.68 537.02 562.51
589.21 617.18 646.48 677.17 709.31 742.99 778.26 815.20 853.90 894.43 936.89
981.36 1027.95 1076.75 1127.86 1181.40 1237.48 1296.22 1357.75 1422.21 1489.72
1560.44 1634.51 1712.10 1793.37 1878.50 1967.68 2061.08 2158.92 2261.41 2368.76
2481.20 2598.98 2722.36 2851.59 2986.95 3128.74 3277.26 3432.84 3595.79 3766.48
3945.28 4132.56 4328.73 4534.22 4749.46 4974.92 5211.07 5458.44 5717.56 5988.97
6273.27 6571.06 6882.99 7209.72 7551.97 7910.46 8285.97 8679.30 9091.31 9522.87
9974.92 10448.43 10944.42 11463.95 12008.15 12578.17 13175.26 13800.69 14455.81
15142.02 15860.82 16613.73 17402.38 18228.47 19093.78 20000.16

Um Zeit zu sparen wurde jedoch nicht bei 40 Hz, sondern erst bei der 14. Frequenz mit der Messung begonnen, da Werte unter 80Hz ohnehin nie gültige Ergebnisse erzeugen können.

4.8 Darstellung der Messdaten

Die Darstellung der Messdaten erfolgt über ein Tcl/Tk - Skript mittels Gnuplot. Der Vorteil ist die freie Verfügbarkeit der Software-Pakete sowie deren Verwenbarkeit auf vielen Betriebssystemen. So konnten die Auswertungsskripte später ohne große Modifikationen auf einen Mac portiert werden. Somit kann zum heutigen Zeitpunkt sowohl die Messung als auch die Auswertung ohne den Kauf kostenpflichtiger Programme auf Windows, auf dem Mac und auf Linux-Systemen durchgeführt werden.

Nötig sind hierfür:

- Tcl/Tk (z. B. von <http://www.activestate.com/activetcl/downloads/>)
- Gnuplot (z. B. von <http://gnuplot.sourceforge.net/download.html>)
- und natürlich PD samt der typischen Standardlibrarys (z.B. von pd.iem.at) für die Messung

Alternativ wurde auch ein Matlabskript für die Darstellung der Frequenzgänge und der Differenztonverläufe verwendet. Matlab bietet den Vorteil besonders einfacher Implementierbarkeit, ist jedoch kostenpflichtig.

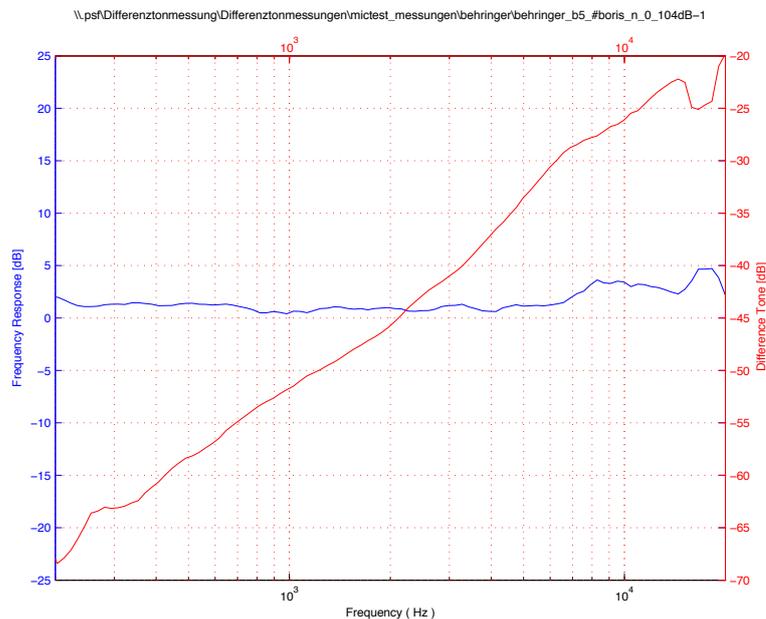


Abbildung 22: Auswertung von Frequenzgang und Differenzton eines Behringer B5 mit Matlab

4.9 Anmerkungen aus heutiger Sicht

Mit der heutigen Programmiererfahrung könnten der PD-Patch etwas einfacher und exakter programmiert werden. Nachdem mit dem Patch allerdings bereits viele Messungen durchgeführt wurden, und das debugging und der Praxistest somit abgeschlossen ist macht es für mich keinen großen Sinn, den Patch zu verändern, solange man keine anderen Funktionen hinzufügen will.

Ein Verändern eines Messprogramms ist immer mit recht langwierigen Testreihen verbunden, um sicherzustellen, dass die gemessenen Werte auch der Realität entsprechen und reproduzierbar sind.

4.10 Anwenderfreundlichere Implementation der Software bei Neuman⁸⁷

Sollte der Patch allerdings verändert werden wäre es vermutlich das einfachste ihn in Anlehnung an den Alten neu zu programmieren. Hierbei sollte sowohl innerhalb des Patches als auch bei der „Bedienoberfläche“ auf einfachere Gestaltung und mehr Übersichtlichkeit geachtet werden.

Der Nachteil von PD ist nach wie vor die schlechte Dokumentation, verglichen mit kommerziellen Programmierumgebungen (wie z. B. Matlab), der Vorteil die schnelle und leistungsfähige Signalverarbeitung.

Mögliche einfache Erweiterungen wären eine direkte Anzeige der Messergebnisse der Klirrfaktormessung sowie der Frequenzgänge. Auch ein Ermitteln von d_3 könnte hinzugefügt werden.

Im Wesentlichen sollte aber das Benutzerinterface vereinfacht und auf die wirklich nötigen Funktionen beschränkt werden.

4.10 Anwenderfreundlichere Implementation der Software bei Neumann

Bei Neumann wurde die prinzipiell gleiche Messsoftware nochmals neu programmiert, um in das bestehende Messsetup integriert zu werden. Hierbei wurde vor allem aus Gründen der Übersichtlichkeit und des Benutzerinterfaces, aber auch aufgrund der fehlenden „PD - Programmierer“ in der Firma auf PD verzichtet. Der gesamte Code wurde in Tcl/Tk und C geschrieben. Zur Ausführung ist zusätzlich Snak2.2 (z.B. von <http://www.speech.kth.se/snack/>) als Signalverarbeitungserweiterung für Tcl/Tk erforderlich und Gnuplot für die Darstellung. Mittels Freewrap wurden aus dem ganzen ausführbare Windows-Programme gemacht, die von jedem Mitarbeiter ohne Probleme zu bedienen sind.

Für den internen Gebrauch werden damit die Klirrfaktormessungen der Mikrophone durchgeführt. Das Programm wurde mir von Jürgen Breitlow freundlicherweise zur Ansicht zu Verfügung gestellt.

4.10 Anwenderfreundlichere Implementation der Software bei Neuman³⁸

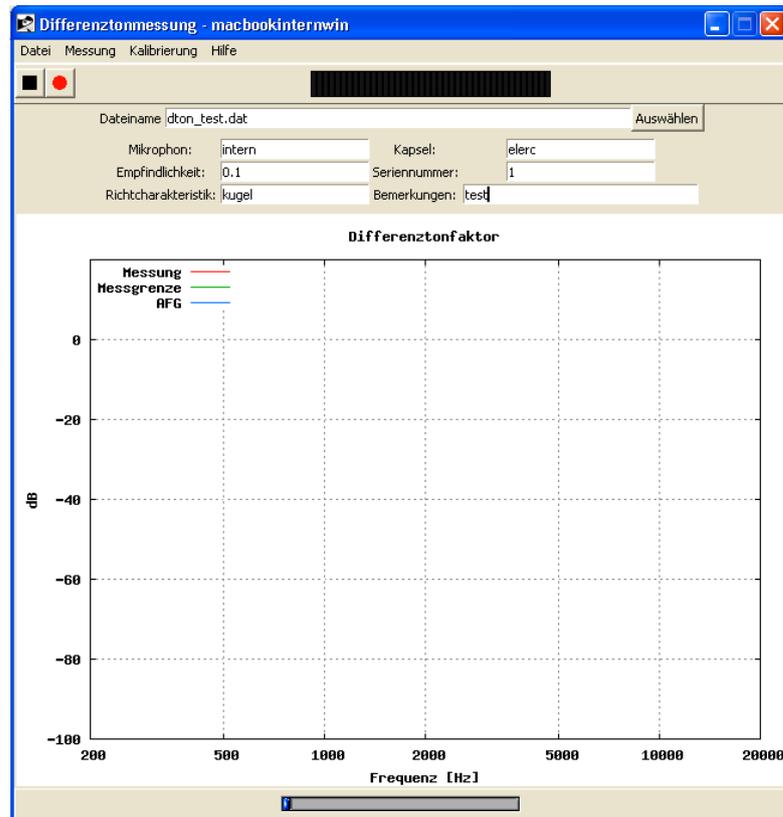


Abbildung 23: Oberfläche der Messsoftware bei Neumann

5 Kategorisierung von Mikrofonen anhand der frequenzabhängigen Klirrverläufe

Insbesondere bei gerichteten Mikrofonen zeigen sich durchaus wahrnehmbare Klirr- bzw. Differenztonanteile. Dabei ist der Anstieg des d_2 bei hohen Frequenzen in der Praxis nicht so dramatisch wie es scheint. Gerade in Situationen, in welchen das Mikrofon hohen Schalldrücken ausgesetzt ist, handelt es sich oft um einstimmige Soloinstrumente, wo die Verzerrungsprodukte harmonisch sind. Im hohen Frequenzbereich liegen die Obertöne ohnehin ausserhalb des menschlichen Hörbereichs. Auch bei polyphonen Quellen ist das Spektrum bei hohen Frequenzen selten so dicht, daß sich deutlich wahrnehmbare Differenztonanteile ergeben. Dies ist maximal bei geräuschartigen Anteilen der Fall, wo die Verzerrungsprodukte aber ebenfalls geräuschartigen Charakter vorweisen.

Es konnten jedoch einige Auffälligkeiten bei verschiedenen Mikrofontypen und verschiedenen Einsatzbereichen festgestellt werden, die in diesem Kapitel festgehalten werden.

5.1 dynamische Mikrophone

Dynamische Mikrophone zeichnen sich durch einen relativ robusten Aufbau und normalerweise durch den völligen Verzicht auf aktive Elektronik im Mikrofon aus. Sie haben einen verhältnismäßig geringen bauartbedingten Klirrfaktor und eine sehr hohe Aussteuerbarkeit. Ihr Dynamikbereich ist praktisch nur nach unten durch das Eigenrauschen des Kupferwiderstands der Tauchspule begrenzt (4).

Allerdings ist auch die Empfindlichkeit verhältnismäßig gering, verglichen mit modernen Kondensatormikrofonen. Das typische Eigenrauschen liegt in Verbindung mit der Mikrofonvorstufe meist oberhalb von 18dB(A) und begrenzt die Messung des Differenztons. Dieser wird daher erst bei hohen Frequenzen sichtbar.

Aufgrund der Unterschiede in der Elektronik sind dynamische und Kondensatormikrophone nur schwer vergleichbar. Das Broadcastmikrofon von Neumann gibt es als BCM104 mit Kondensatorkapsel und als BCM 705 mit einem dynamischen Wandler. Beide sind für den Einsatz im Nahbereich ausgelegt, und haben relativ ähnliche Beschaltungen. Durch die gute Kapselanpassung an die integrierte Elektronik hat die dynamische Kapsel ein geringeres Eigenrauschen als übliche Vertreter und der Klirrfaktor wird messbar.

Er ist im mittleren Frequenzbereich sehr gering, zeigt aber eine deutliche Spitze bei etwa 6-7 kHz, ähnlich wie viele Großmembranmikrophone. Dem gegenüber hat die Kondensatorvariante einen etwas höheren Klirrfaktor im mittleren Frequenzbereich, der

aber zu den Höhen nur wenig und gleichmäßig ansteigt. Auffällig beim BCM705 ist auch der Anstieg des Differenztonanteils im Bereich unter 500Hz, der bei der Kondensatorvariante nicht zu beobachten ist.

Auch das RE20 von Electro Voice zeigt einen Anstieg im Klirrfaktor bei den tiefen Frequenzen. Ansonsten sind die Verzerrungen bei diesem Mikrophon mit Nierencharakteristik bemerkenswert gering. Sie liegen in weiten Teilen sogar unterhalb der Messgrenze des Testaufbaus. Das könnte erklären, warum dieses Mikrophon bei sehr lauten Instrumenten im Nahbereich, aber auch als Sprechermikrophon im Radio sehr beliebt ist.

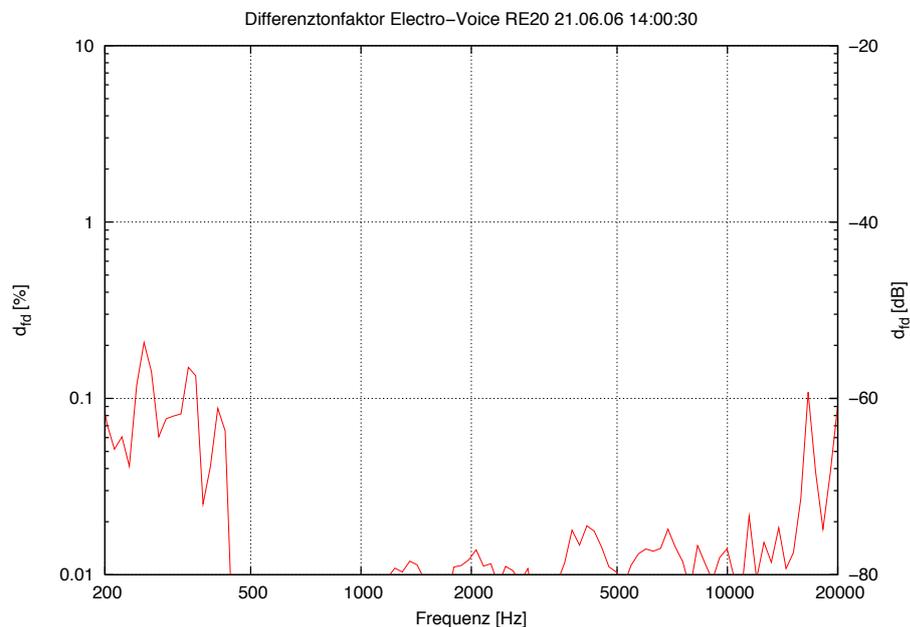


Abbildung 24: Dynamisches Großmembranmikrophon RE20 von Elektro Voice mit sehr ungewöhnlicher Ausführung des Laufzeitgliedes

Das RE20 hat eine sehr große Membran und einen sehr ungewöhnlichen, großen Aufbau des Laufzeitgliedes. Die Werbung verspricht, dass dadurch der Nahbesprechungseffekt ausgeglichen wird. Dies wurde in Messungen untersucht, konnte aber nicht nachvollzogen werden. Die übrigen technischen Daten können dennoch überzeugen.

Auch das MD441 von Sennheiser bietet einen guten Störabstand und geringe Verzerrungen die in den Höhen nicht merklich ansteigen.

Anhand der Exemplare die gemessen werden konnten, lässt sich also festhalten, daß gute dynamische Mikrophone durchaus mit sehr geringen Differenztonfaktoren punkten können. Bei den typischen, weit verbreiteten Vertretern dieser Gattung (z.B. Shure SM57 / SM58) lässt sich jedoch keine wirkliche Aussage machen, da der Differenztonfaktor aufgrund der Empfindlichkeit im Rauschen der Mikrophonvorstufe nicht mehr sichtbar war. Es wurde lediglich ein Anstieg des Klirrfaktors in den Höhen, ähnlich wie er später bei den Stützmikrophenen (5.5.3) beschrieben wird festgestellt. Es bleibt festzuhalten, dass es auch innerhalb der dynamischen Mikrophone sehr unterschiedliche Klirrverläufe gibt.

5.2 Bändchenmikrophone

Bändchenmikrophone verfügen, wenn sie wie die meisten Vertreter dieser Gattung als reiner Druckgradientenempfänger ausgeführt werden, über einen sehr symmetrischen Kapselaufbau, so daß mit einem geringen d_2 zu rechnen ist. Leider ist auch ihr Ausgangspegel meist sehr gering, und das Klirrverhalten dürfte stark durch die Vorstufe und die schwierige Anpassung des Bändchens beeinflusst sein.

Für die Messung stand leider nur ein Mikrophon zu Verfügung, das bereits im Frequenzgang nicht überzeugen konnte. Somit war auch die Differenztonmessung nicht wirklich auswertbar. Ausser dem starken Grundrauschen war nur auffällig, dass kein besonderer Höhenanstieg sichtbar war.

Aufgrund der fehlenden Vergleichsdaten kann hier aber keine weitere Aussage gemacht werden.

5.3 Kondensatormikrophone

Kondensatormikrophone sind der heute vorherrschende Mikrophontyp bei hochwertigen Aufnahmen. Sie erreichen bei modernen Schaltungen die höchsten nutzbaren Dynamikbereiche und die gleichmäßigsten Frequenzgänge, sowie ein gutes Impulsverhalten durch sehr kleine Membranmassen. Die Dynamik wird allerdings immer noch durch die eingebaute Elektronik begrenzt, die Kapsel an sich könnte Dynamikwerte über 140dB umsetzen.

Beim verbreiteten Aufbau mit einer Gegenelektrode entstehen unsymmetrische Verzerrung, hauptsächlich zweiter Ordnung. Komponenten höherer Ordnung entstehen erst in der Nähe der Aussteuerungsgrenze durch die Elektronik. Im linearen Aussteuerungsbereich hat die Richtcharakteristik, die Kapselbauform bzw. der innere Aufbau der Kapsel, die Kapselgröße und die Anpassung der Elektronik Einflüsse auf den Klirrverlauf.

5.3.1 Kleinmembranmikrophone

Die getesteten Kleinmembranmikrophone hatten in der Regel geringe Klirrfaktoren im unteren und mittleren Frequenzbereich, besonders bei Kugelcharakteristik. Teils versanken diese im untern Bereich im Rauschen, vor allem bei sehr kleinen Kapseln, wie sie zum Beispiel bei Messmikrofonen verwendet werden. Die meisten Kapseln zeigen einen Anstieg des Klirrfaktors in den Höhen. Bei gerichteten Mikrofonen wurden in der Regel höhere Differenztonfaktoren beobachtet.

5.3.2 Großmembranmikrophone

Auch Großmembranmikrophone zeigen einen Klirrverlauf der von der Richtcharakteristik abhängig ist. Dies kann sogar bei Mikrofonen mit schaltbarer Charakteristik beobachtet werden. Auch hier zeigt die Kugel in der Regel geringere Klirrfaktoren als die Acht.

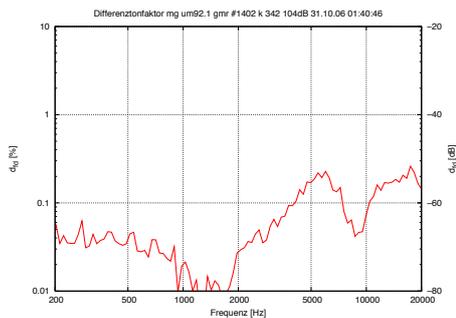


Abbildung 25: Microtech Gefell UM92 als Kugel

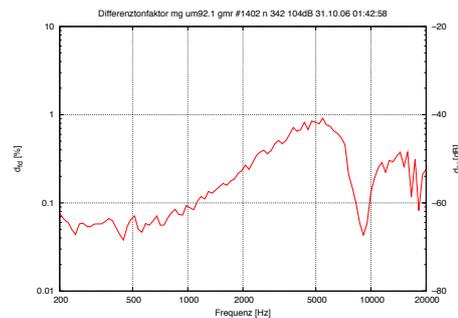


Abbildung 26: Microtech Gefell UM92 als Niere

Lediglich eines der gemessenen Mikrophone weicht hier deutlich vom Schema ab: Beim U89 sind die Verhältnisse umgekehrt und die Kugel hat den höchsten Differenztonanteil.

Ob der Klirrverlauf der Niere dabei näher an der Kugel oder der Acht liegt ist bei verschiedenen Typen recht unterschiedlich.

Generell zeigen die Großmembranmikrophone höhere Klirrfaktoren in den oberen Mitten als die meisten Mikrophone mit kleiner Membran. Dafür steigt dieser in den Höhen weniger an, bricht sogar meist unterhalb 10 kHz nochmals ein. Mögliche Erklärungen hierfür wurden in den Abschnitten über die Kapselbauform beschrieben.

5.4 Mikrophone mit symmetrischem Aufbau der Kapsel

Mikrophone mit symmetrischem Kapselaufbau sollten eigentlich deutlich überlegene Werte zeigen. Die Überprüfung zeigte sich schwerer als gedacht, weil solche Mikrophone nur von einem Hersteller verfügbar waren und hier auch der restliche Mikrophonaufbau deutliche Unterschiede vorwies.

In der Tat zeigten die getesteten Exemplare der Sennheisser MKH Serie auch bei den Druckgradienten recht geringe Verzerrungen. Trotz der theoretisch größeren Symmetrie beim reinen Druckgradientenempfänger wurden die geringsten Zahlenwerte dennoch bei Mikrophonen mit Kugelcharakteristik festgestellt.

Erschwerend kam hinzu, dass durch die elektronische Entzerrung zwar geringe Abwertete Störpegel erreicht wurden, die teilweise in Bezug auf die Kapselgröße hervorstechen, allerdings scheinen die Störpegel und vielleicht auch die Verzerrungen im Bassbereich deutlich höher zu sein, was eventuell auch auf die Abstimmung der Kapsel mit einer maximaler Empfindlichkeit bei 5kHz zurückzuführen ist. Dies macht es schwer zu beurteilen, welche Unterschiede nun wirklich durch den symmetrischen Kapselaufbau hervorgerufen werden.

Die Werte der Mikrophone mit symmetrischem Kapselaufbau werden dennoch von einigen Mikrophonen von DPA übertroffen, die keinen symmetrischen Kapselaufbau haben, aber mit vorpolarisierten Membranen und hohen Vorspannungen arbeiten. Dies lässt erahnen, dass der symmetrische Kapselaufbau zumindest nicht der einzige Weg ist, die Mikrophonverzerrungen deutlich zu senken.

5.5 Auffällige Bereiche im Klirrfaktor und typische Einsatzgebiete von Mikrophonen

Bei den Messungen am IEM im Rahmen des Mikrophonvergleichs viel auf, daß einige Mikrophone für einen typischen Einsatzbereich beliebt waren. Natürlich ist hierfür nicht nur der Klirrfaktor verantwortlich, sondern es gehen viele Faktoren in so eine Bewertung ein, die auch subjektiv recht unterschiedlich ausfallen kann.

Dennoch lassen sich die Unterschiede teilweise schwer aus den technischen Daten belegen. Die Untersuchung der Klirrfaktoren gab hier neue, interessante Anhaltspunkte. Allerdings konnten nicht alle Mikrophone anhand ihres Klirrfaktors kategorisiert werden.

Die Frequenzgänge wurden hierbei der Datenbank von Rycote (18) entnommen, und berücksichtigen nicht den Nahbesprechungseffekt bei der Messung!

5.5.1 Gesangsmikrophone oder universelle Solistenmikrophone

In diese Gruppe fallen Mikrophone die zwar gern für Gesangsaufnahmen verwendet werden, aber auch in anderen Bereichen oft eingesetzt werden. Sie zeigen einen charakteristischen Klirrverlauf wie er bei Doppelmembranmikrophenen oft anzutreffen ist.

Generell liegt der Klirrfaktor im mittleren Bereich, ein Maximum im Differenzton findet man zwischen 2 und 6 kHz. Oberhalb erfolgt nochmals mindestens ein Einbruch im Klirrverlauf bis die Kurve oberhalb von etwa 10 kHz nochmals deutlich ansteigt.

Typische Vertreter dieser Kategorie sind z.B. das TLM103 oder das TLM 127 von Neumann, aber auch das SC600 von t.bone lässt sich hier einordnen.

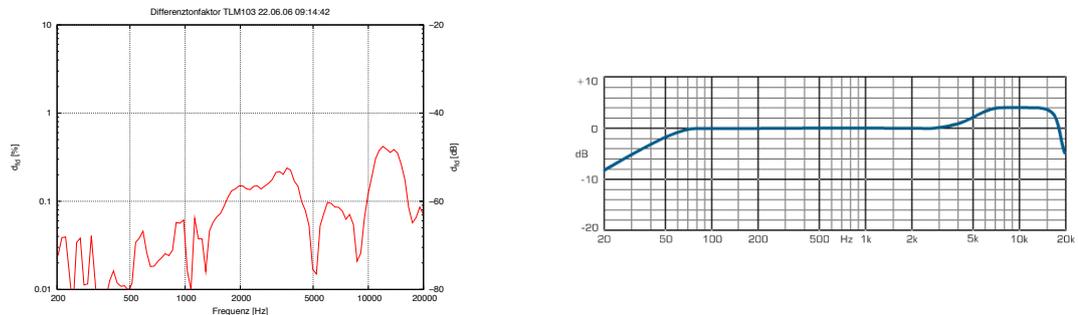


Abbildung 27: Differenztonfaktor und Frequenzgang des Neumann TLM 103

Der Absolutwert der Verzerrungen bleibt in dieser Kategorie immer deutlich unter 1% unabhängig von der Frequenz!

5.5.2 Gesangsmikrophone

Die Kategorie der reinen Gesangsmikrophone (die sich sicher auch als Solistenmikrophon für Instrumente mit ähnlichen spektralen Eigenschaften und vergleichbaren Pegeln wie die menschliche Stimme eignen) entspricht weitgehend der vorigen Kategorie, allerdings mit dem Unterschied, dass der Absolutbetrag des Klirrfaktors deutlich höher ist und das Maximum im mittleren Frequenzbereich und oberhalb von 1% liegt.

Als Beispiel soll hier das Phantom von Brauner angeführt werden:

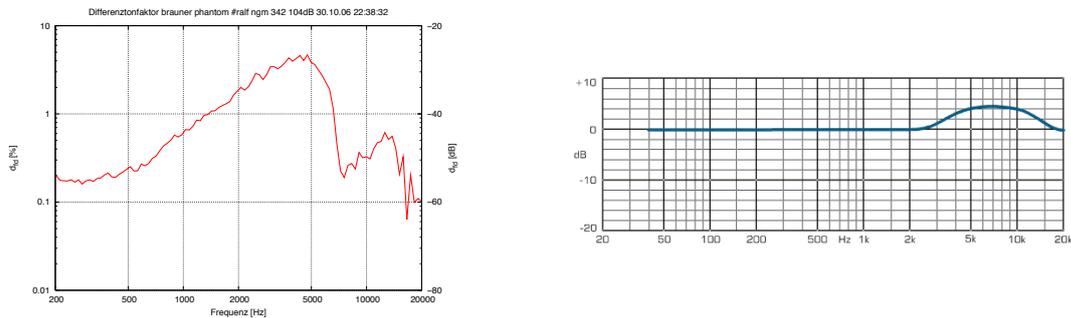


Abbildung 28: Differenztonfaktor und Frequenzgang des Brauner Phantom C

In diese Kategorie von d_2 - Verlauf fällt beispielsweise auch das M147 von Neumann, das um92 von Microtech Gefell oder das nt1 von Rhode.

Ein derartiger Verlauf des Differenztons würde die spektrale Wirkung des Bereichs der Vocalformanten durch Obertöne verstärken, und bringt auch bei niedrigeren Pegeln schon hörbare Effekte. Bei sehr lauten Instrumenten werden die Effekte aber vermutlich zu stark.

Deshalb soll hier angemerkt werden, daß während der Vergleiche auch die Idee bestand eine Kategorie der „misslungen Gesangsmikrophone“ einzuführen. Sie wurde wieder fallen gelassen, weil hier wesentlich weniger Einigkeit über die vorwiegende Verwendung bestand.

Die Mikrophone der Gruppe hätten sich aber hauptsächlich durch einzelne Ausreißer im Differenztonverlauf und generell überzogen hohe Klirrfaktoren, die von manchen billigen Röhrenmikrofonen im Test erzeugt wurden (bis deutlich über 5%) unterschieden. Meist waren gleichzeitig deutliche Abweichungen im Frequenzgang feststellbar.

5.5.3 Stützmikrophone

In diese Kategorie fallen Mikrophone die sehr universell einsetzbar sind, aber bevorzugt nicht als Hauptmikrofon, sondern als Stütze einzelner Instrumente verwendet werden. Diese Mikrophone haben generell den weitesten Anwendungsbereich.

Sie zeichnen sich durch geringe Verzerrungen im tieffrequenten Bereich aus, die mit der Frequenz gleichmäßig ansteigen. In den Höhen oberhalb 5 kHz werden oft Werte von über 1 % erreicht. Besonders beliebte Exemplare, die häufig mit einem warmen, präsenten Klang umschrieben werden, zeigen im oberen Grundtonbereich zwischen 300 und 500 Hz nochmals einen Rückgang des Differenztons.

Oft verwendete Vertreter dieser Gattung sind das KM184 und das KM140 von Neumann, aber auch das MK12 von Oktava. Auch das Audio Technica 4041 und das Rhode NT55 viel in diese Kategorie.

Ein Messdiagramm vom KM 184 ist in 3.7 abgebildet.

Eine mögliche Erklärung wäre, daß durch die zusätzlichen Obertöne, vor allem im oberen Frequenzbereich die Brillanz erhöht wird, und die Durchsetzungskraft von Geräuschanteilen, wie sie oft beim Einschwingen von Instrumenten entstehen erhöht wird. Dadurch treten diese hervor, ohne daß die Lautstärke zu stark erhöht werden muss, und das Mikrofon im Mix auffällt. Durch die geringen Differenztonwerte im Grundtonbereich fallen keine unangenehmen Summen oder Differenztöne auf, auch wenn es sich um mehrstimmig spielende Instrumente oder Instrumentengruppen handelt.

Bei leisen oder stark perkusiven Ensembles ist auch einer Verwendung als Hauptmikrofon nichts entgegen zu setzen.

Ausreisser innerhalb der Kategorie waren das B5 von Behringer mit besonders hohen Zerrwerten und frühem Anstieg im Frequenzgang derselben, und das SC180 von t.bone mit deutlichen Exemplarstreuungen.

5.5.4 Messmikrophone

Die Kapseln typischer Messmikrophone verhalten sich ähnlich wie die Kapseln von Stützmikrofonen. Durch die kleinen Membrangrößen und die Kugelcharakteristik, werden die Verzerrungen im tief- und mittelfrequenten Bereich vom Eigenrauschen überdeckt.

Erst bei hohen Frequenzen hebt sich die Differenztonkurve so weit, dass man den stützmikrofonähnlichen Verlauf erkennt. Dabei erreichen selbst sehr kleine, vorpolarisierte Elektretkapseln in den Höhen Werte von deutlich über 1 % Differenztonanteil!

Ein oft verwendeter Vertreter dieser Gruppe, das ECM 8000 von Behringer 3.7 wurde schon in anderen Abschnitten dieser Arbeit gezeigt.

Selbst Mikrohone in dieser Größenordnung von DPA zeigen Rauschen aufgrund der Membrangröße. Aber auch hier überzeugen sie mit ausgesprochen geringen Klirrfaktoren. Beim 4091 ist der Differenztonfaktor so gering, dass er im gesamten Frequenzbereich vom Rauschen verdeckt wird.

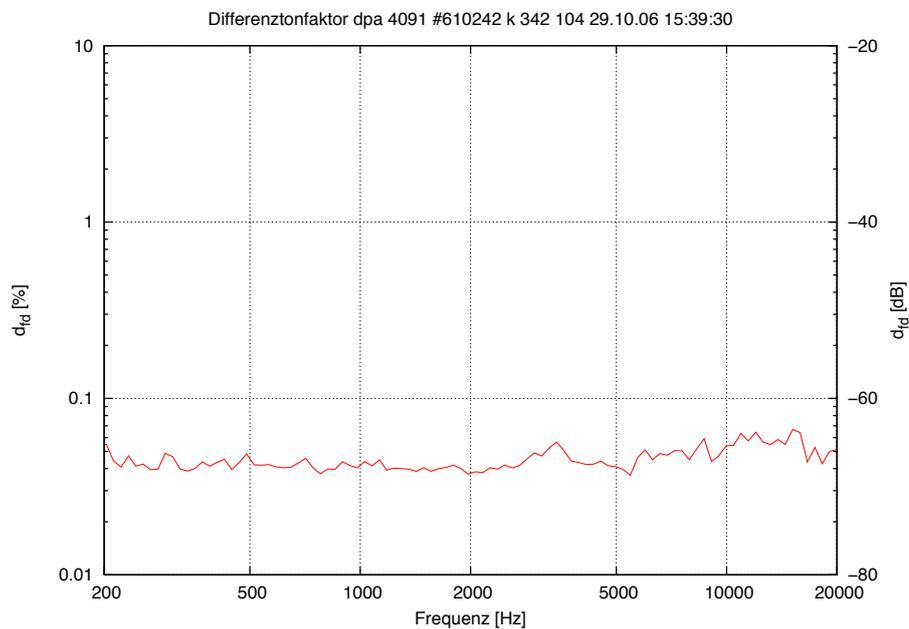


Abbildung 29: Der Differenztonfaktor des DPA 4091 Kleinstmembran-Kugel-Mikrophons ist so gering, dass er im gesamten Frequenzbereich im Eigenrauschen versinkt

Der Verlauf scheint auch typisch für kleine Elektretkapseln zu sein. In diesem Zusammenhang scheint es mir interessant die Arrays aus Elektretkapseln, die ich in zwei Trennkörpern aus meiner Diplomarbeit (12) verwendet habe bei Gelegenheit auf ihren Klirrfaktor zu untersuchen. Da sich durch die Parallelschaltung der Kapseln und den Grenzflächeneffekt der Störabstand verbessert, könnten eventuell weitere Teile der Kurve aus dem Rauschteppich gehoben werden.

5.5.5 verzerrte Mikrophone

In diese Kategorie fallen Mikrophone, die so starke Differenztonanteile vorweisen, dass ihre Verwendung stark eingeschränkt ist. Beim Mikrophonvergleich viel das SC800 Röhrenmikrofon von t.bone unangenehm auf. Auch das B5-von Behringer mit recht hohem Klirrfaktor und einem Differenzton von etwa 10% bei 20kHz konnte trotz ansonsten guter Daten keine entsprechenden Bewertungen erhalten.

5.5.6 Hauptmikrophone

Die vieldiskutierte Mikrofontypengruppe der Hauptmikrophone scheint diejenige zu sein, die am Meisten von geringen Klirrfaktoren profitiert. Dies verwundert wenig, sind es hier doch meist Signale mit vielen verschiedenen Frequenzen die gleichzeitig eintreffen und je nach Ensemble und Positionierung können durchaus auch hohe Pegel erreicht werden.

Gleichzeitig sind auch die Anforderungen an den Minimalwert der Dynamik hoch, da selbst leiseste Passagen nicht verdeckt werden dürfen.

Ein gelungenes Beispiel dieser Kategorie ist das 4015 von DPA. Die dänische Firma zeigt, dass es möglich ist extrem rausch- und klirrarmer Mikrophone zu bauen. Die Differenztonfaktoren liegen bei den getesteten Mikrophenen dieser Marke um etwa 10dB unterhalb der von vergleichbaren Mikrophenen. Dies liegt vermutlich am markttypischen Kapselaufbau mit vorpolarisierten Membranen mit sehr hoher Vorspannung. Selbst die Nieren-Mikrophone haben sehr geringe Differenztonfaktoren, in weiten Bereichen unterhalb der Messgrenze.

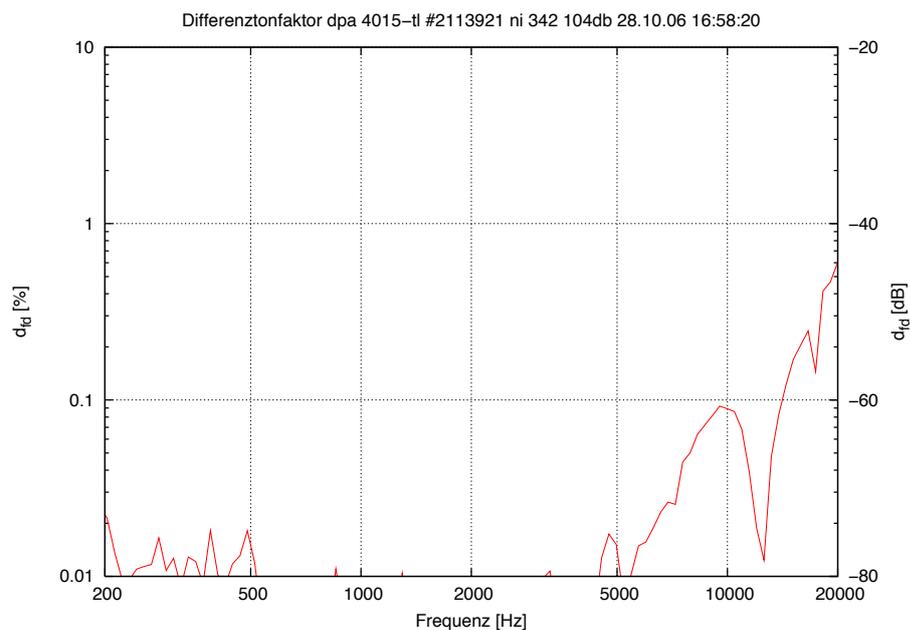


Abbildung 30: Differenztonfaktor des DPA 4015

Einige andere Mikros schaffen es sogar, den Differenztonanteil bei hohen Frequenzen zu reduzieren, oder es finden sich Einbrüche im Verlauf..

Auch die CMC5 und CMC6 Vorstufen von Schoeps schaffen zusammen mit den zugehörigen Kugelkapseln Werte unterhalb 0,1% im ganzen Frequenzbereich.

Überraschend in dieser Kategorie gelandet waren auch die folgenden Mikrophone: Sennheisser MKH20, Audio Technica 3032 und Pro37.

Mikrophone dieser Kategorie lassen sich natürlich auch als Stützmikrophone verwenden, vor allem bei Instrumenten die zu einem scharfen Klang tendieren! Speziell stark geräuschhaltige und laute Instrumente scheinen davon zu profitieren. So wurde oft auch die Verwendung als Overheadmikrofon für Schlagzeug in Betracht gezogen.

5.5.7 weitere Kategorisierung

Nicht alle gemessenen Mikrophone konnten mit einer „Verzerrungsgruppe“ in Verbindung gebracht werden. Dies lag sowohl an den eigenen Frequenzgängen des Differenztons dieser Mikrophone, als auch daran, dass nicht für alle Mikrophone eine häufige Verwendung in einem bestimmten Bereich bekannt war. Somit ist die Kategorisierung also noch nicht komplett.

Als Datengrundlage wurden vor allem Auskünfte und Eindrücke der Teilnehmer und Organisatoren des Mikrophonvergleichs sowie eigene Beobachtungen und Erfahrungswerte verwendet. Auch im Internet findet man einige Datenquellen zur Verwendung der Mikrophone. Zum Beispiel den auf Umfrageergebnissen und technischen Fakten beruhende Micfinder der Firma Neumann auf deren Homepage (13). Auch andere Hersteller bieten eine vergleichbare Beratung, und viele Foren und Homepages beschäftigen sich mit der Auswahl von Mikrophonen. Allerdings ist es oft nicht leicht, bei unbekanntenen Quellen die relevanten Informationen herauszufinden, und die Relevanz der Meinung einzuschätzen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine Software geschrieben, um mit einfacher Hardware den frequenzabhängigen Differenztonverlauf von Mikrophonen zu bestimmen. Die Funktionsfähigkeit wurde überprüft und die Ergebnisse anhand anderer Messungen verifiziert.

Es hat sich herausgestellt, dass der Aufbau stabile, zuverlässig reproduzierbare Ergebnisse liefert, und mit gewissen Einschränkungen sogar portabel einsetzbar ist. Die Kalibrierung und die Umrechnung der Differenztonwerte in Klirrfaktoren ist teilweise hinterfragbar, der Vergleich der Messwerte untereinander bietet aber interessante neue Informationen, die helfen können klangliche Unterschiede verschiedener Mikrophone zu verstehen.

Mit drei verschiedenen Messaufbauten an verschiedenen Orten wurde eine große Anzahl Messungen durchgeführt. Anhand dieser wurden Kategorien gefunden, in wel-

chen der typische Einsatzbereich von Mikrofonen mit dem frequenzabhängigen Differenztonverlauf korrelierte.

Mikrofone die mehrere Schallquellen erfassen, wie beispielsweise Hauptmikrophone bei Konzertaufnahmen, sollten keinen zu hohen Klirrfaktor haben, da die entstehenden Summen- und Differenzöne nicht harmonisch sind und störend auffallen. Allerdings werden die Mikrofone dann auch weit entfernt aufgestellt, so daß im allgemeinen mit geringeren Pegeln zu rechnen ist. Somit bleibt es fragwürdig wie sehr sich der Klirrfaktor auf die Aufnahme auswirkt.

Stütz- und Solistenmikrophone werden vorwiegend nah aufgestellt. Durch die höheren Pegel an der Membran können speziell bei gerichteten Mikrofonen wahrnehmbare Verzerrungen auftreten. Allerdings sind die Quellen meist praktisch einstimmig, so dass keine Summen und Differenzöne entstehen. Die zusätzlichen Obertöne zweiter Ordnung sind harmonisch und werden oft sogar positiv wahrgenommen.

Bei Signalen mit Geräuschcharakter treten zwar Summen und Differenzöne auf, behalten aber den Geräuschcharakter. Möglicherweise wird dadurch ein weiterer spektraler Bereich angeregt, in welchem das Gehör empfindlicher ist. Je nach gewünschter Wirkung und Anwendung des Mikrophons kann dies als Vorteil empfunden werden. Eventuell werden Ein- und Ausschwingvorgänge dadurch deutlicher.

Dennoch sind durch die Differenztonmessung nicht alle Phänomene erklärbar, die bei Mikrofonen festgestellt wurden, ohne daß die Ursache aus den Angaben in klassischen Datenblättern ersichtlich ist.

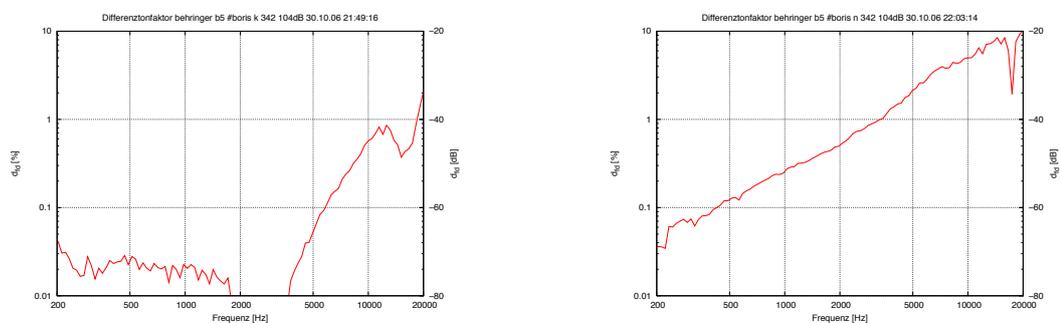


Abbildung 31: Differenztonfaktor des Behringer B5 mit Kugel- und Nierenkapsel (rechts)

Das B5 von Behringer zeigt sich beispielsweise in allen Daten weitgehend unauffällig. Weder ist der Dynamikbereich merklich eingeschränkt, noch ist der Frequenzgang stark unregelmäßig. Mit der Kugelmikrofon fällt es in die Kategorie Hauptmikrophone, mit der Niere am ehesten in die der Stütz- und Solistenmikrophone. Der Klirrfaktor könnte vor allem

in den Höhen geringer sein. Ist aber im mittleren Bereich durchaus noch vertretbar. Trotzdem gehört es zu den Mikrofonen, die im Subjektiven vergleich eigentlich in keiner Situation überzeugen konnten.

6.1 Ausblick

Die Messung des Differenztonfaktors zeigt eine Möglichkeit klangliche Unterschiede von Mikrofonen mit technischen, messbaren Ursachen verknüpfen, und ermöglicht damit eine gezielte Optimierung anhand bisher wenig beachteter Parameter.

In diesem Zusammenhang scheint es sowohl sinnvoll, die Messung zu verfeinern und weitere Klirrateile, z. B. k_3 zu berücksichtigen, als auch die Ursachen des Klirrfaktors und damit die möglichen Verbesserungen an Mikrofonen zu erforschen.

Interessant wäre es anhand von psychoakustischen Testreihen die Kategorien zu verfeinern, und zu versuchen ausser dem Klirrverlauf, der Dynamik und dem Frequenzgang auch andere technische Daten, wie etwa Richtcharakteristik, Impulsantworten, aber auch praktische Faktoren wie Bauform, Robustheit und Preis zu berücksichtigen. Somit sollte es möglich sein die Ergebnisse weiter zu verfeinern.

In diesem Zusammenhang könnte man auch Aufnahmen mit einem sehr klirrar-men Mikrophon durchführen, und diesem den Ergebnissen entsprechende Klirrverläufe künstlich aufprägen. Somit lassen sich die Einflüsse des Klirrfaktors unabhängig von anderen Parametern beobachten und verändern. Eventuell ist es möglich einen idealen Klirrfaktor für eine Anwendung zu „designen“.

Langfristig könnten die gewonnen Ergebnisse dann nicht nur in der Entwicklung genutzt werden, sondern auch in den Datenblättern der Mikrophone festgehalten werden

A Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] *Tonstudioteknik*. Franzis-Verlag München, 1974.
- [2] *Lehrbuch der Fernmeldetechnik*. Horst Fleischer - Karl Bergmann, 1978.
- [3] *Elektrische Nachrichtentechnik - signaländerungen auf dem Übertragungsweg - Verzerrungen und Störungen*. Richard Pflaum Verlag KG - München, 1981.
- [4] Untersuchungen zur linearität kapazitiver wandler. *VDT* (1982).
- [5] 45403, D. Messung von nichtlinearen verzerrungen in der elektroakustik. *Deutsche Normen* (1963).
- [6] BIDLINGMAIER, M.; HAAG, A. K. K. Einheiten - grundbegriffe - meßverfahren der nachrichtentechnik-übertragungstechnik. *Siemens* (1973).
- [7] DUMKE, H. Definitionen und zusammenhänge verschiedener maße für die nicht-lineare verzerrung. *Nachrichtentechnik* (1955).
- [8] FREDERIKSEN, E. System for measurement of mikrophone distortion and linearity from medium to very high levels. *Bruel und Kjaer, online* (2006).
- [9] FURST, M.; LAPID, M. A cochlear model for acoustic emissions. *AES* (1988).
- [10] FURST, M.; RABINOWITZ, W. Z. P. Ear canal acoustic distortion at $2f_1$ - f_2 from human ears: Relation to other emissions and percived combination tones. *AES* (1984).
- [11] HIBBING, MANFRED; GRIESE, H.-J. New investigations on linearity problems of capacitive transducers. *AES* (1981).
- [12] MUELLER, B. Trennkörper-grenzflächen-stereomikrophon. Diplomarbeit, TU-Graz; KUG Graz, 2010.
- [13] NEUMANN-GMBH. Neumann - homepage. Webpage, 2007.
- [14] PASTILLÉ, HOLGER; BRACKA, J. M. T. Neue untersuchungen zur hörbarkeit von nichtlinearen verzerrungen. *VDT* (2000).
- [15] PEUS, S. Measurements on studio mikrophones. *AES* (1997).
- [16] REIBIGER, K. M. *Theoretische Elektrotechnik*, vol. 18. Springer Verlag, 2008.

[17] REICHARDT, W. *Grundlagen der technischen Akustik*. Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig, 1968.

[18] RYCOTE. microphone data - datenbank über mikrophone, 05 2010.

B Anhang

In den folgenden Abschnitten sollen zusätzlich weitere Ergebnisse und Dokumente der Arbeit angefügt werden.

C Weiterführende Literatur und Nachschlagwerke

Für weitere Untersuchung scheint es wichtig sich mit der Hörbarkeit von Verzerrungen zu befassen. Hierzu wurden unter anderem die Papers (10), (9), (14) verfasst.

Informationen zum elektrotechnischen und physikalischen Aufbau von Mikrofonen findet man unter anderem in (7; 17; 6; 1; 2; 3).

D Kurzbedienungsanleitung Differenztonmessung

Alle für die Standardbedienung notwendigen Bedienelemente befinden sich in den beiden dunkelorange Feldern oben links im Programm über dem schwarzen Balken.

1. Starten der Software mit dem Button Differenztonmessung.bat.
2. Mit dem blauen Schalter Power DSP die Audioberechnung aktivieren
3. Entweder eine Kalibriermessung durchführen (-> Punkt 4) oder eine alte Kalibrierdatei laden (Punkt 9b)
4. Messmikrofon anschließen (d = 43 cm h = 15 cm -> Pappschablone)
5. Programm in Mode 1 schalten und „Calib“ drücken. Mit dem Gain Regler an der Soundkarte möglichst genau auf - 10 db FS aussteuern (Anzeige unter Input Level)
6. Start drücken, der Lautsprecherfrequenzgang von Lautsprecher 1 wird gemessen.
7. Nach Abschluss der Messung mit „Save“ die Messung speichern.
8. Programm in Mode 2 schalten -> Nach Abschluss der Messung mit „(Save) again“ die Messung speichern.
9. a) mit Load die soeben gespeicherten Kurven in den „corrector“ laden.
b) mit Open eine Kalibrierungskurve von der Festplatte laden. Die Kurve erscheint in den Anzeigen im „corrector“
10. Mode 3 auswählen, und zu messendes Mikrofon anschließen.
11. Mit Calib. Pegel am Gainregler der Soundkarte auf einen Wert zw. - 18 und -13 dB(FS) einstellen (der Errorreader darf nach der Messung keine Übersteuerungen anzeigen)
12. Mit Start die Messung starten

13. Mit Save (neuen Dateiname verwenden, sollte Mikrofontyp und Richtcharakteristik ohne Unterstriche enthalten) die Messung speichern.
14. Mit dem Auswerteprogramm können Grafiken erzeugt werden.

Anmerkungen:

Das Modul „errorreader“ (unter dem Mode-Schalter) zeigt Übersteuerungen oder Range Overloads an, und kann mit seiner Reset-Taste wieder auf 0 gesetzt werden.

Das Mikrofon (Kapsel) soll sich immer in 43 cm Entfernung und 15 cm Höhe über der Lautsprecherunterkante befinden → Schablone verwenden.

Mit dem Schieberegler „Calibrate Level“ kann der Lautsprecherpegel um +/- 3 dB nachgestellt werden.

Mit dem Button Mute kann man den Ausgang stummschalten oder einschalten.

Das Modul „sensdb“ in der oberen rechten Ecke kann zum Umrechnen in dB verwendet werden, hat aber sonst keinen Einfluss auf das Programm.

Unter der Anzeige des Input Levels befindet sich ein Feld „sens“ und ein Feld „Gain“. Wird in „sens“ die Empfindlichkeit des Mikrofons und in „Gain“ der (geschätzte) Verstärkungsfaktor des Preamps (in dB) eingetragen kann man auf der Anzeige SPL den Schalldruck bei 1 kHz ablesen.

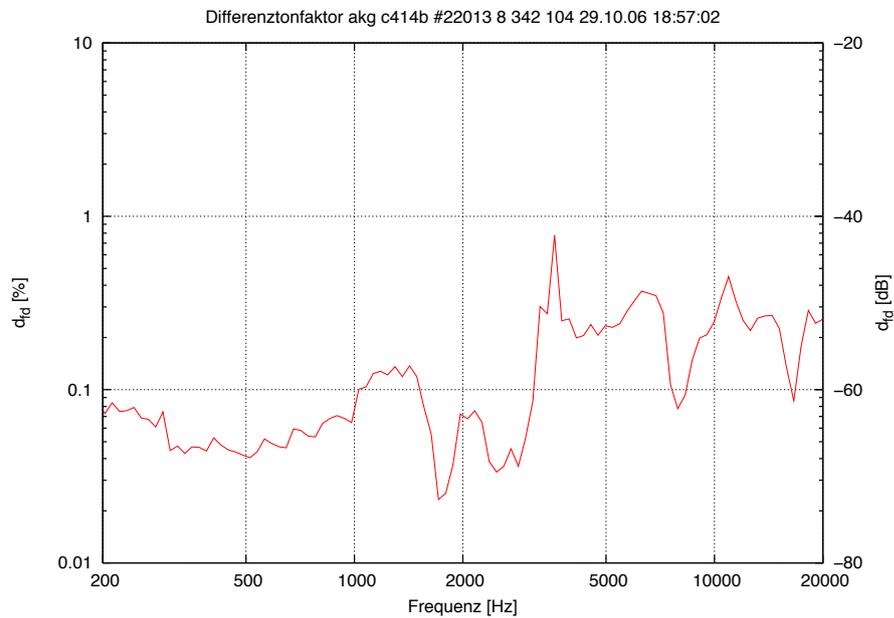
Das Spektrum der Anzeige „simplesp“ dient nur zur Orientierung, man kann daraus nicht auf Frequenzgänge schließen!

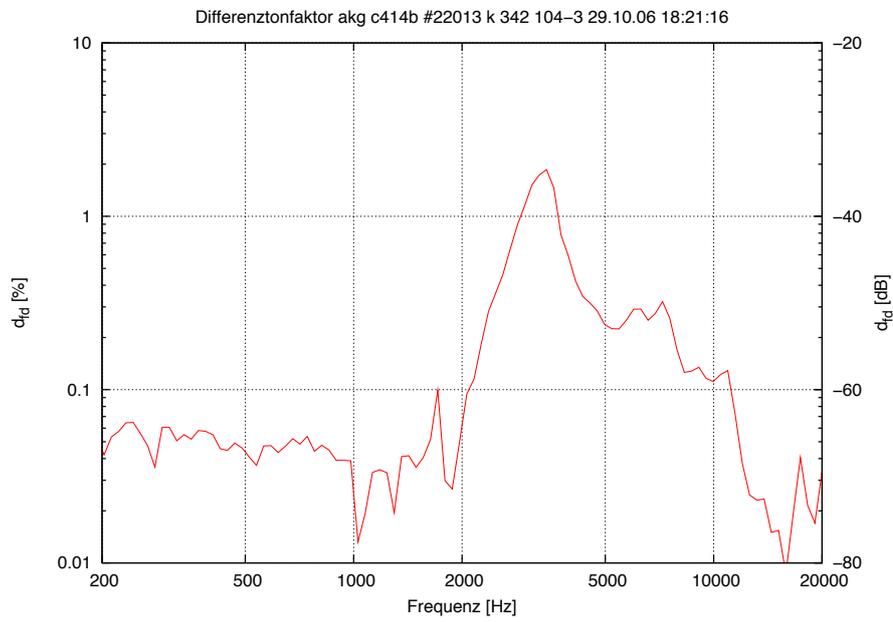
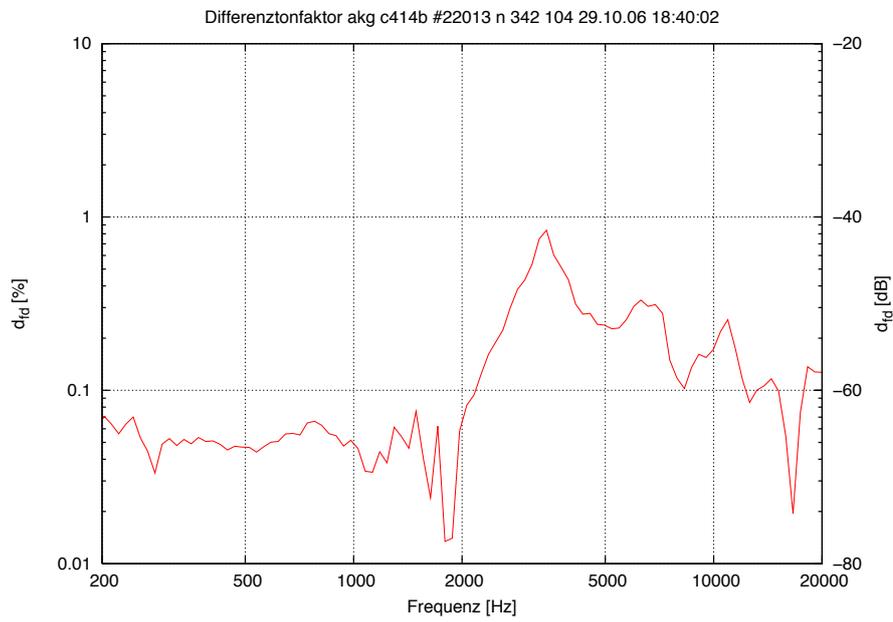
E Messdaten

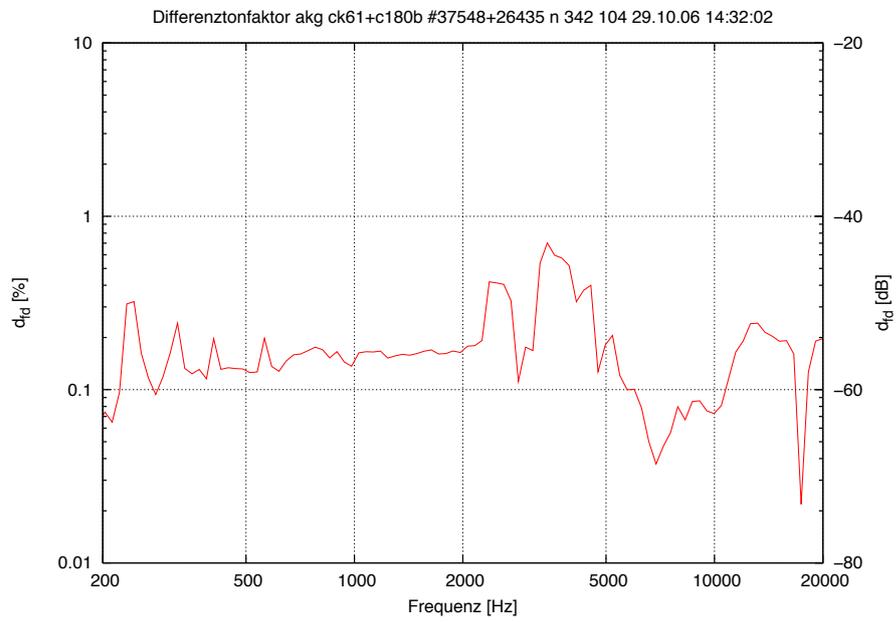
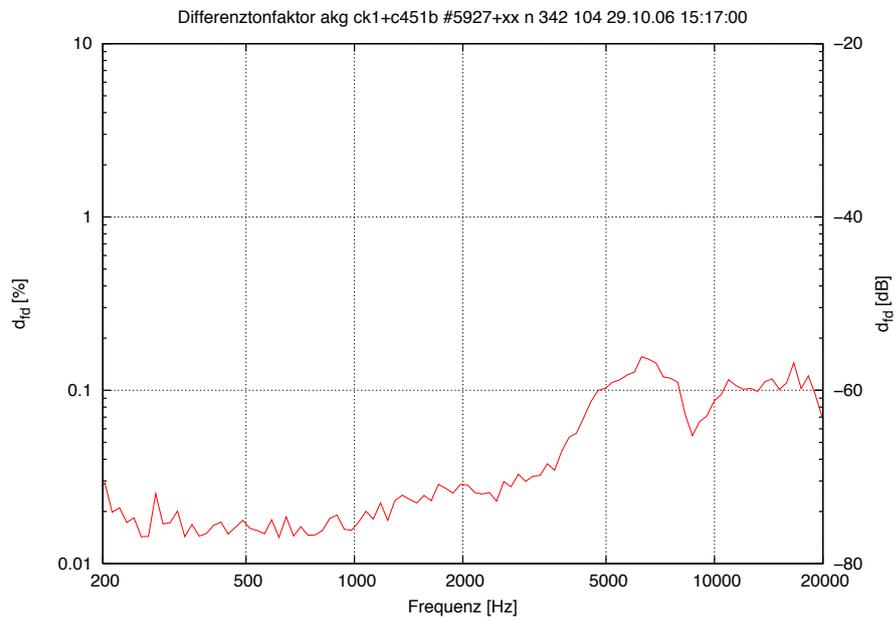
E.1 Messungen bei Neumann in Berlin

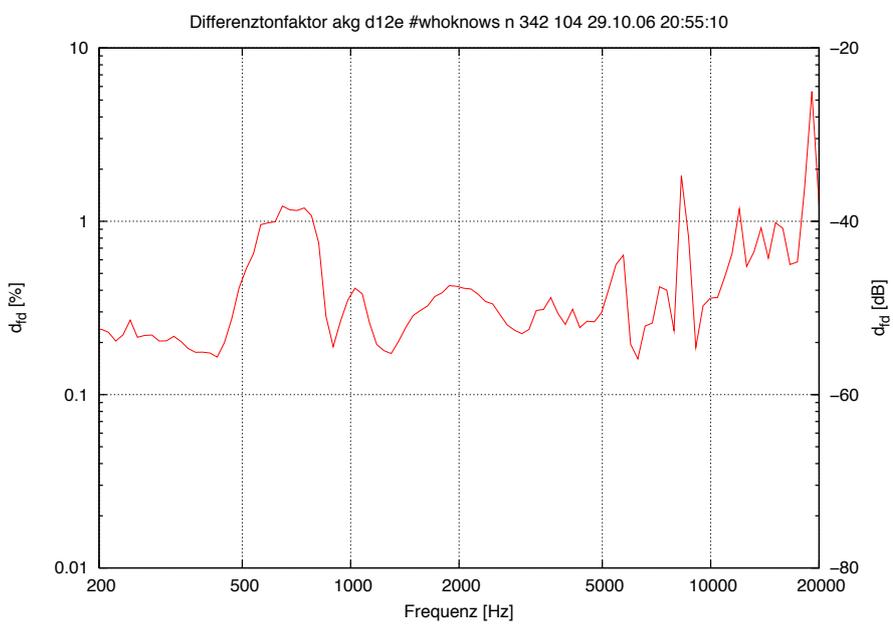
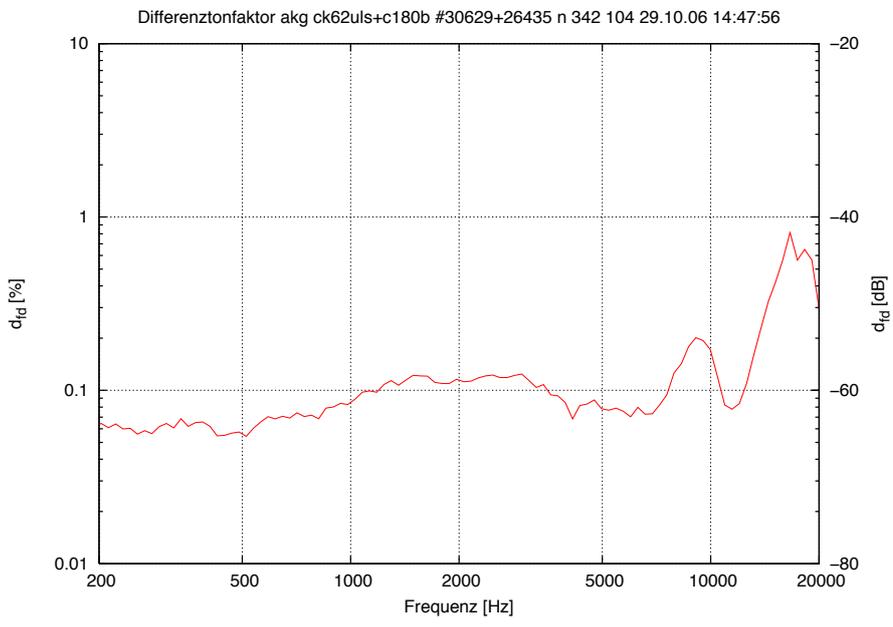
Bei Neumann wurden hauptsächlich die eigenen Mikrophone vermessen. Die Daten befinden sich im Besitz der Firma.

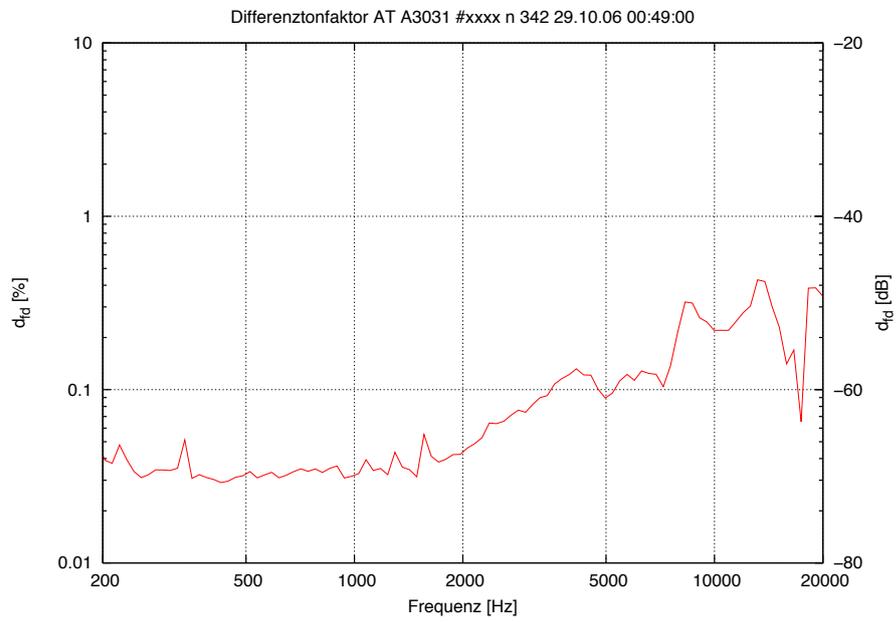
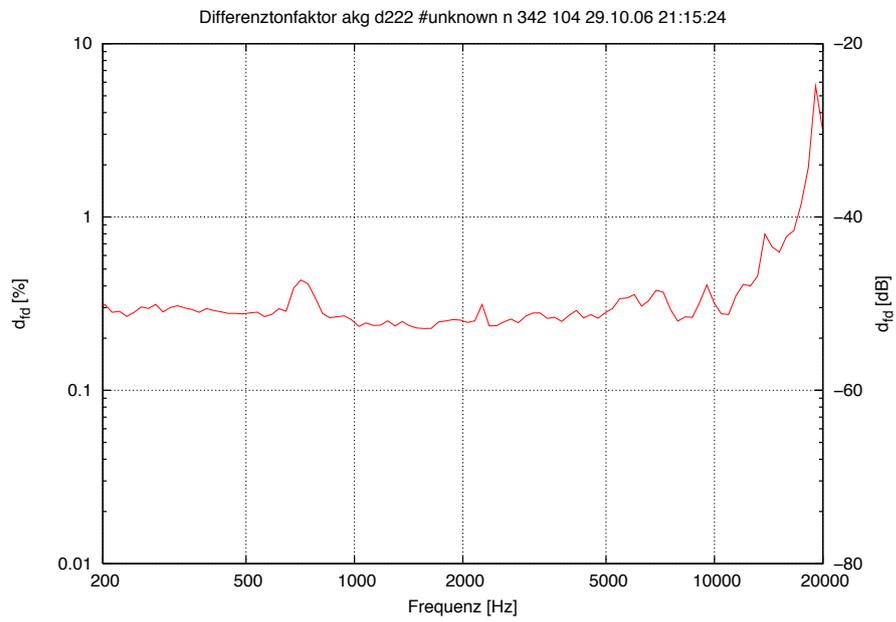
E.2 Messungen beim Mikrophonvergleich in Graz

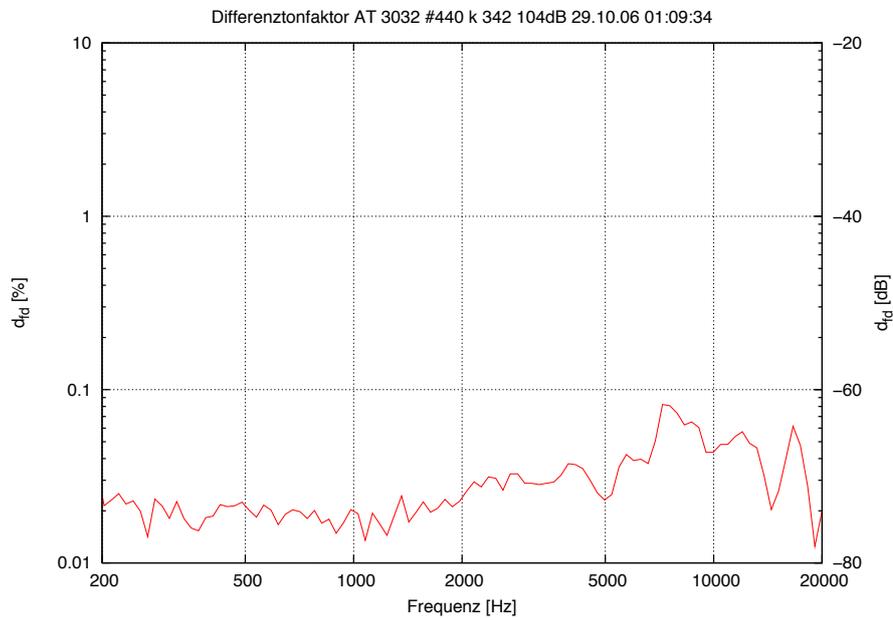
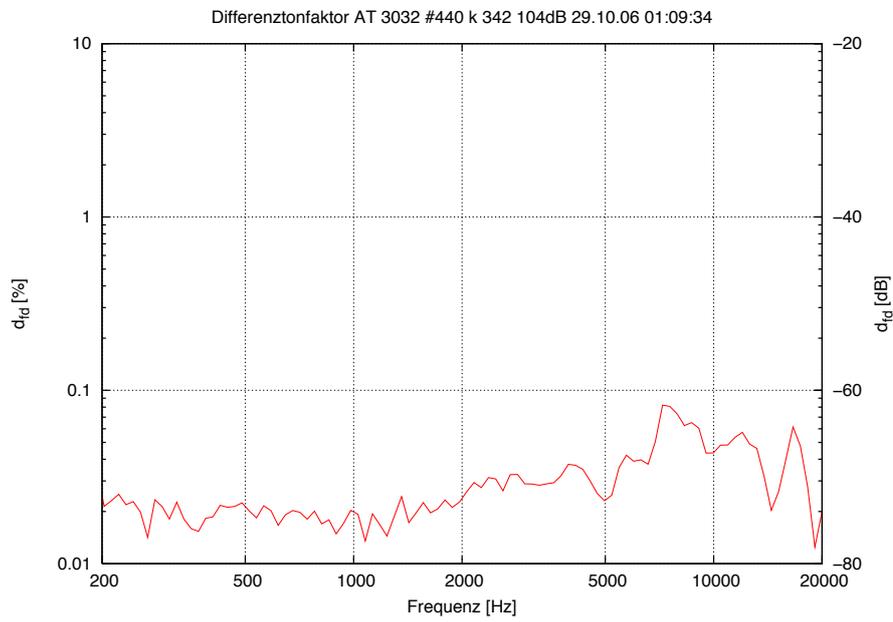


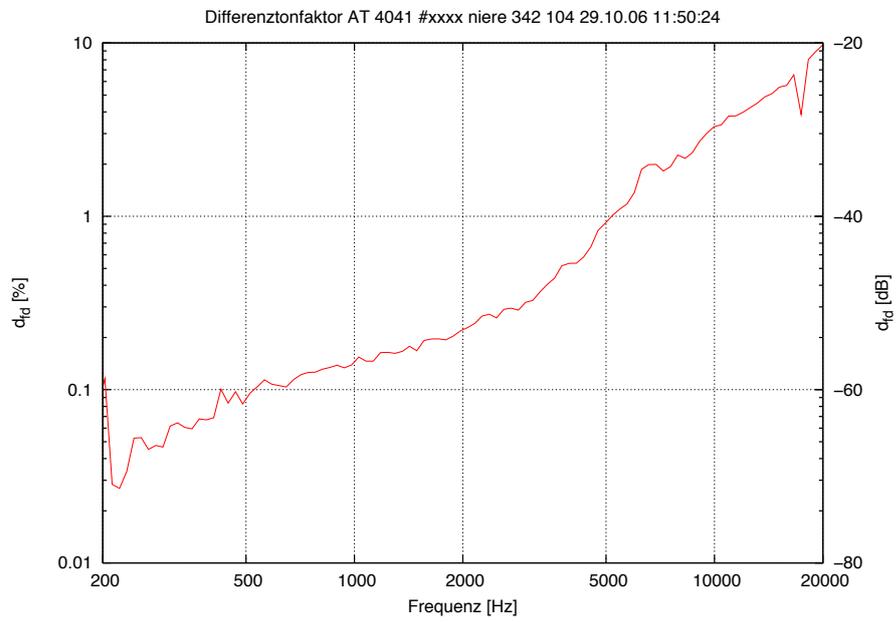
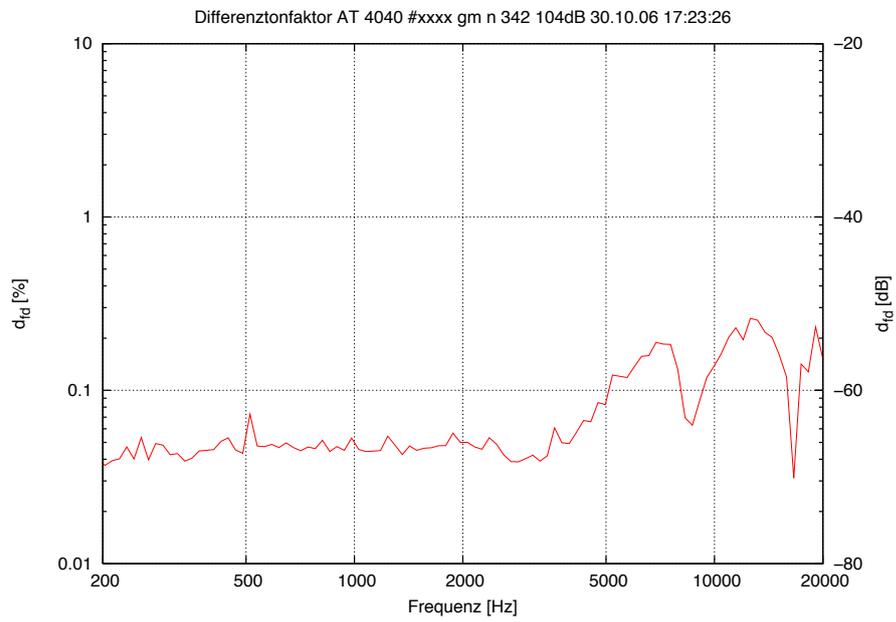


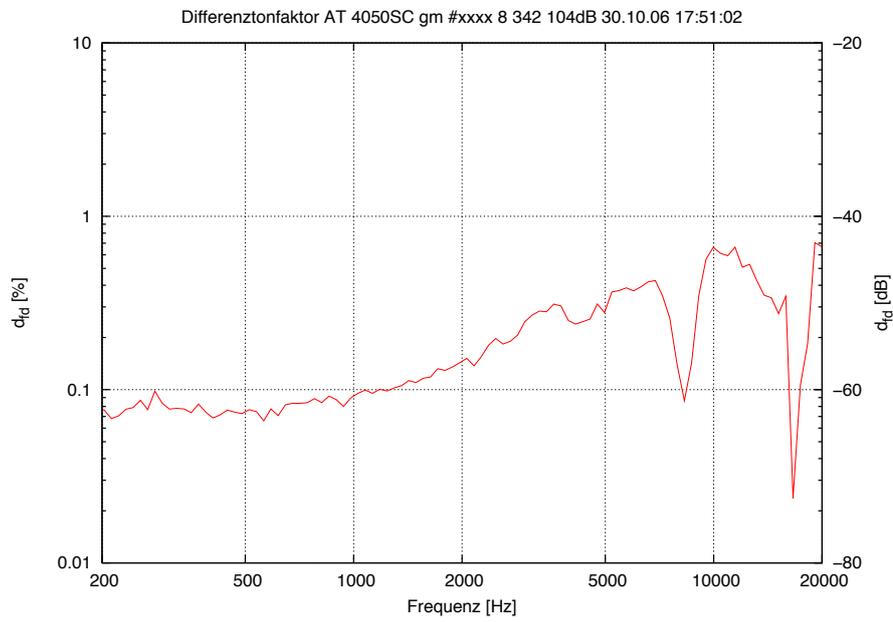
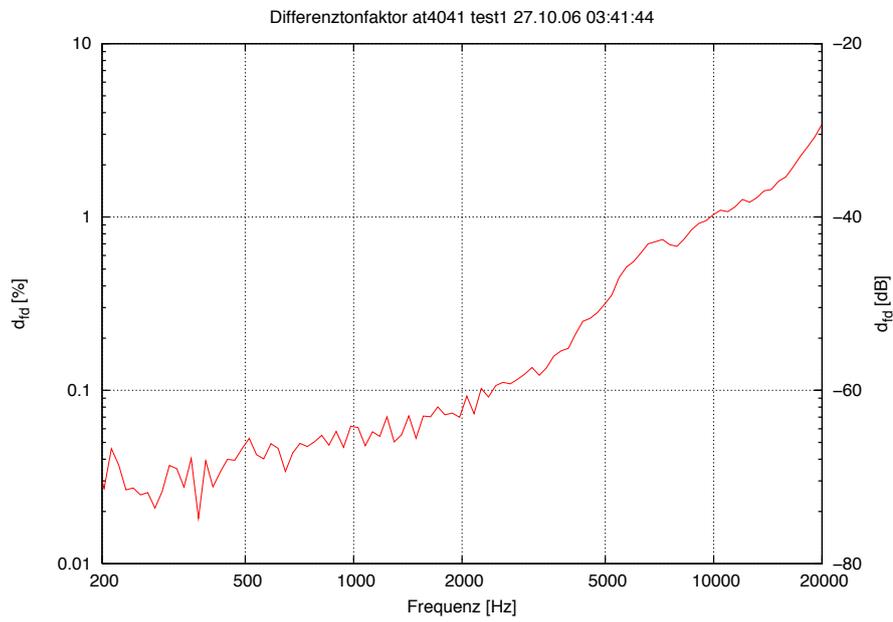


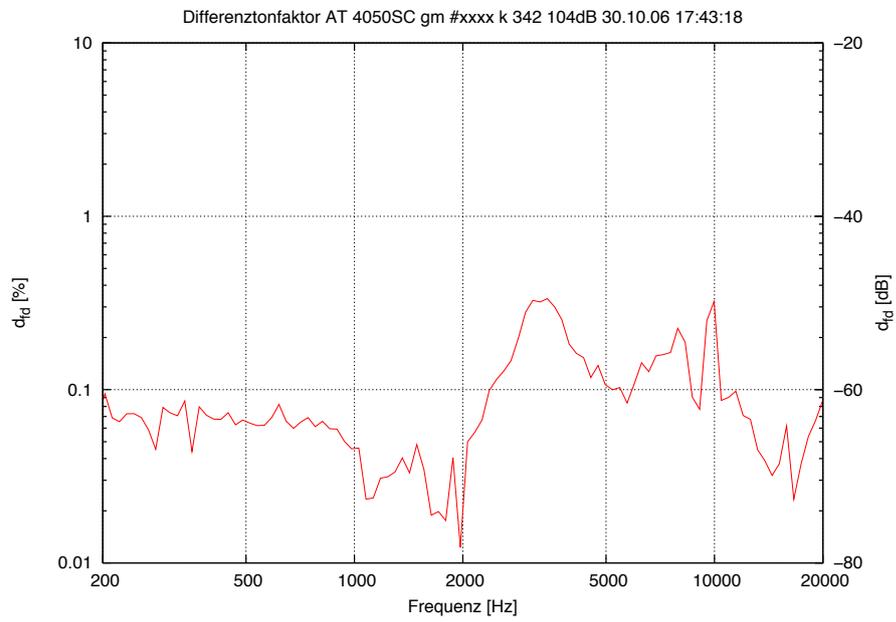
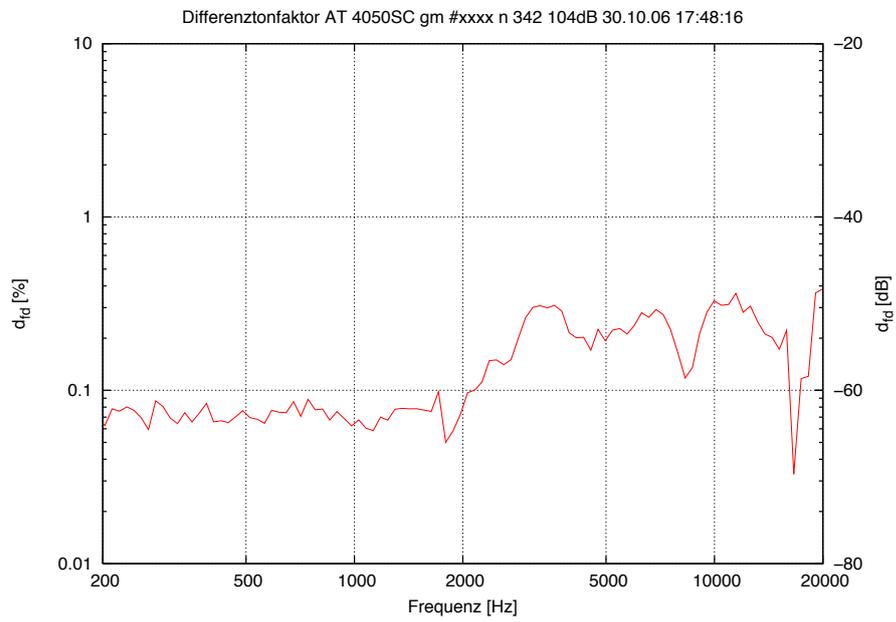


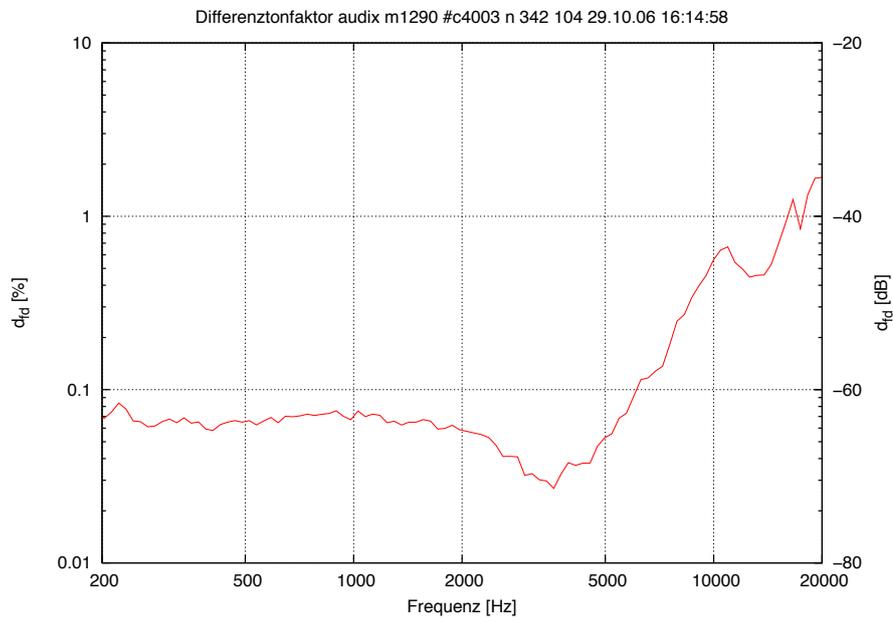
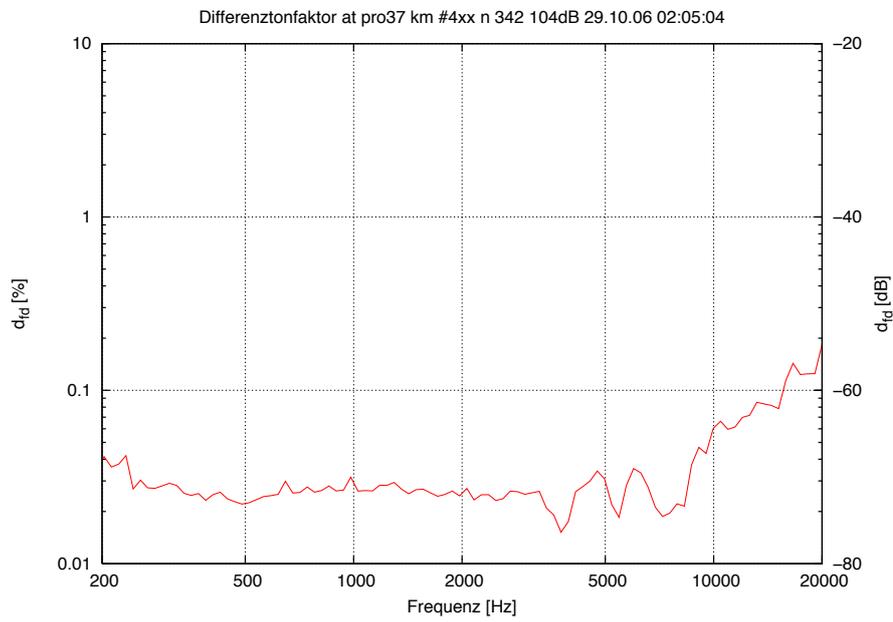


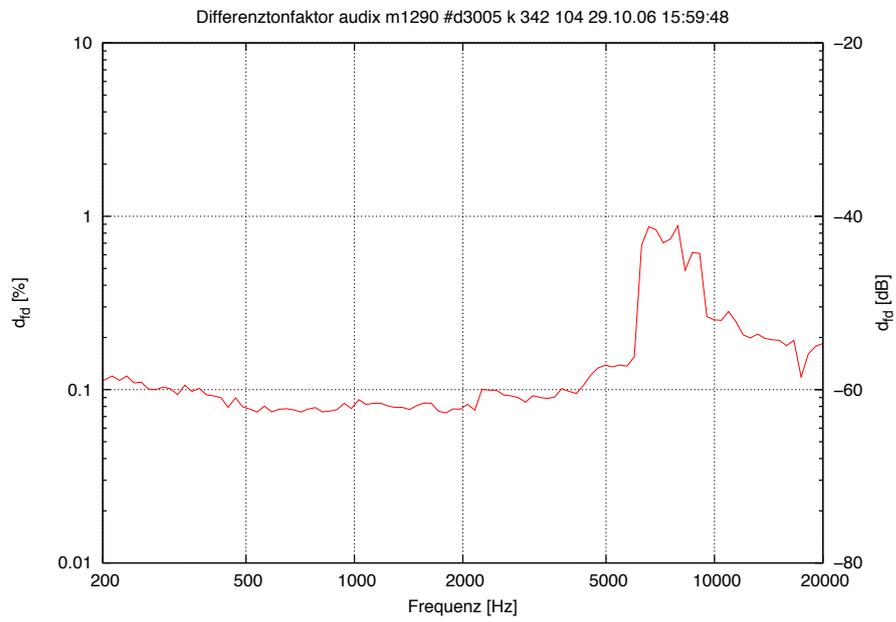
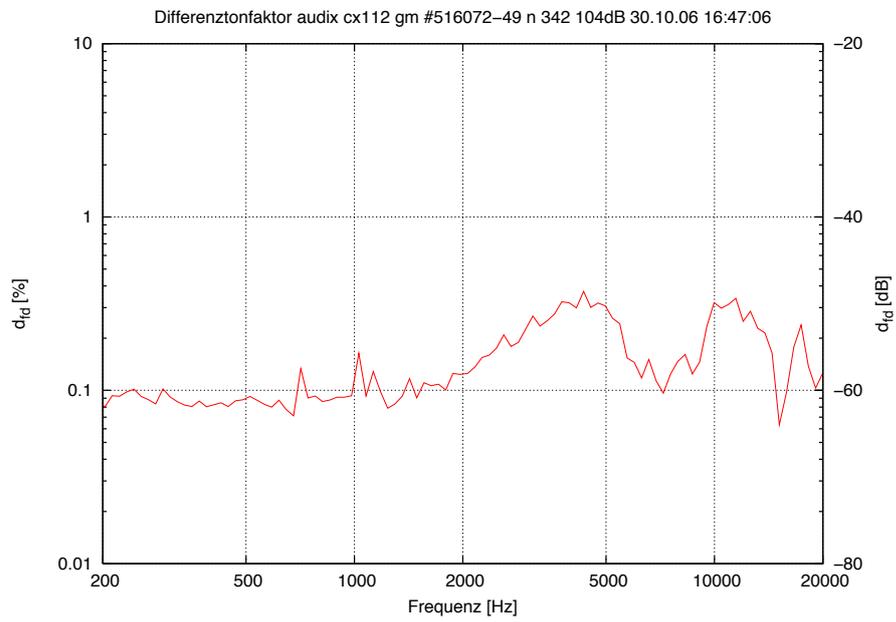


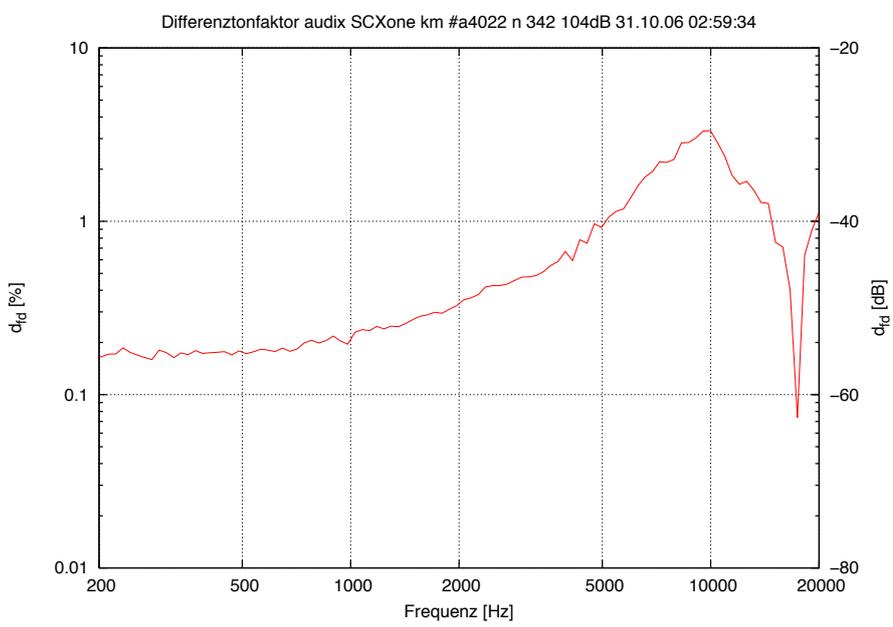
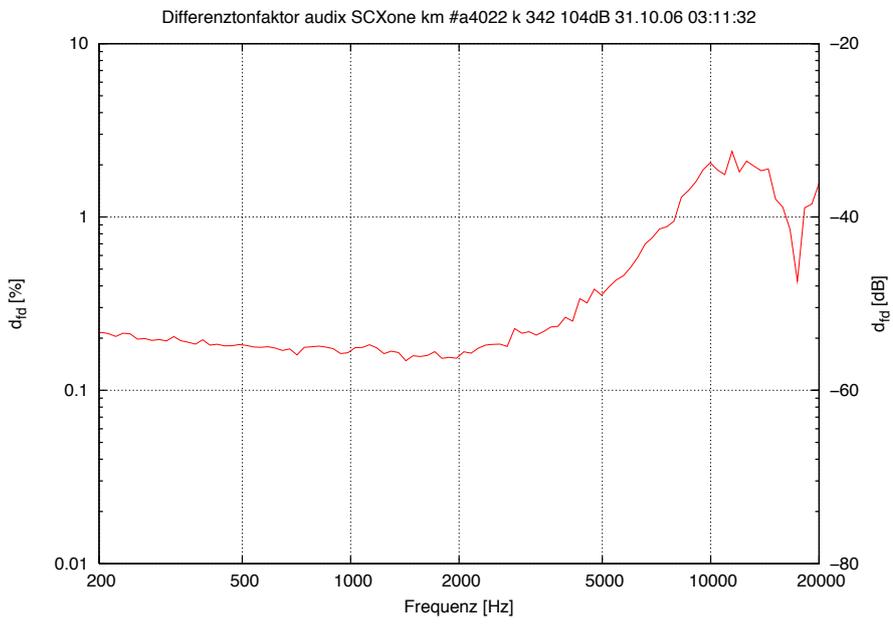


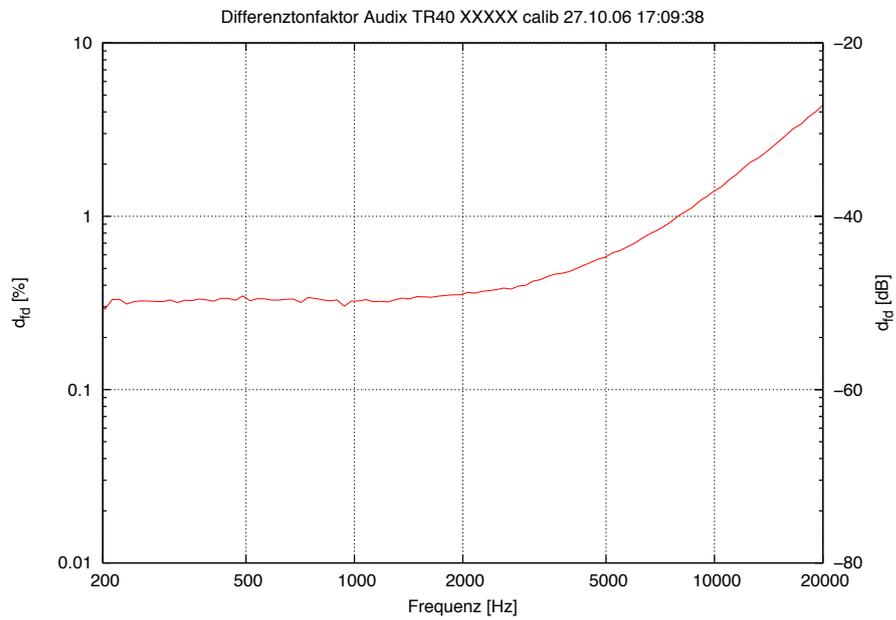
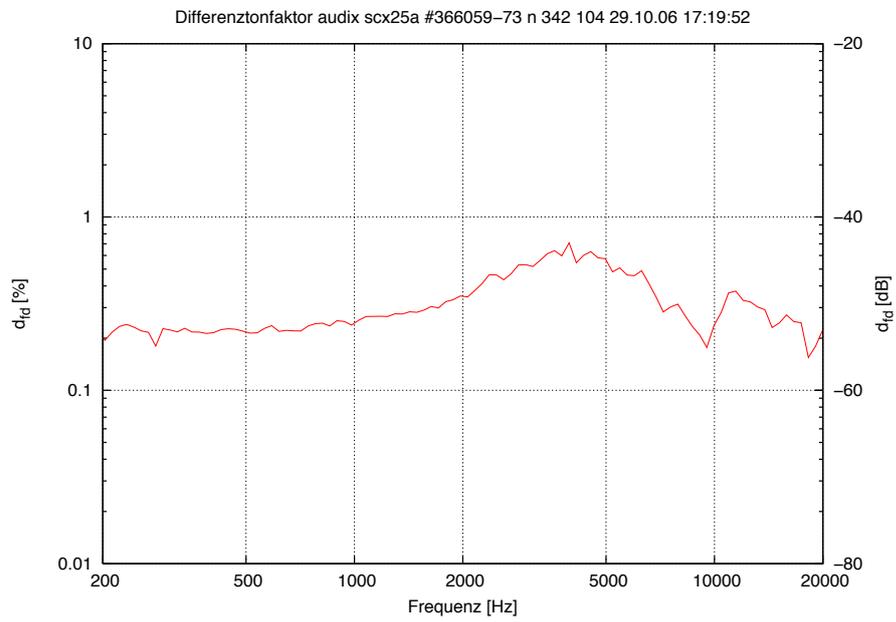


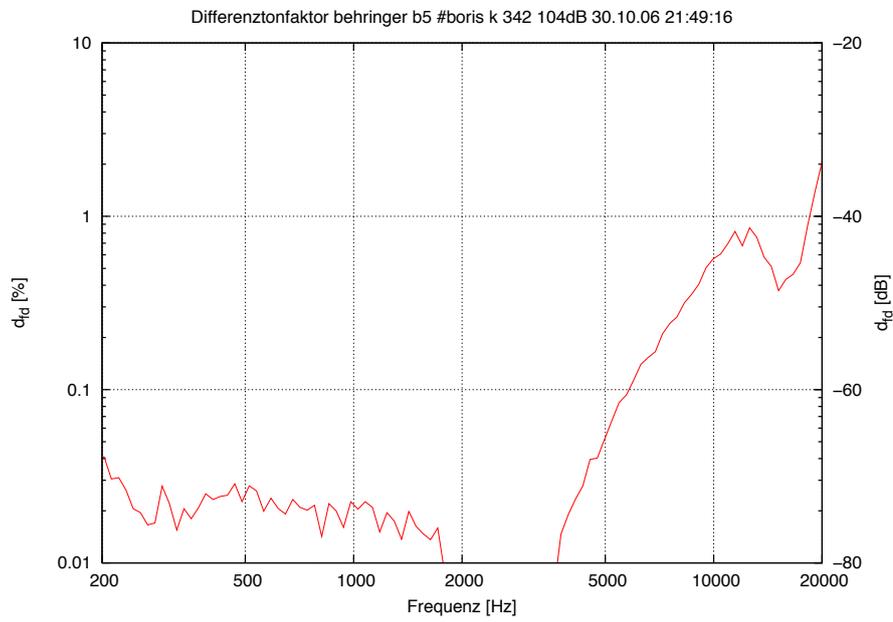
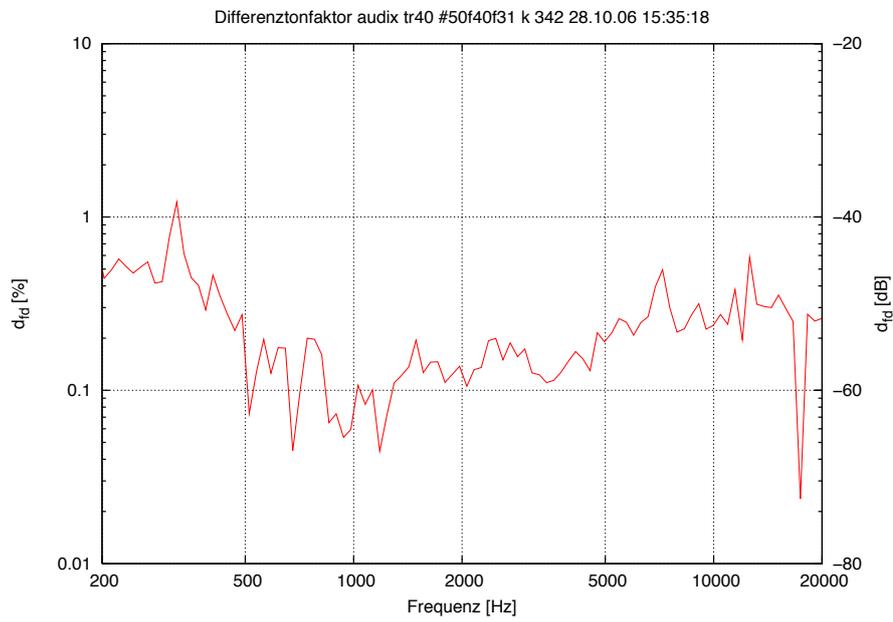


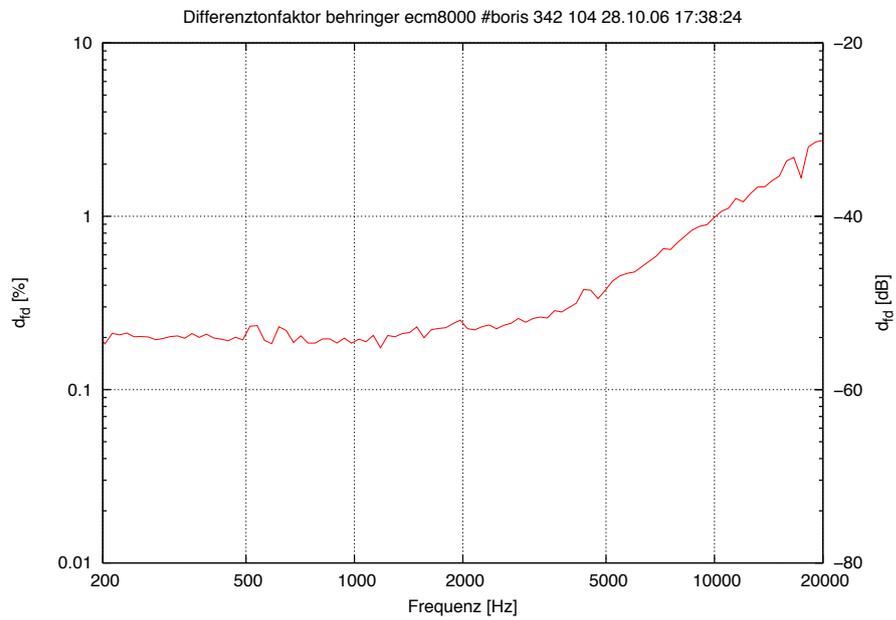
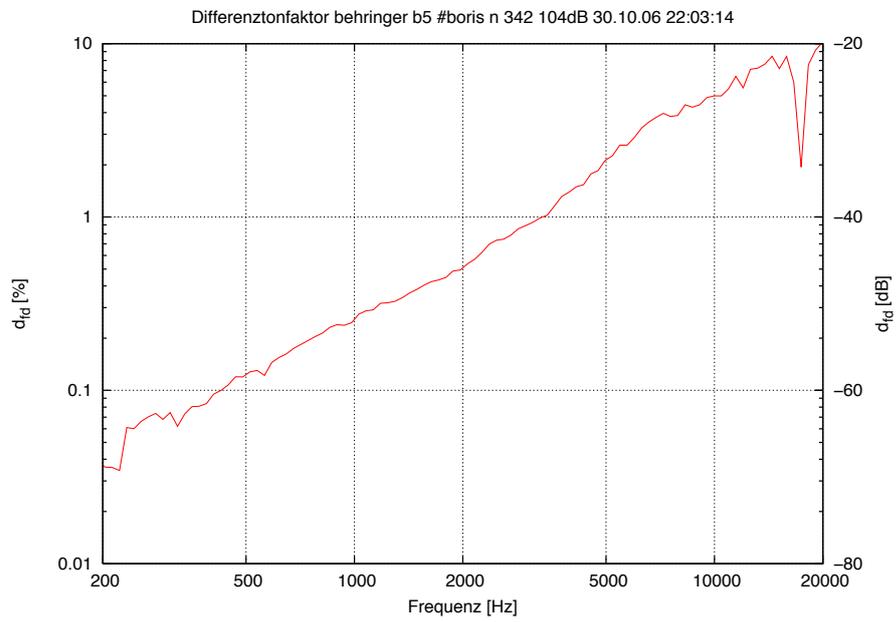


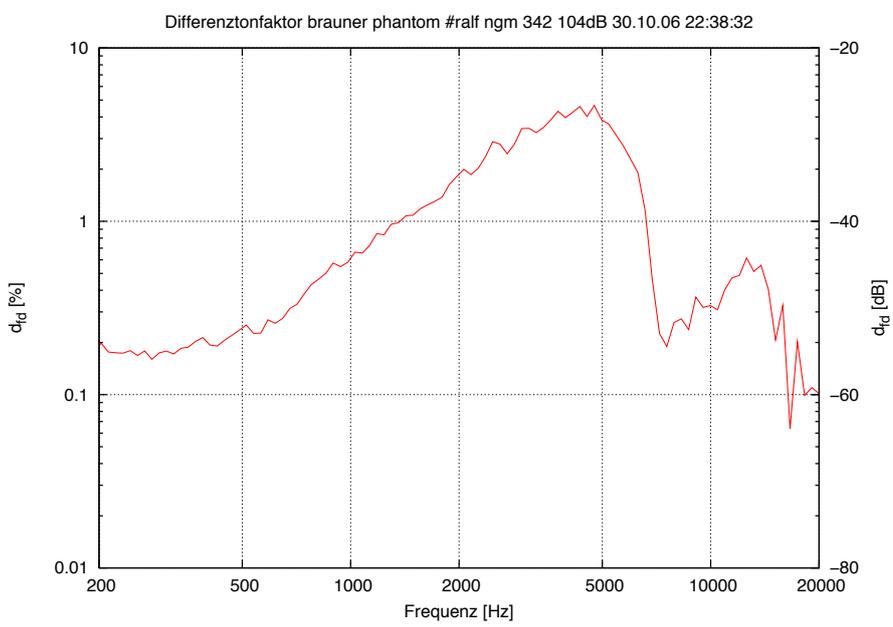
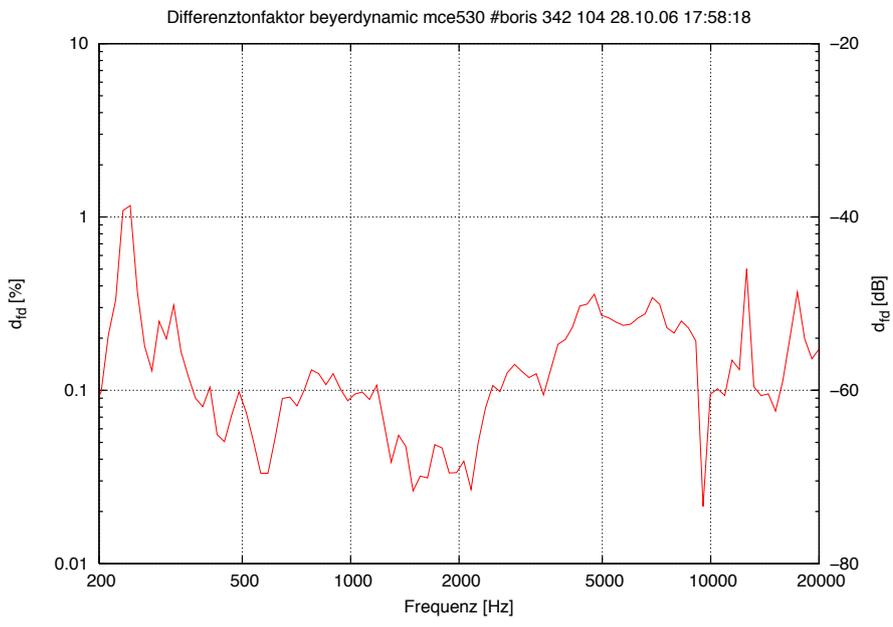


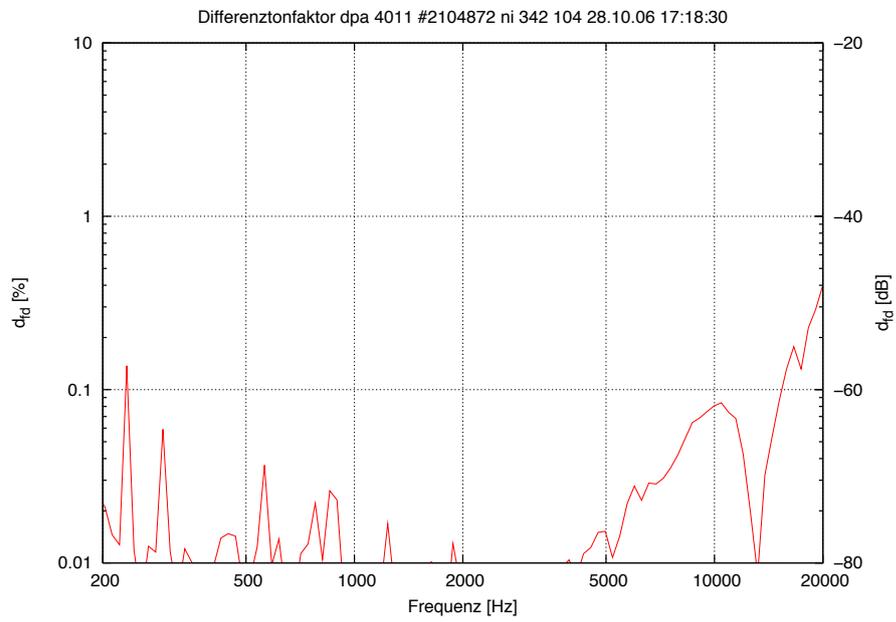
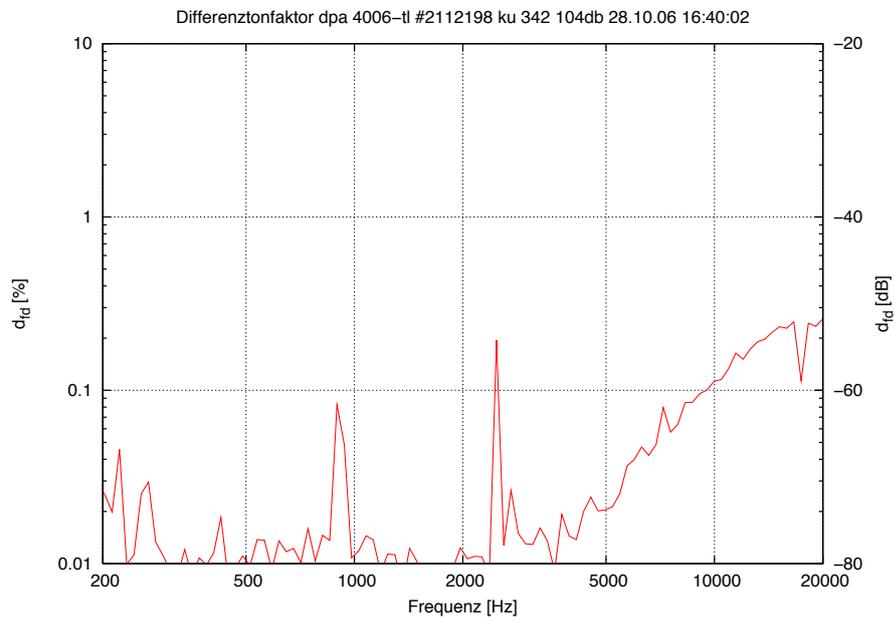


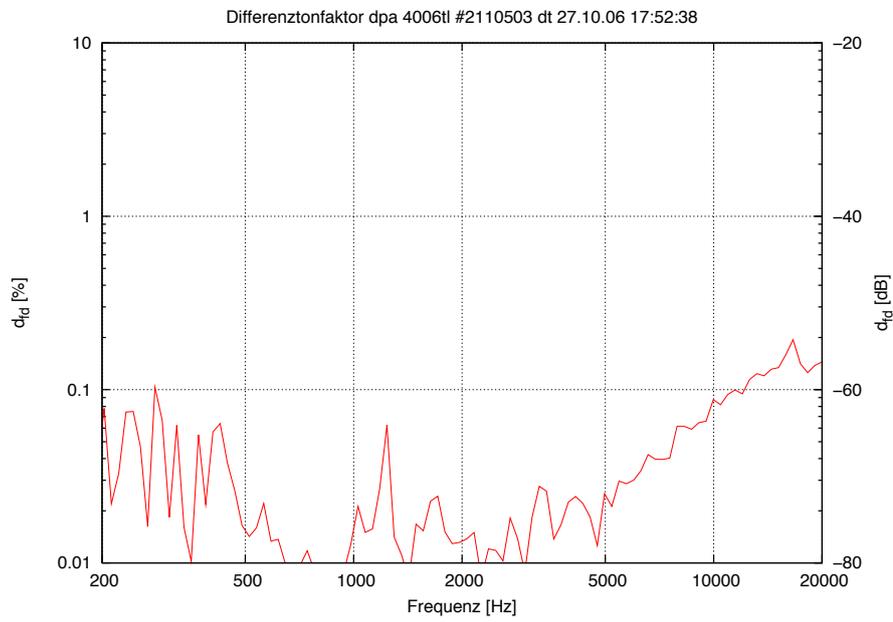
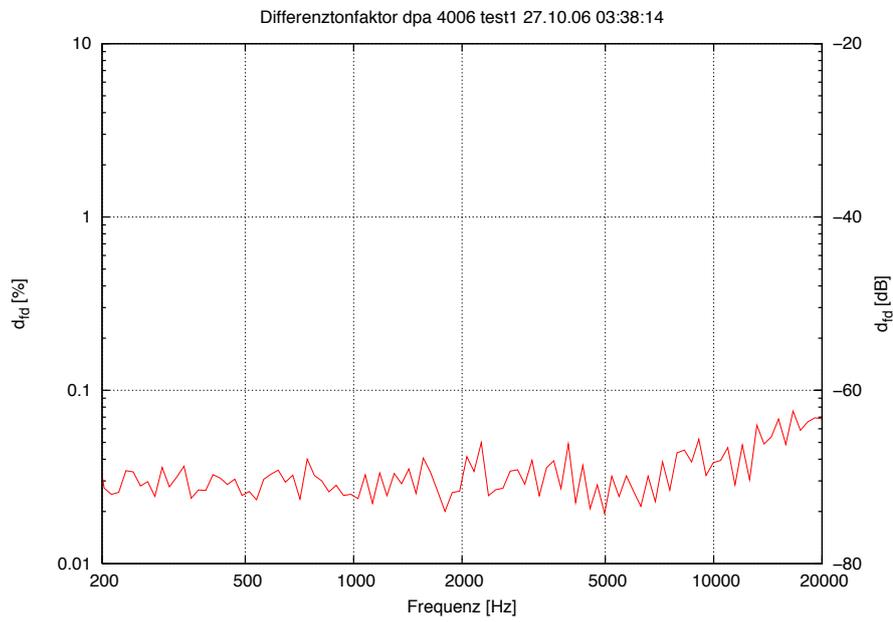


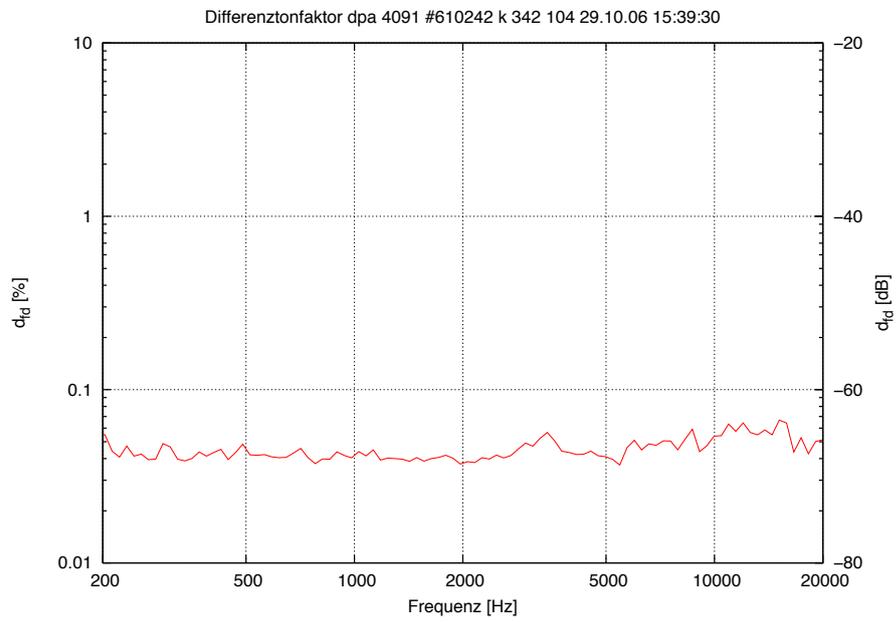
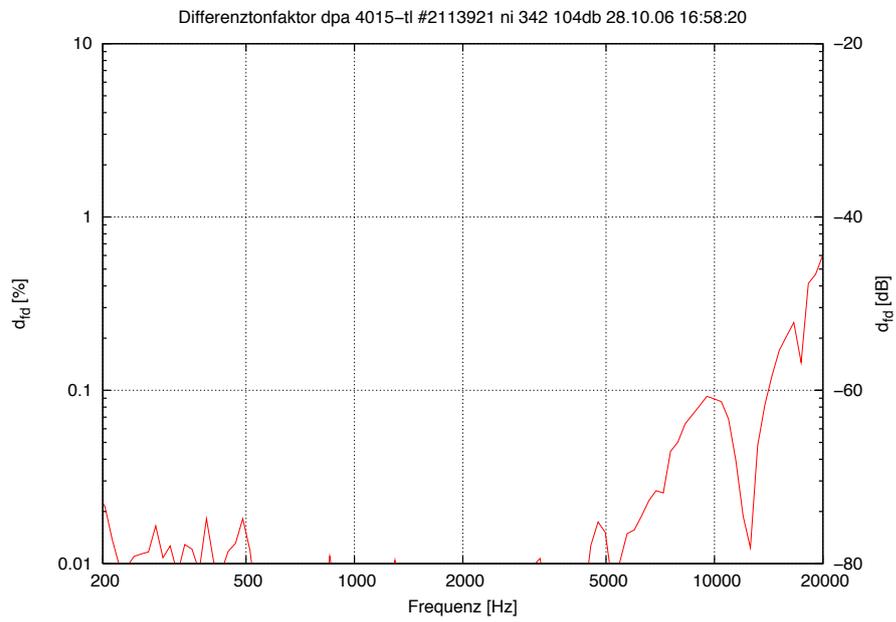


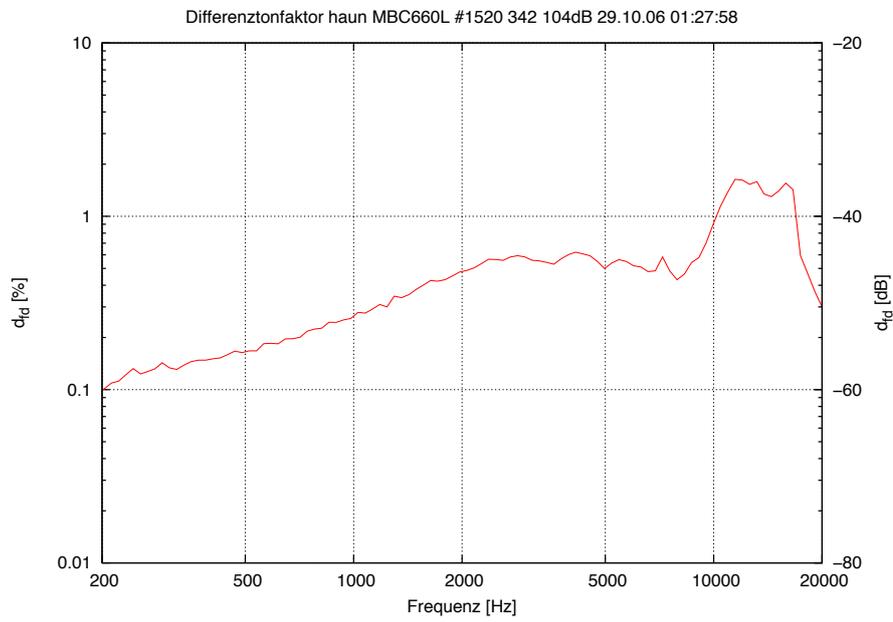
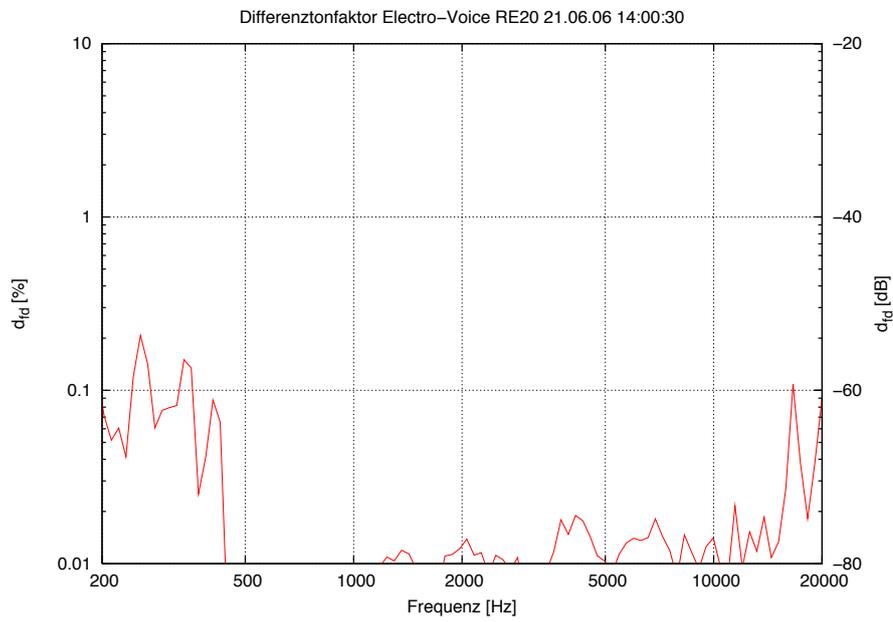


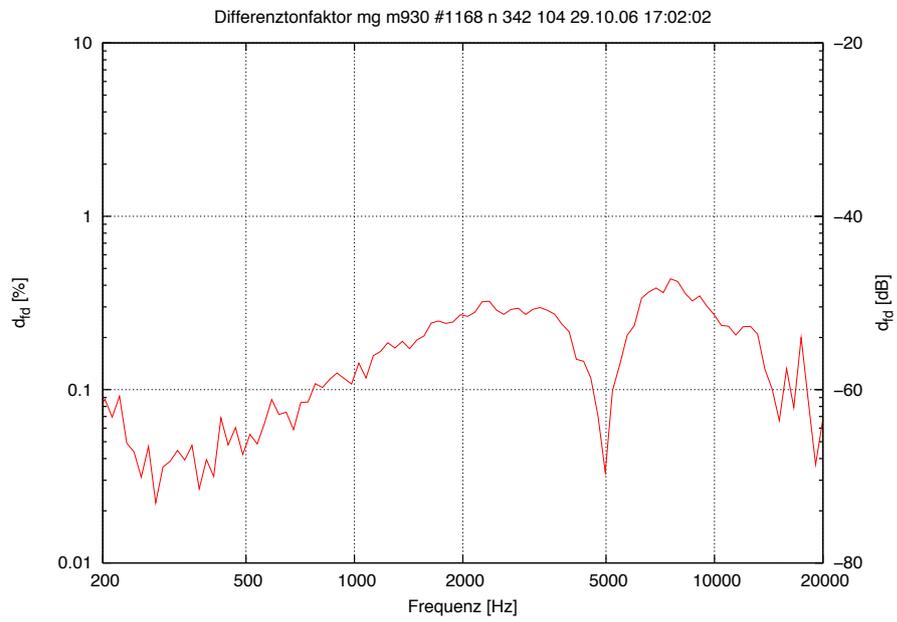
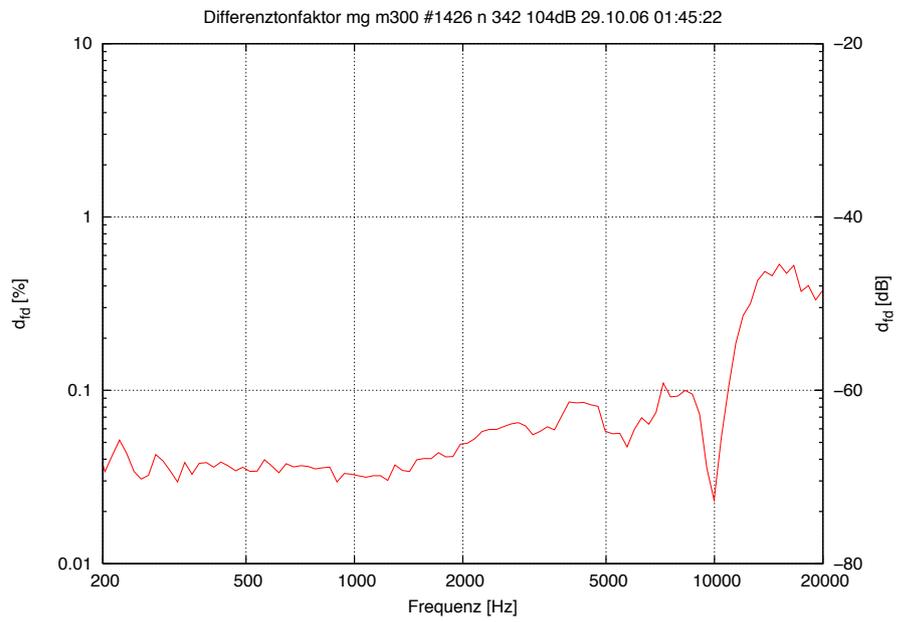


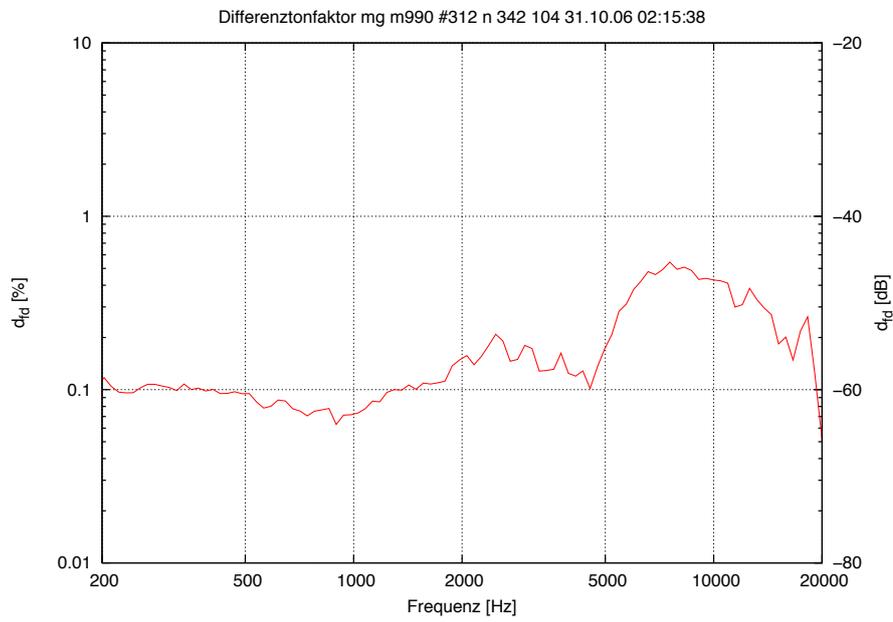
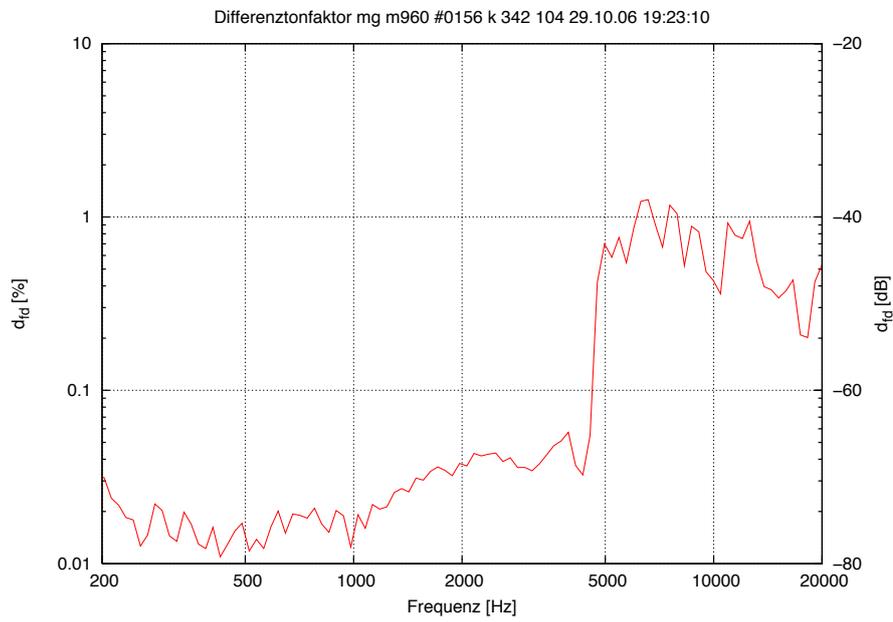


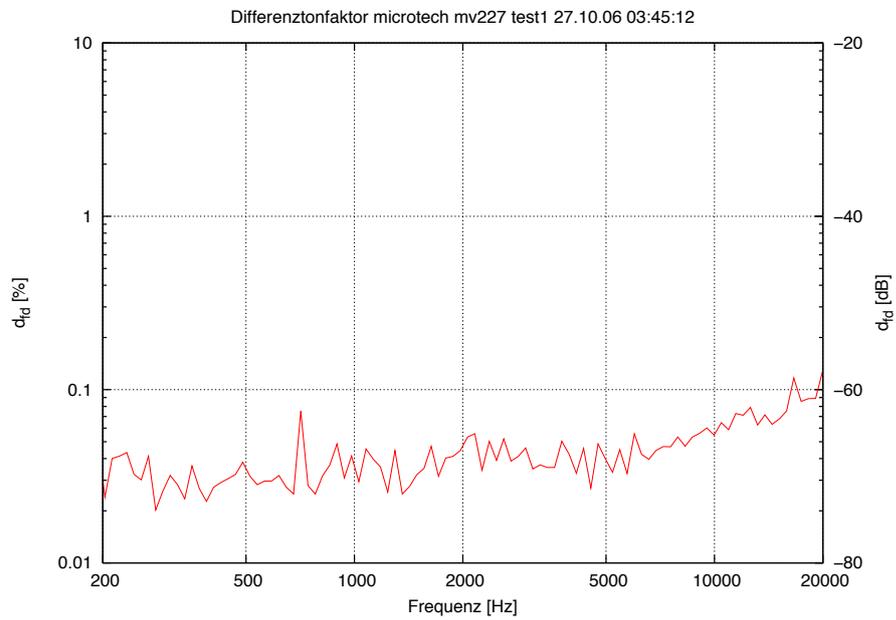
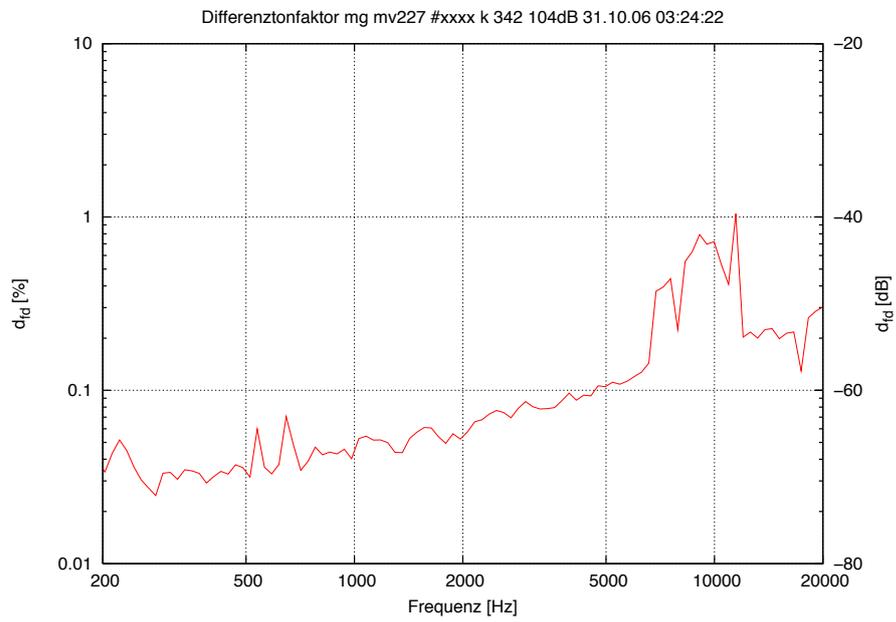


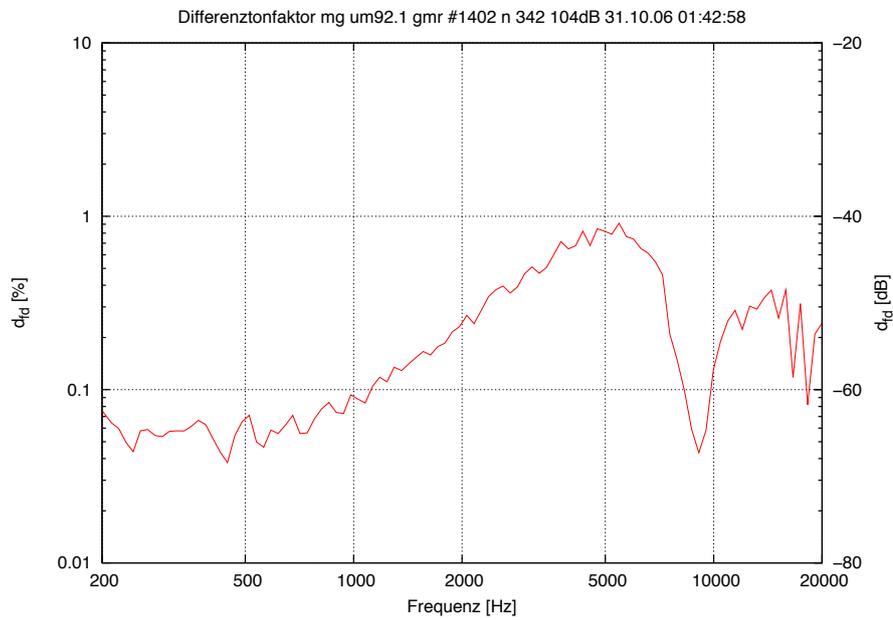
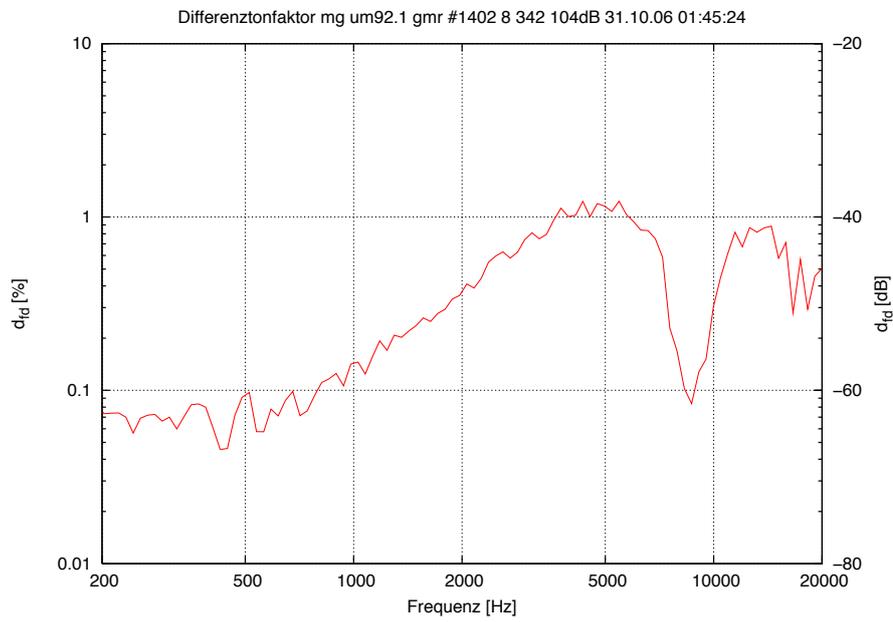


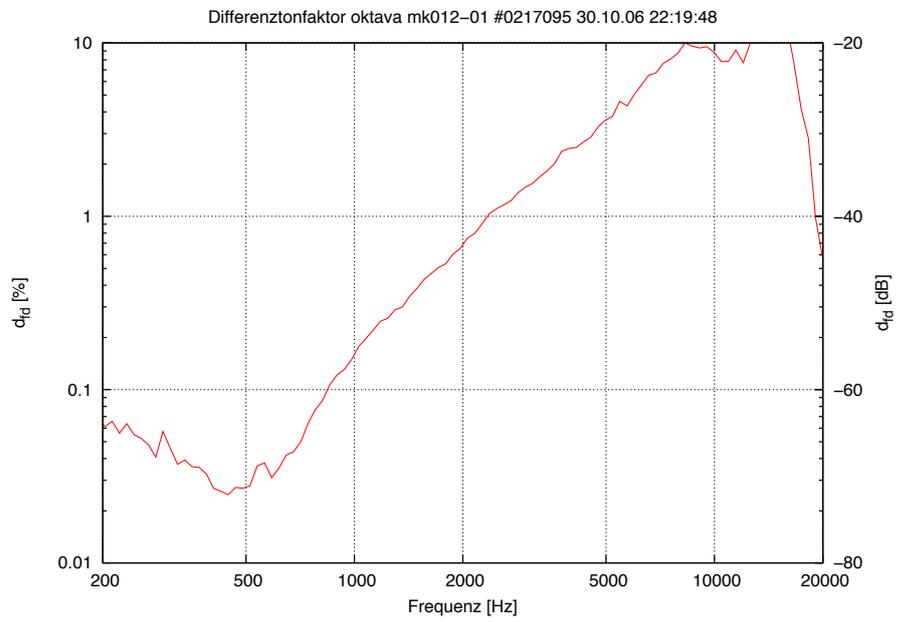
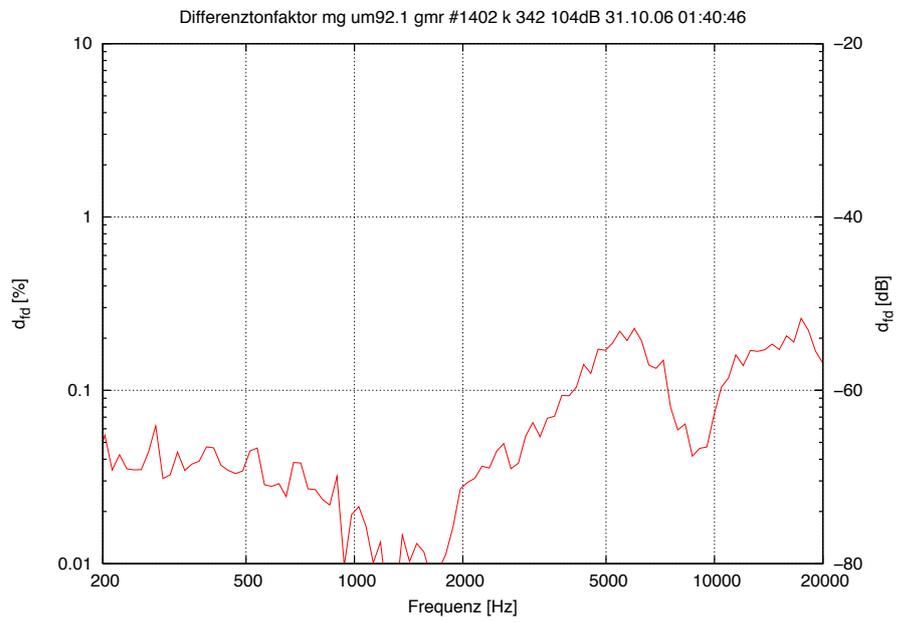


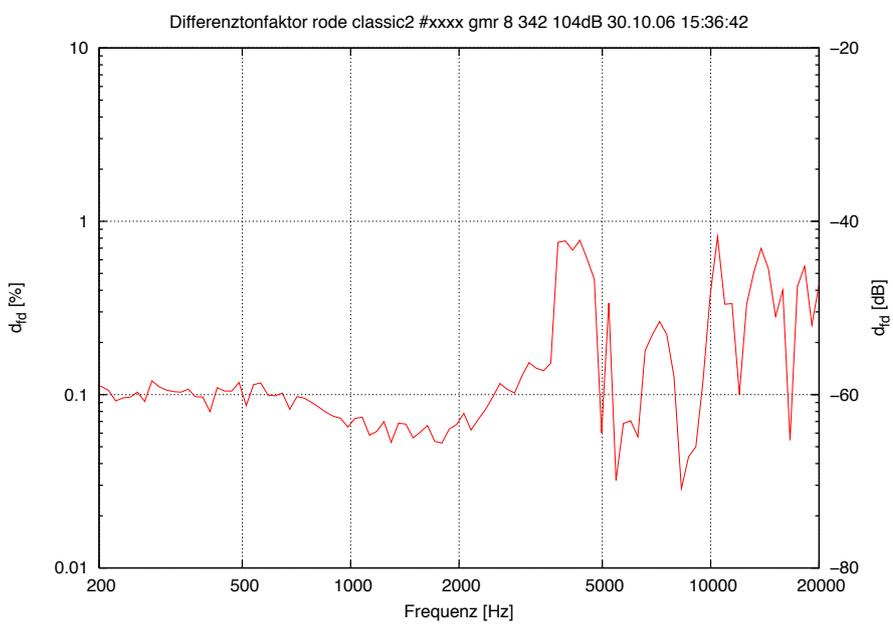
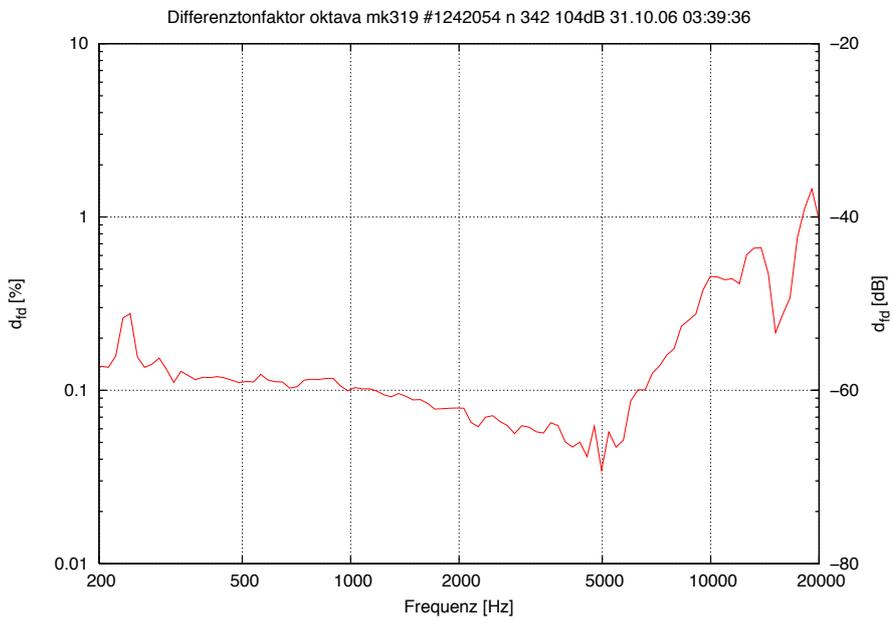


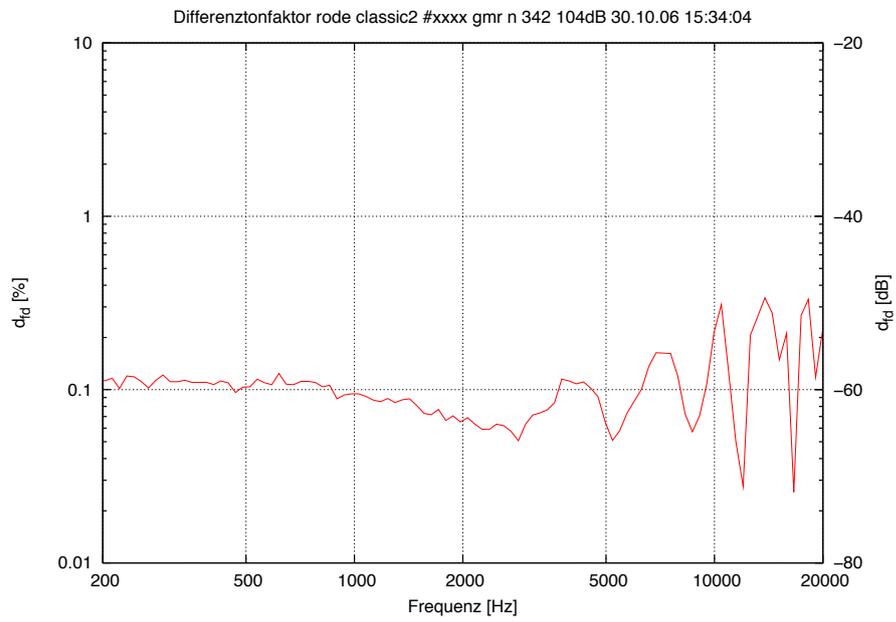
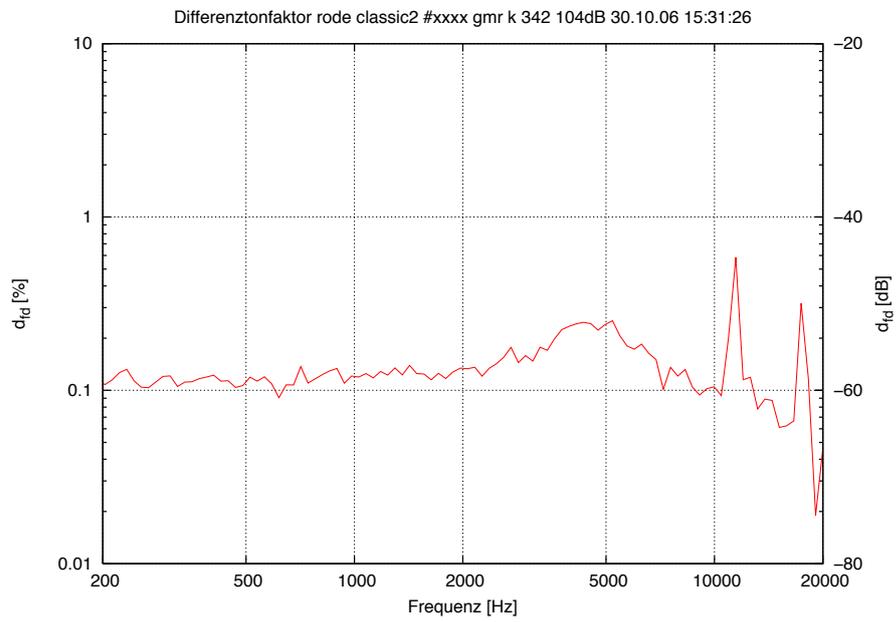


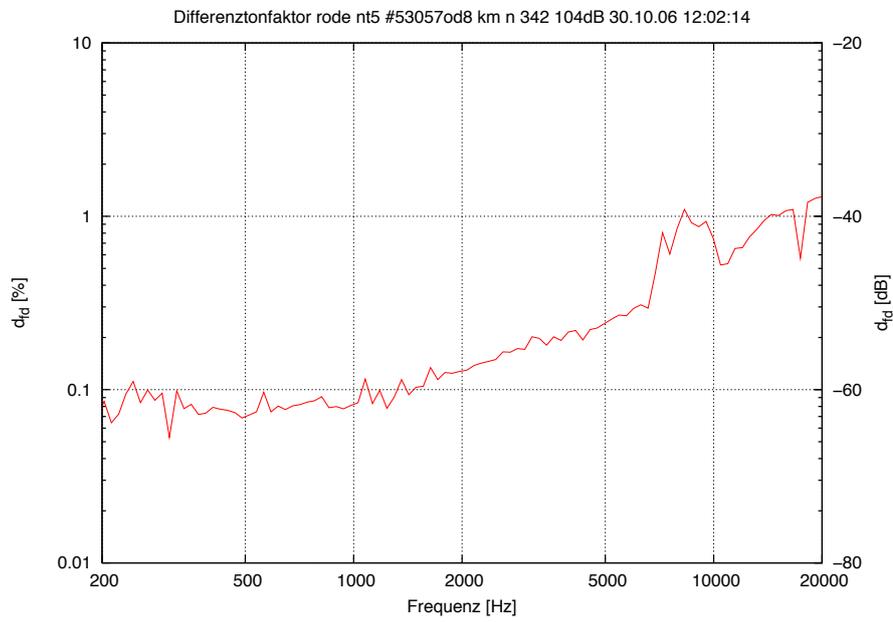
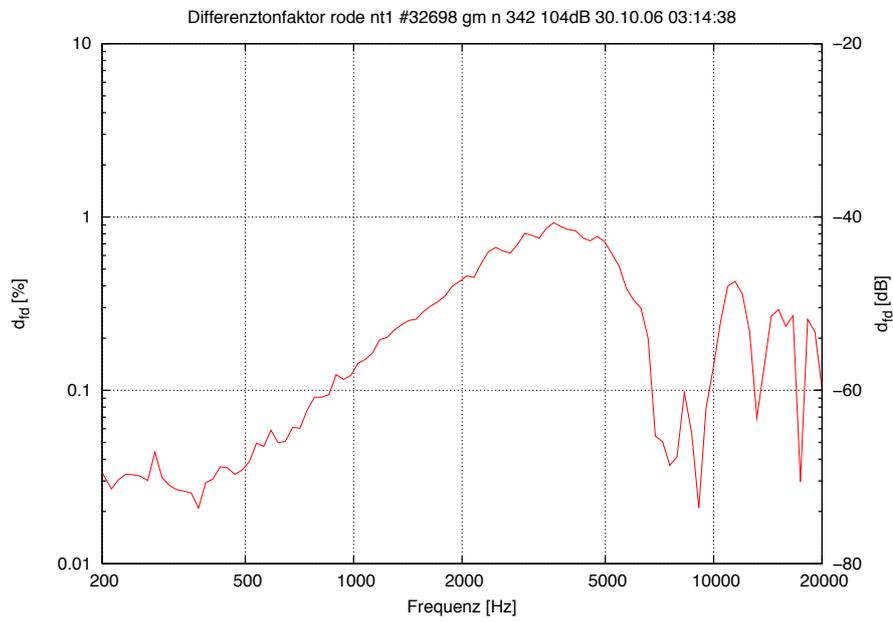


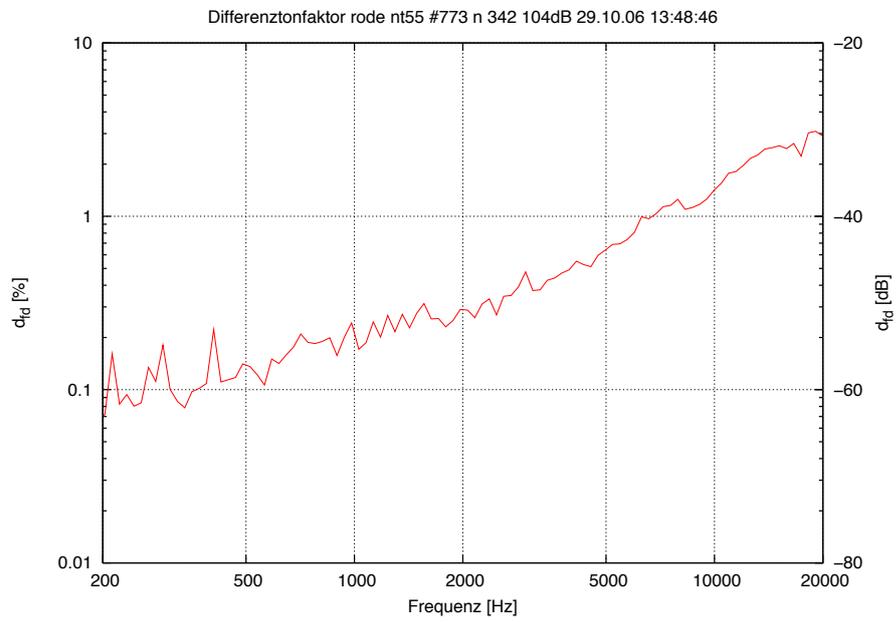
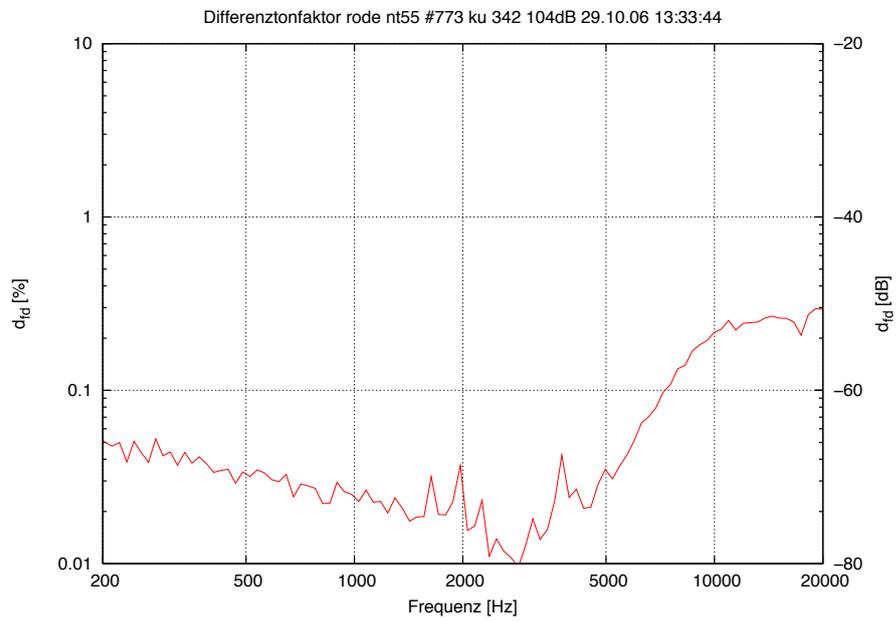


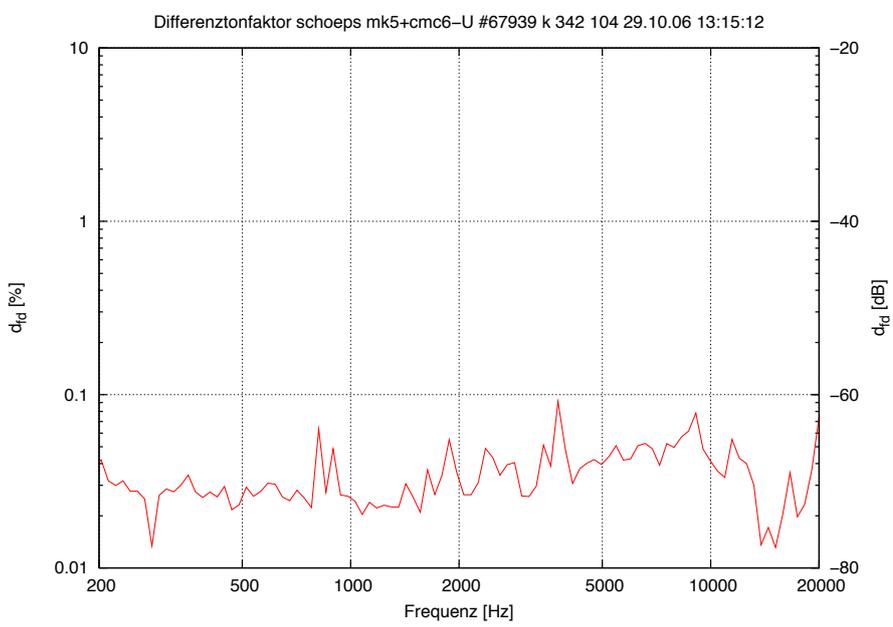
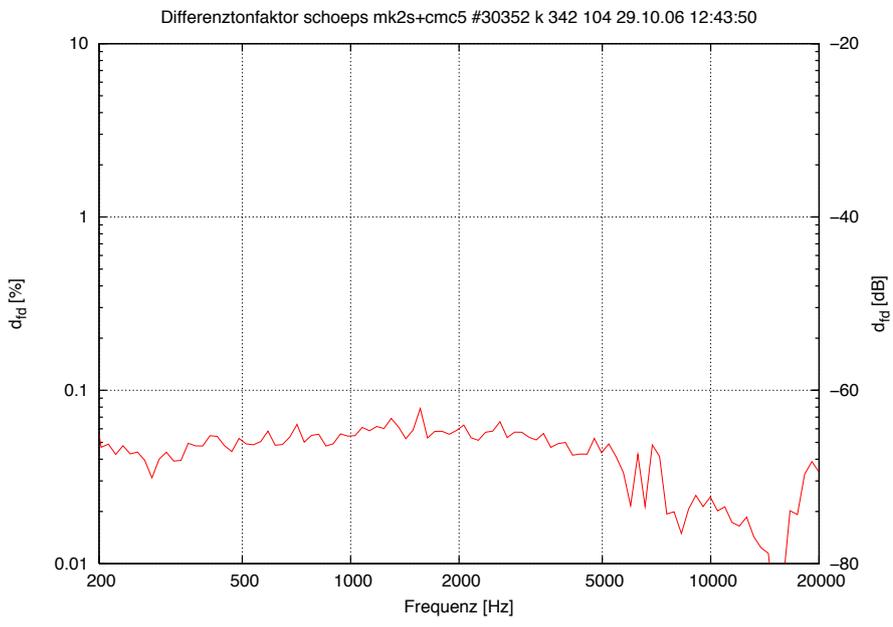


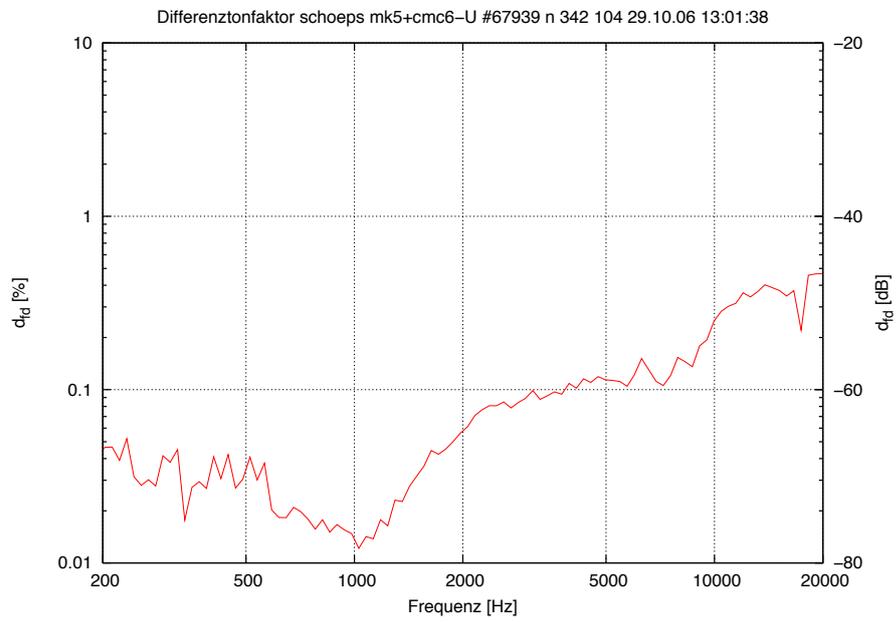
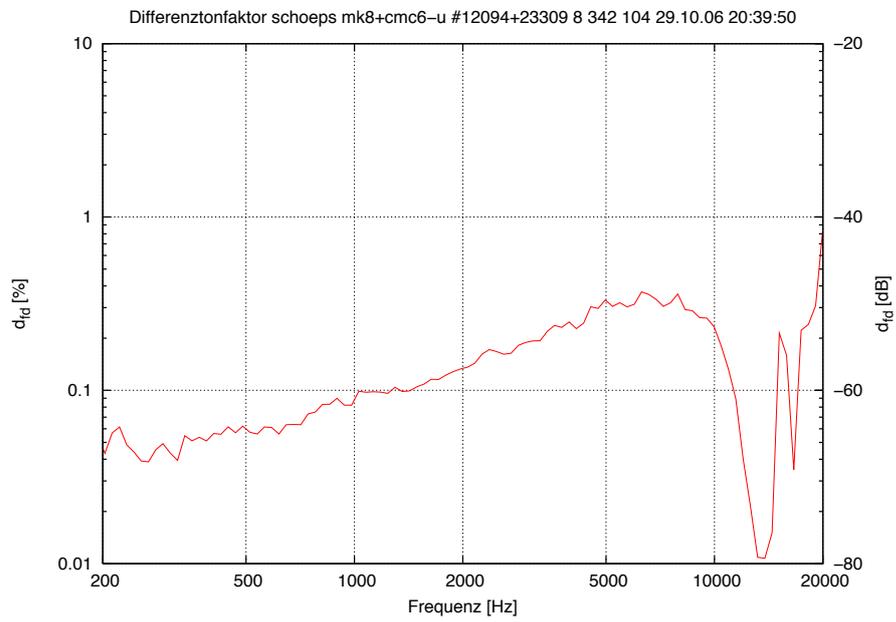


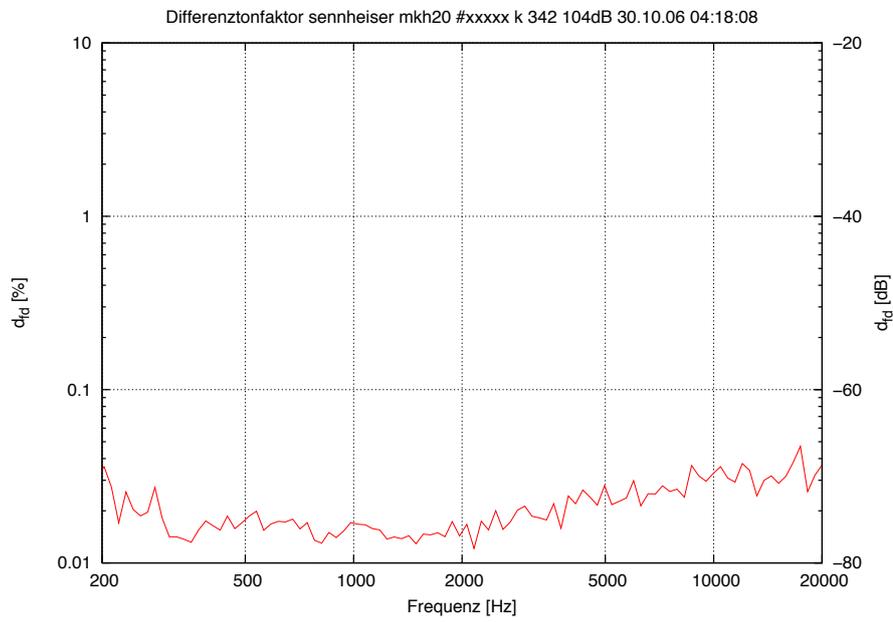
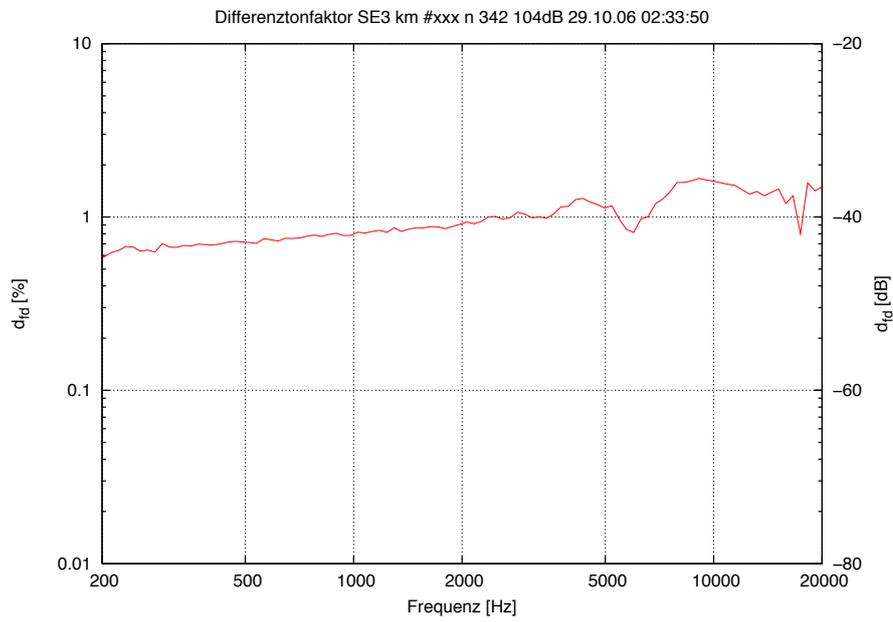


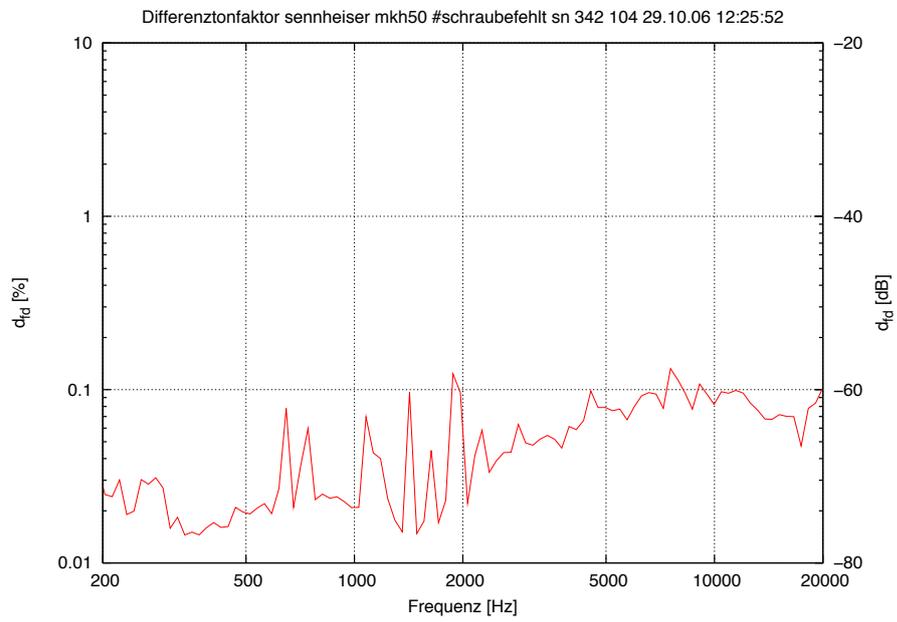
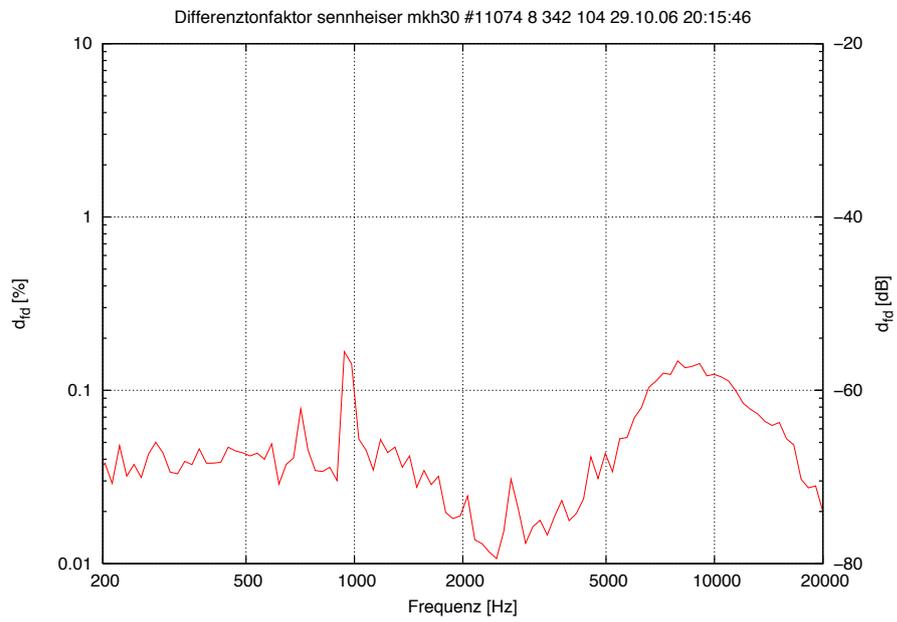




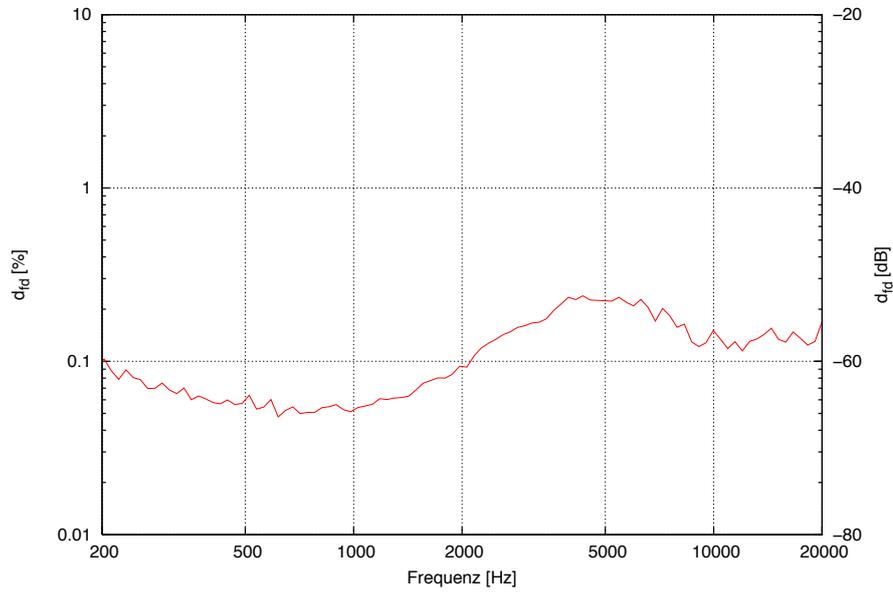




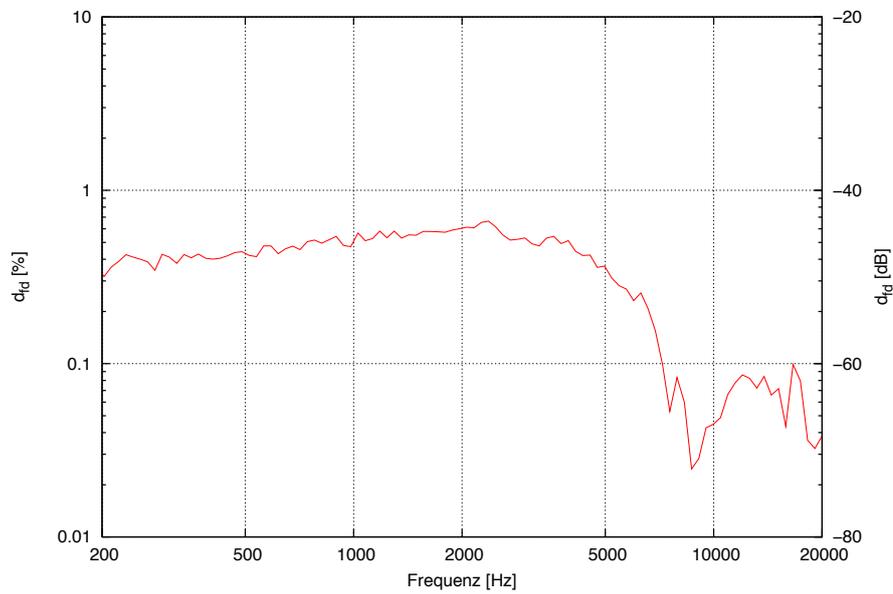


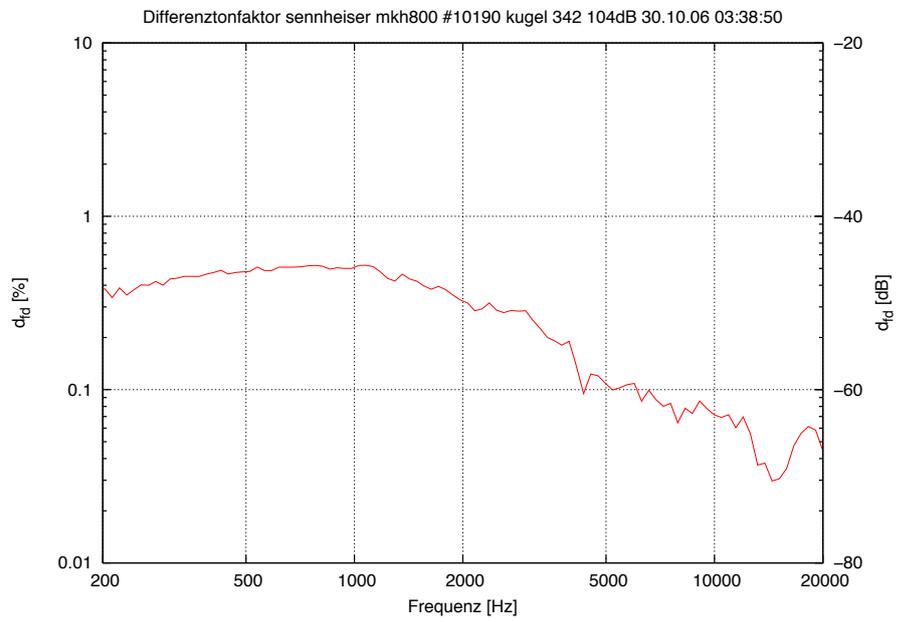
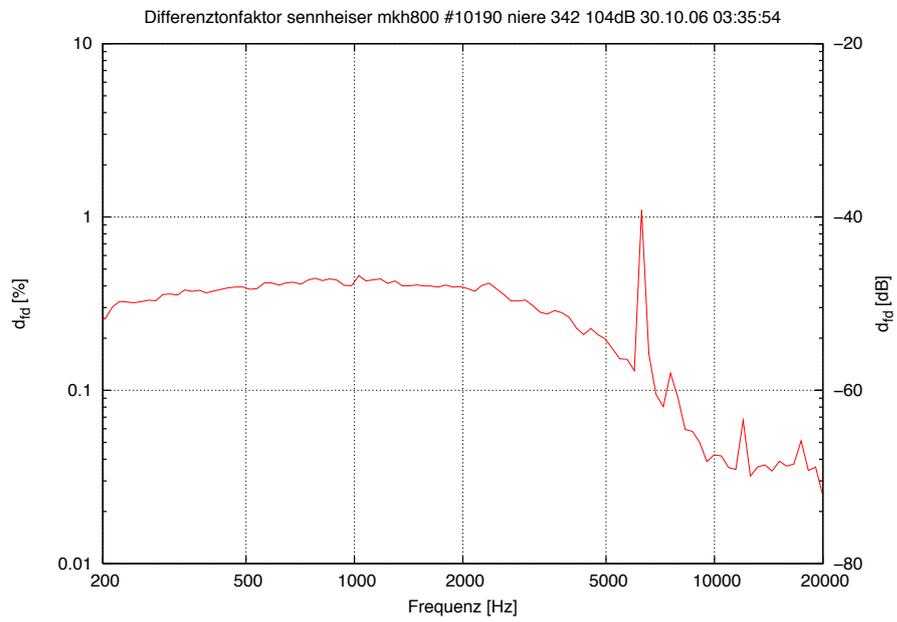


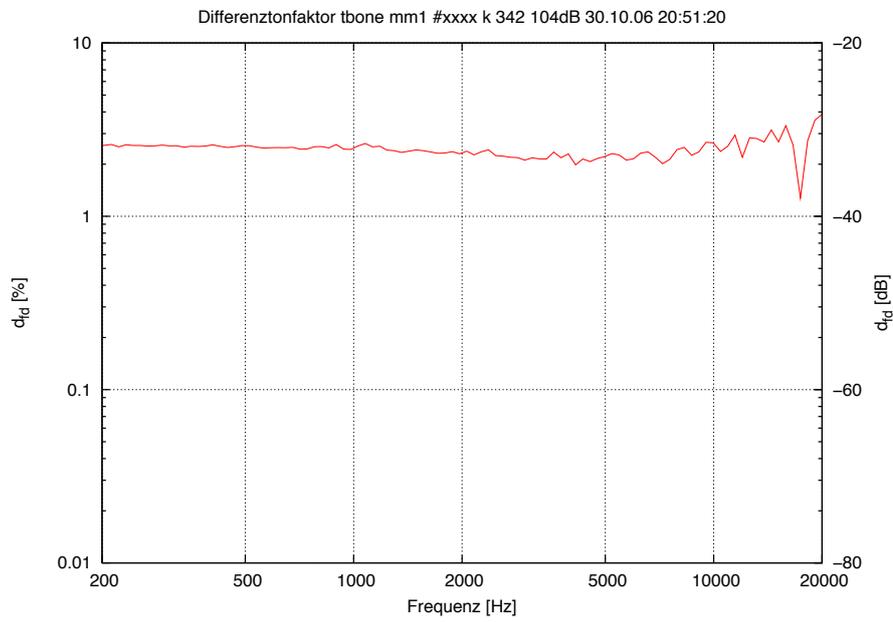
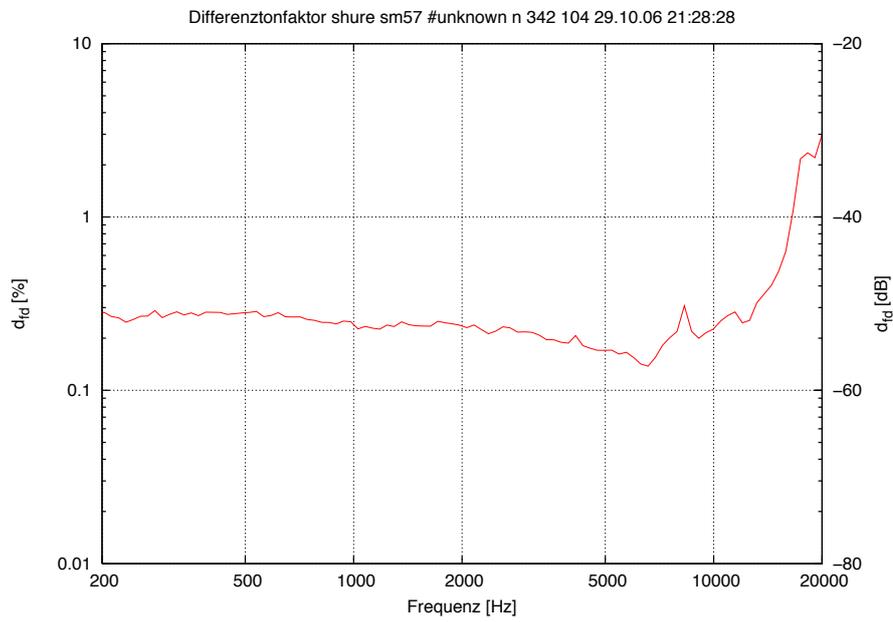
Differenztonfaktor sennheiser mkh70-1 #00017303 keule km 342 104dB 31.10.06 01:16:36

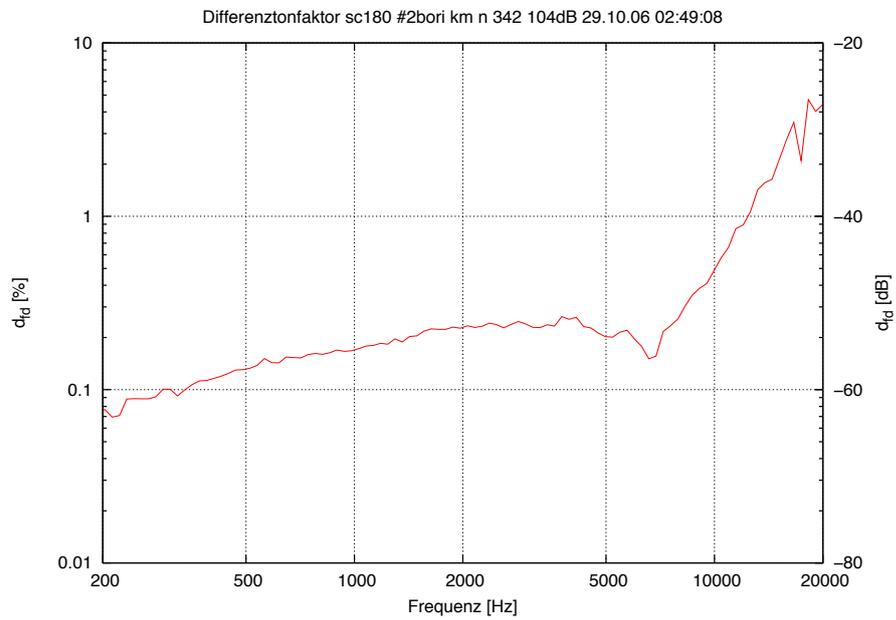
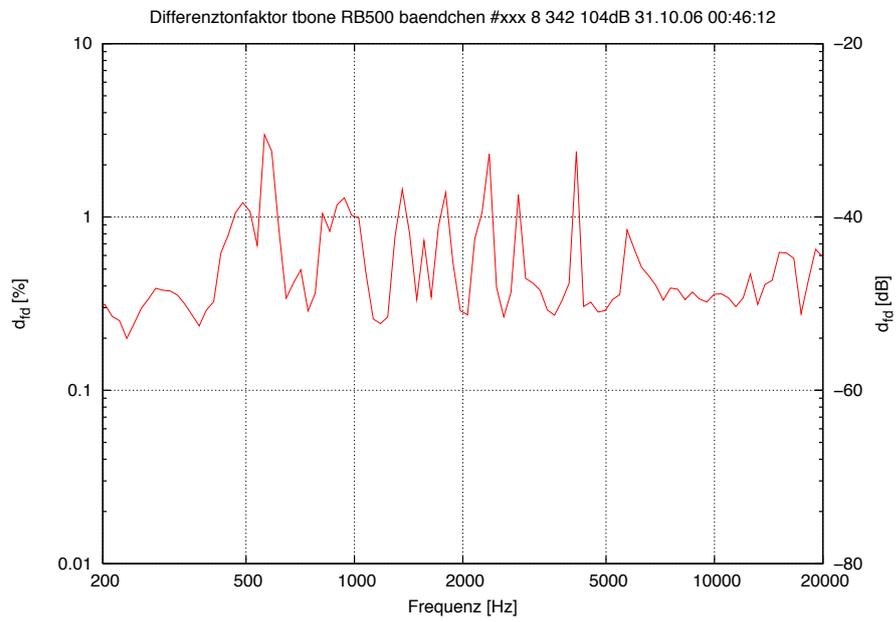


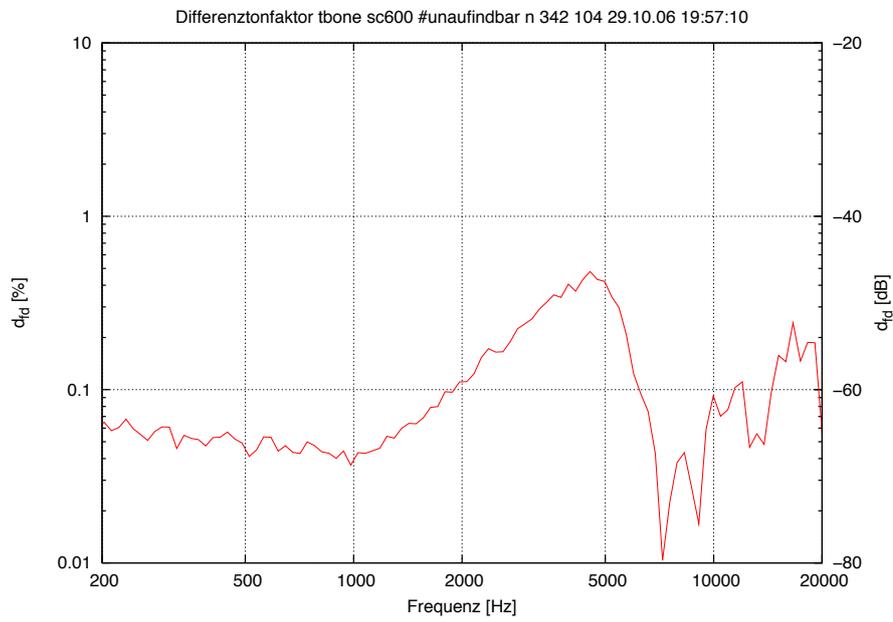
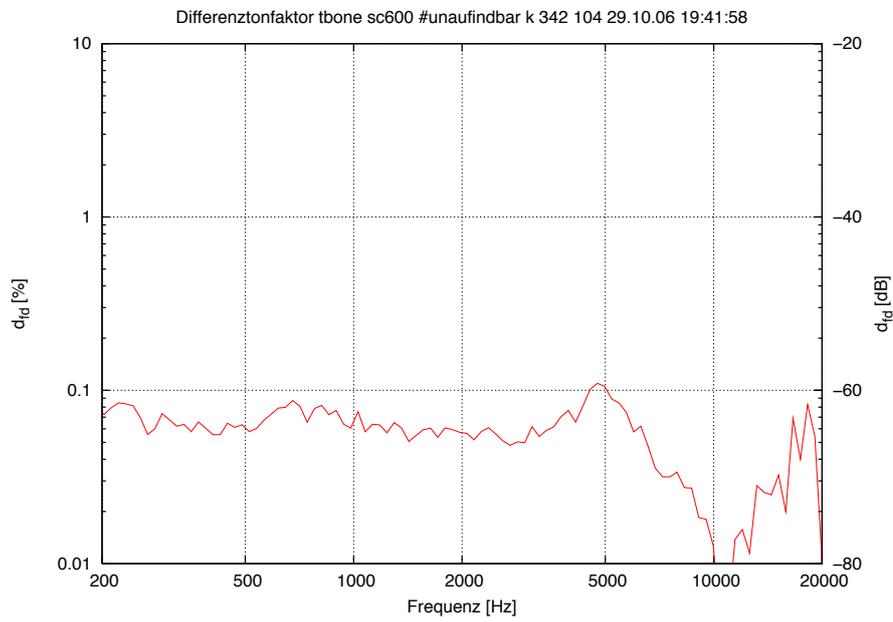
Differenztonfaktor sennheiser mkh800 #10190 8 342 104dB 30.10.06 03:41:52

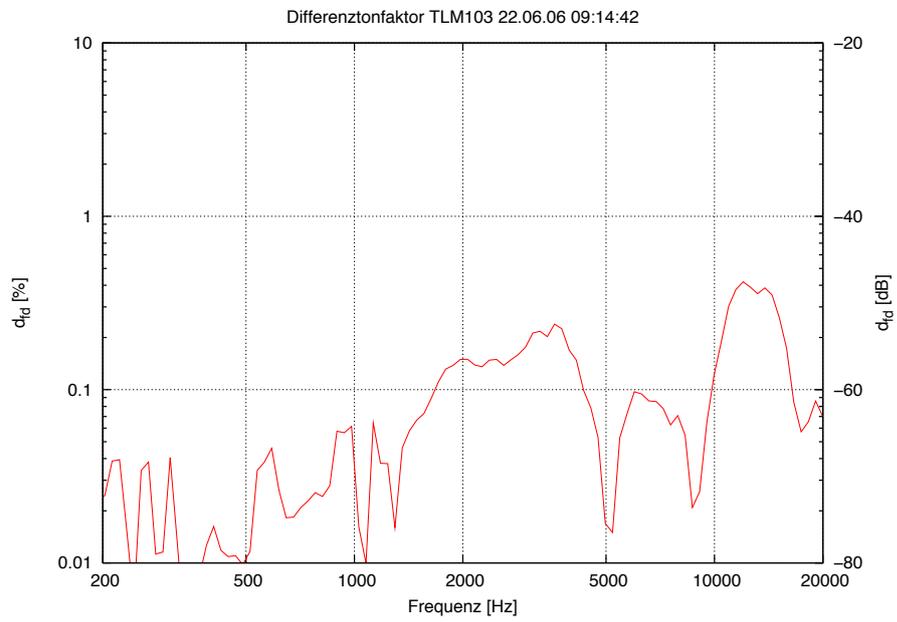
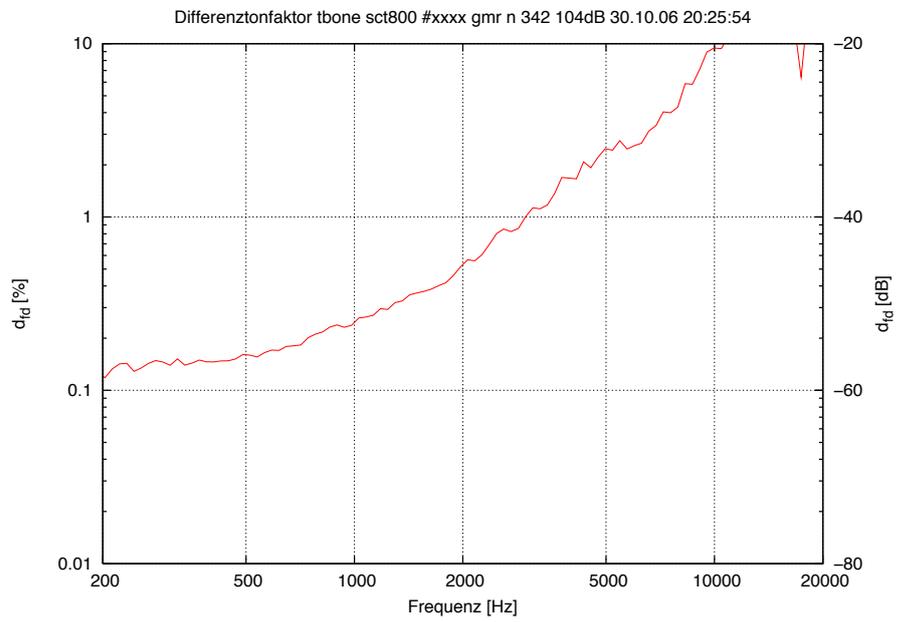


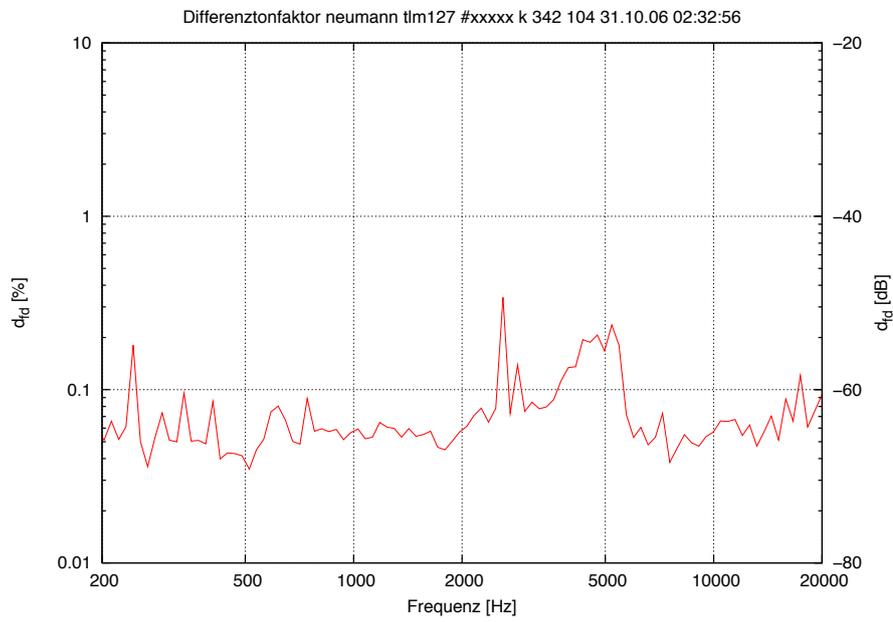
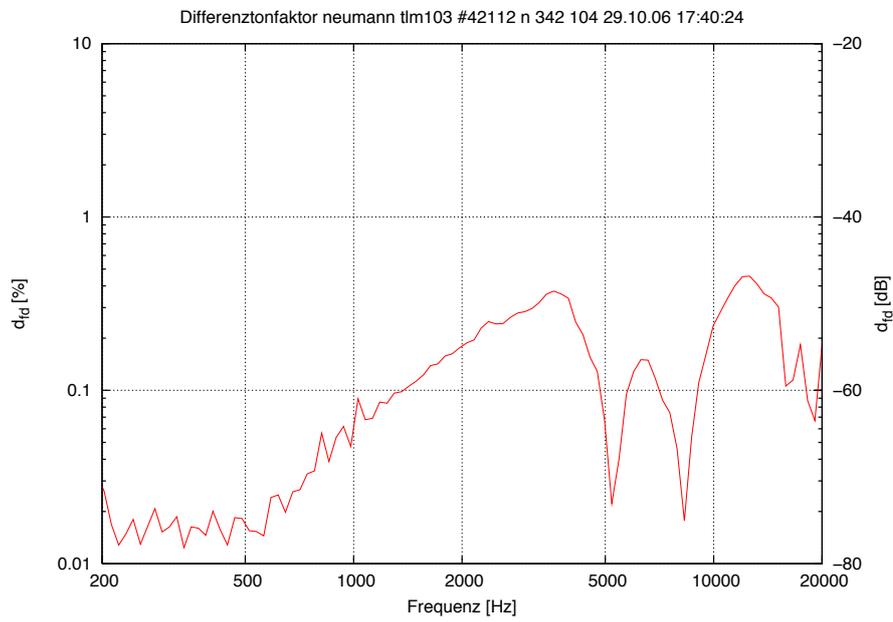


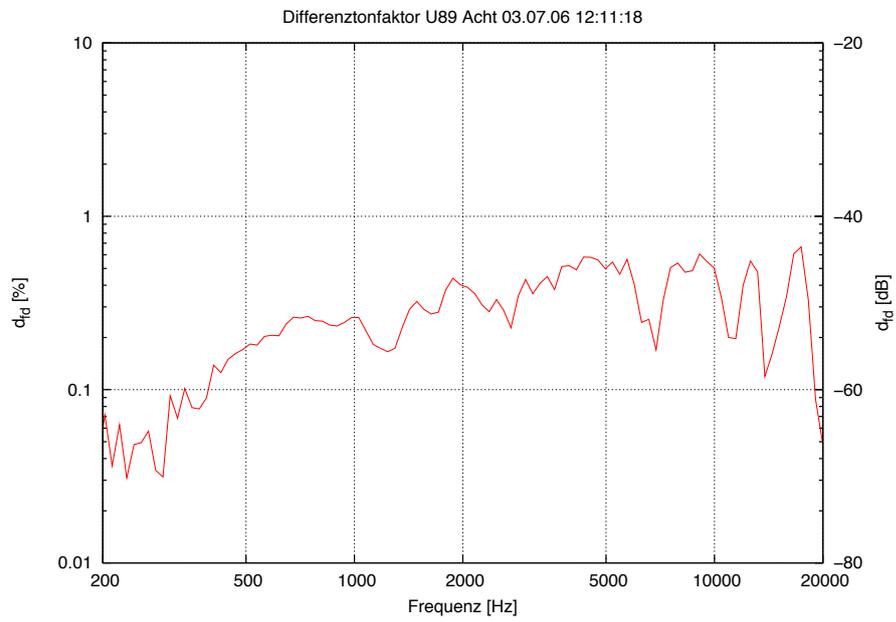
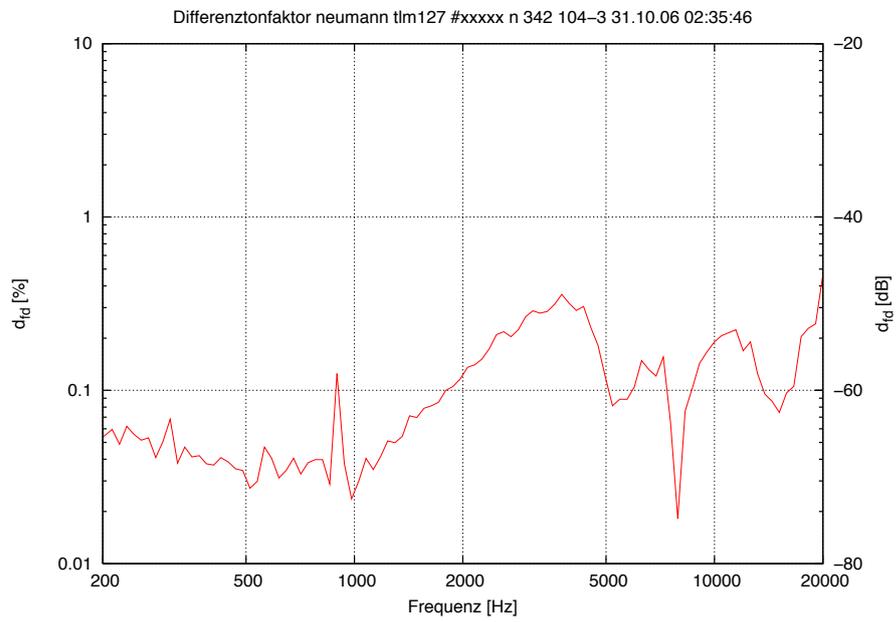


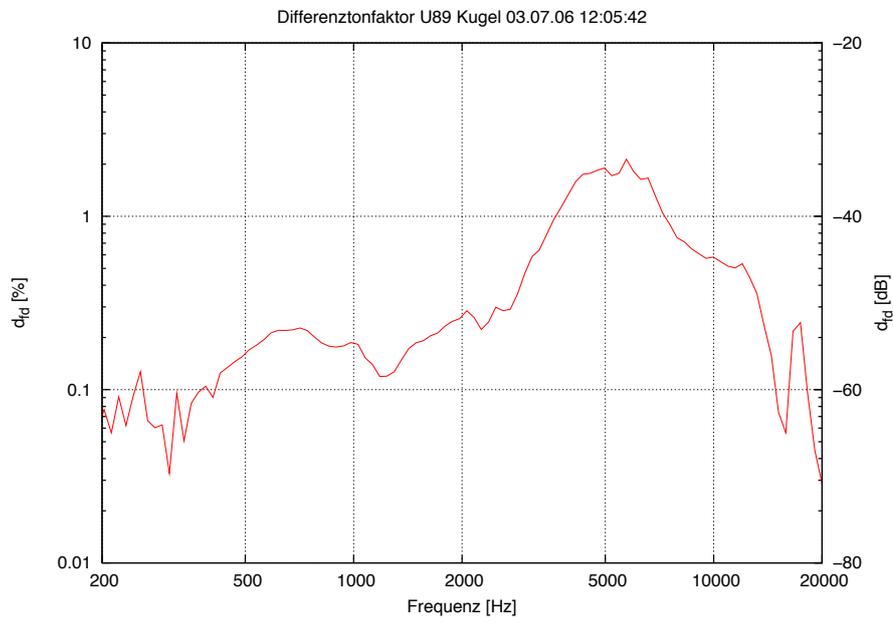
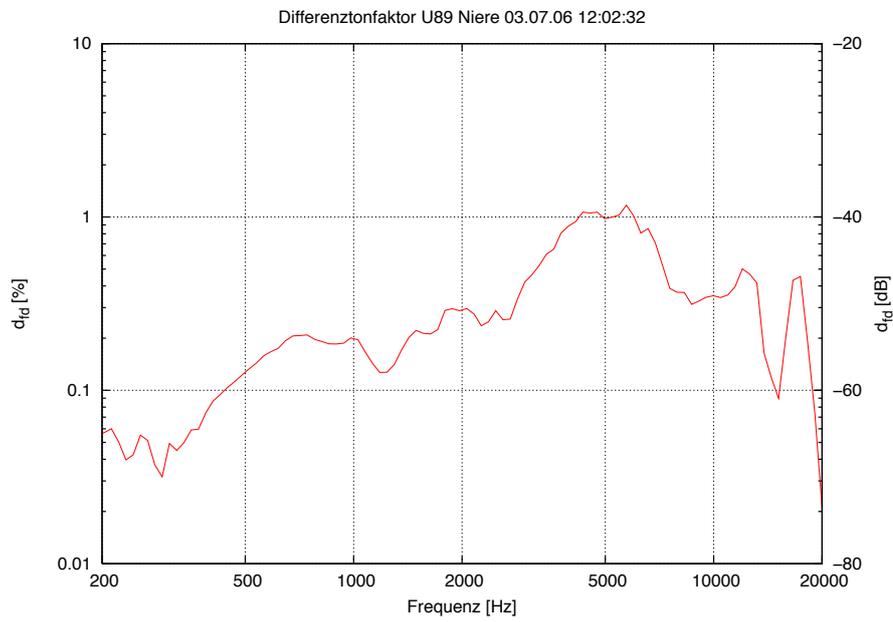


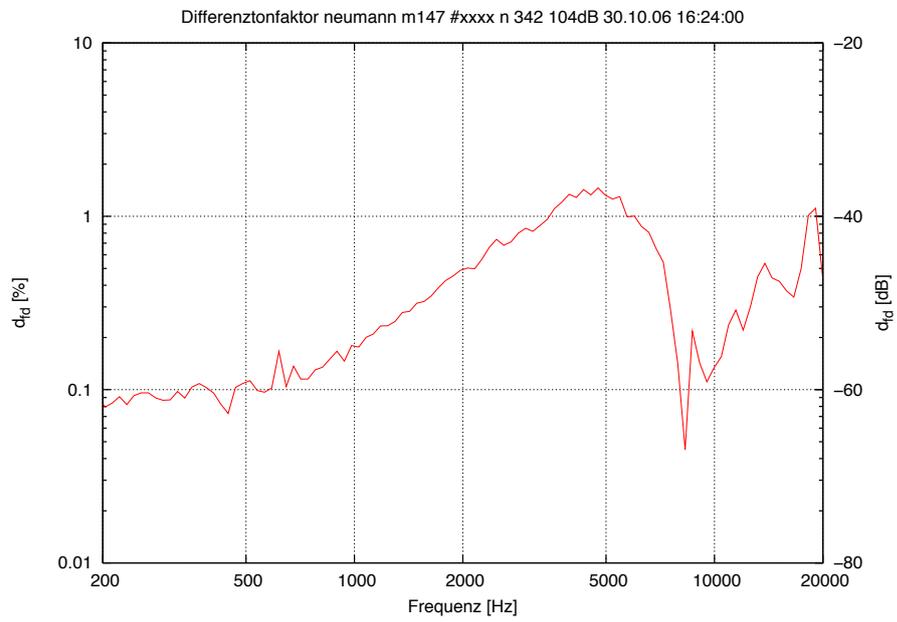
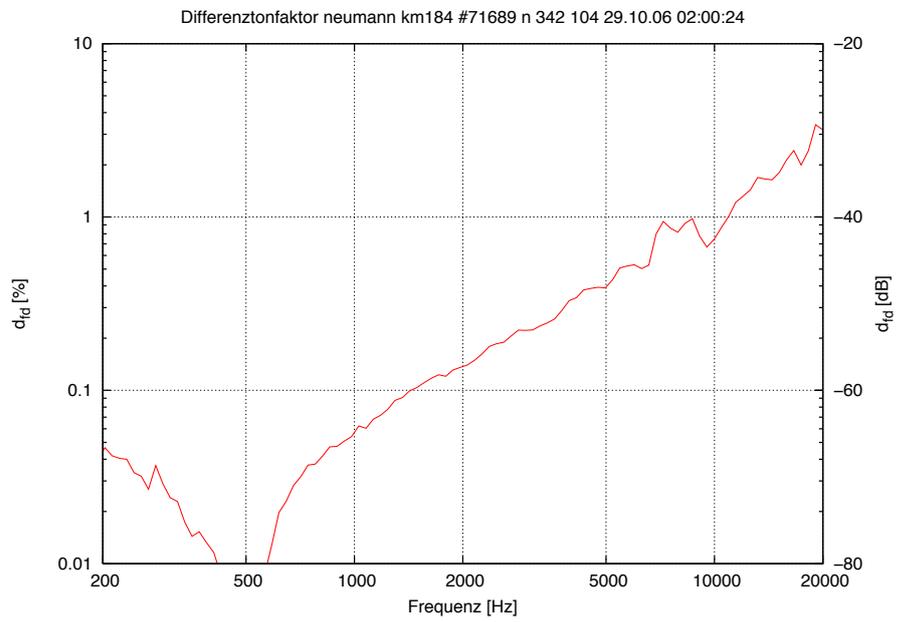


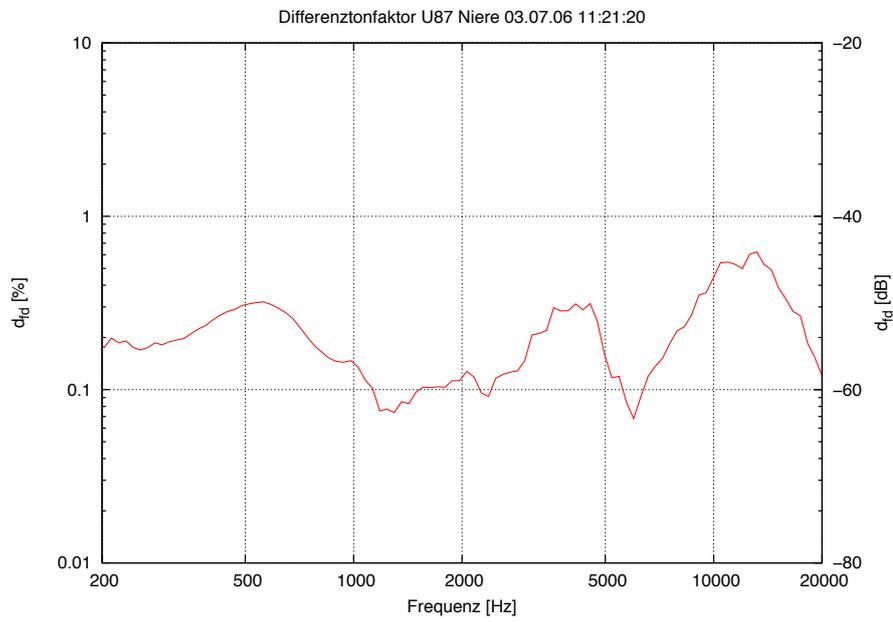
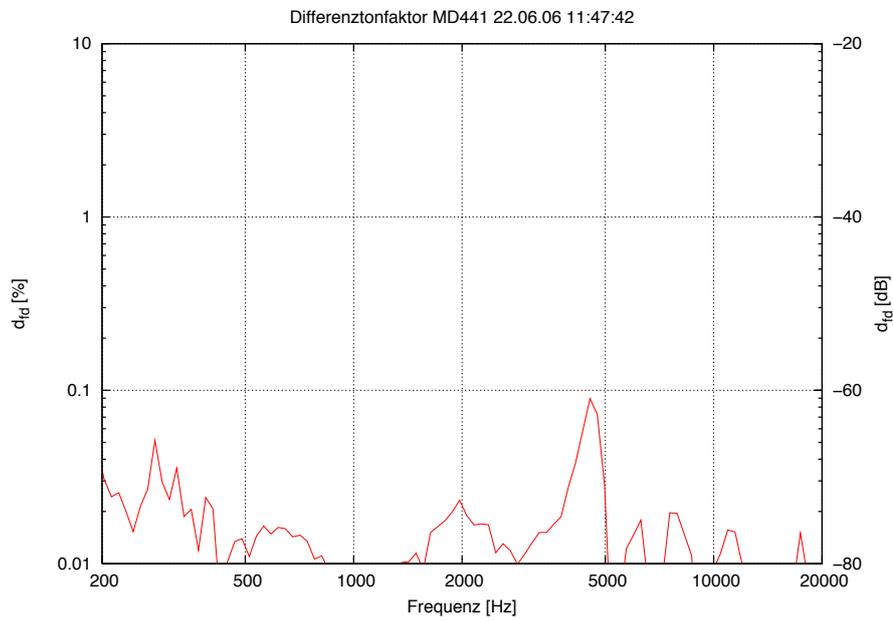






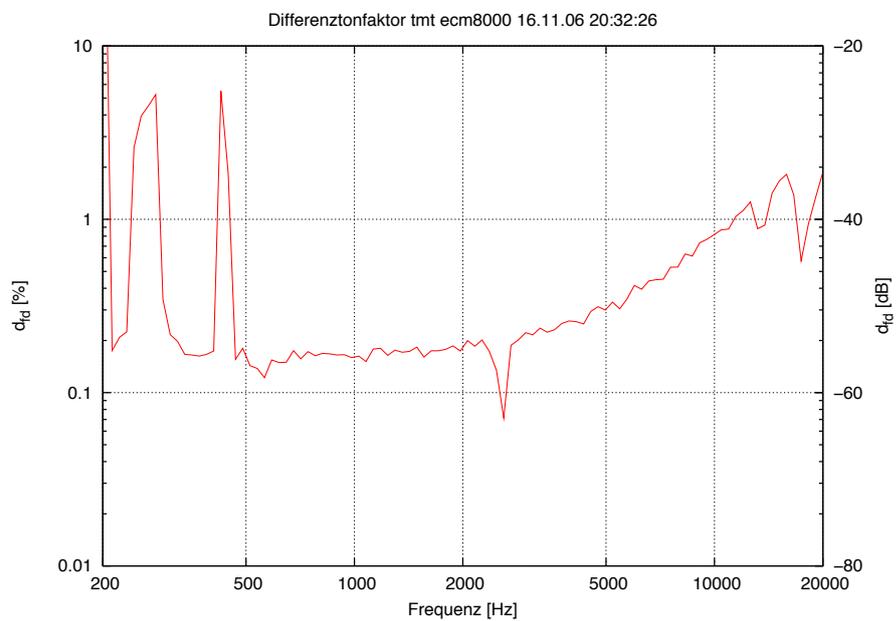


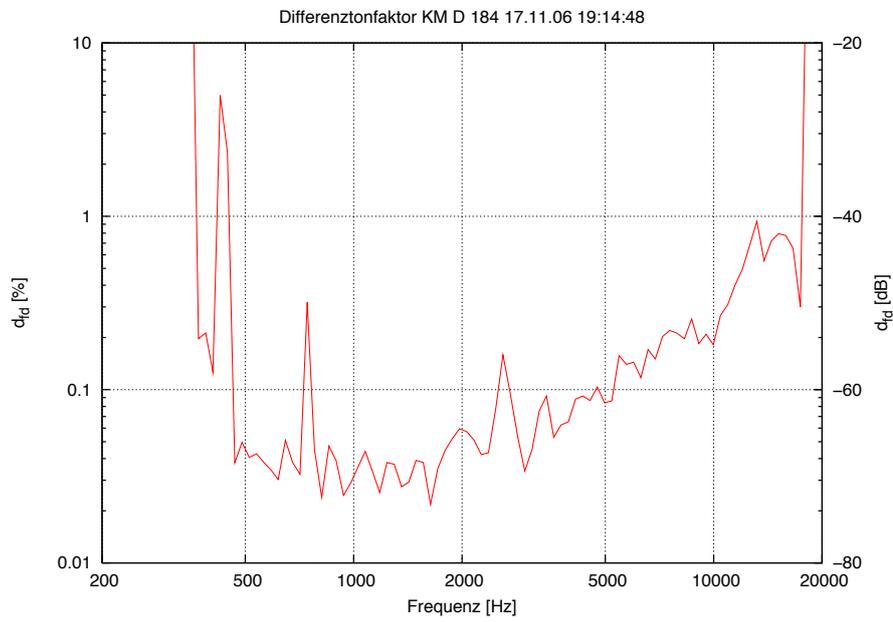
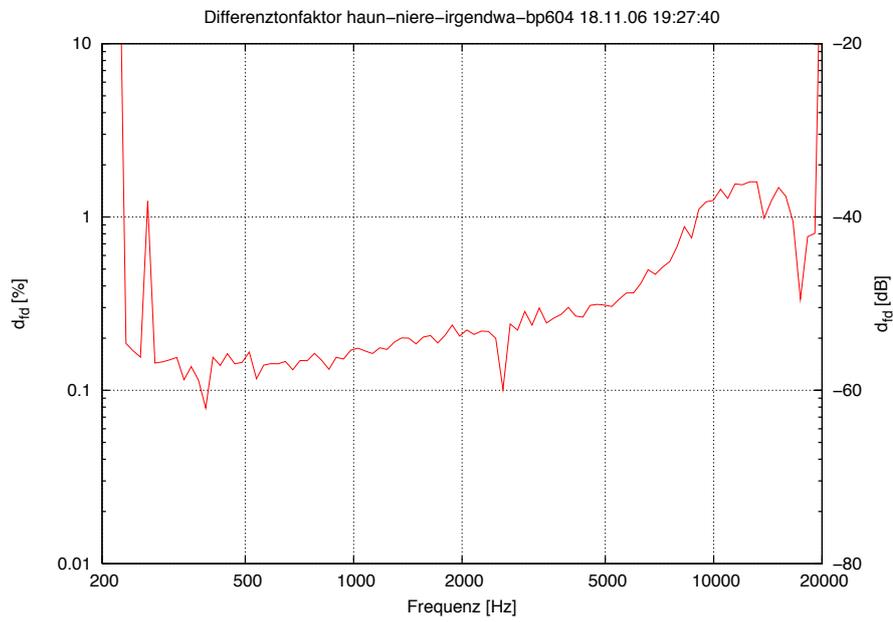




E.3 Portable Messungen bei der Tonmeistertagung in Hannover

Von der Tonmeistertagung haben leider nur wenige Messungen den Festplattecrash überstanden:





F CD

Zu der Arbeit gehören einige Daten, die sich schlecht auf Papier ausdrucken lassen, deshalb wird folgendes in elektronischer Form festgehalten:

- Arbeit als .pdf-Dokument
- PD-Patch des Messprogramms
- Zip-Archiv mit PD und dem Patch und einem Startfile für Windows Systeme
- Auswertungsskripte für die Darstellung als Tcl/Tk und Matlab Version
- Tcl / TK
- Gnuplot
- Messdaten