

Optimierung eines akustischen Prüfstands

Toningenieurprojekt

durchgeführt von

Thomas Kumar

Simon Meyer

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation
der Technischen Universität Graz

Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Kubin

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Weselak

Graz, im November 2018

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung und Qualifizierung eines Messverfahrens für einen akustischen Modellhallraum, welcher in der Masterarbeit von Martin Müller entworfen wurde. Das Messverfahren sollte nun möglichst konsistent mit der in der Industrie standardisierten Messsoftware PAK von Müller-BBM umgesetzt werden. Die benötigten Messschritte sollten so weit wie möglich reduziert werden, um einen zeit- und somit auch kosteneffizienten Messablauf zu ermöglichen. Weiters gilt es die erhaltenen Messdaten anhand einer Referenzmessreihe im reflexionsarmen SPSC-Tonstudio zu qualifizieren.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Aufbau des Modellhallraums | 1 |
| 1.2 | Ziele des Projekts | 2 |
| 1.3 | Vorbereitung der Messhardware | 2 |
| 1.3.1 | RME Babyface als Audio-Messinterface | 2 |
| 1.3.2 | Parasound HCA-800..... | 3 |
| 1.3.3 | Wahl der Messmikrofone | 4 |
| 1.4 | Vorbereitung der Mess-Software | 5 |
| 1.4.1 | PAK Project Manager | 5 |
| 2 | Entzerrung des Kammerfrequenzgangs | 7 |
| 2.1 | Messung der Lautsprecherimpulsantwort mit ARTA | 7 |
| 2.2 | Generierung des Quellsignals in Matlab | 11 |
| 2.3 | Messung der Frequenzgänge und Impulsantworten..... | 13 |
| 3 | Schalleistungsmessungen | 21 |
| 3.1 | Benötigtes Equipment | 21 |
| 3.2 | Messaufbau im reflexionsarmen Raum..... | 22 |
| 3.3 | Messaufbau im Modellhallraum | 23 |
| 3.4 | Messung der Nachhallzeit zur Bestimmung der Schalleistung..... | 23 |
| 3.5 | Durchgeführte Messreihe | 25 |
| 3.6 | Vergleich der Ergebnisse | 26 |
| 4 | Entzerrung des MHR | 29 |
| 4.1 | PAK-Grafikausgabe „MHR-Schalleistung“ | 29 |
| 4.2 | Entzerrung in Matlab..... | 31 |
| 4.3 | Entzerrungskurven | 35 |
| 4.4 | Entzerrte Messergebnisse..... | 36 |
| 5 | Diskussion der Messergebnisse | 37 |

Literaturverzeichnis

- [1] Weselak W., Akustische Messtechnik Skript, v.11.0 ,TU Graz, 2016
- [2] Balint J. und Weselak W., Akustische Messtechnik Labor Skript, v2.0, TU Graz, 2016
- [3] Hiebel, H. und Weselak W., Elektroakustik, Skriptum zur Laborübung, TU Graz, 2015
- [4] Müller M., Masterarbeit: Entwicklung eines akustischen Prüfstandes zur Schall-emissionsmessung kleiner elektrischer Geräte, TU Graz, 2017
- [5] Spötl J., Toningenieur-Projekt: Implementierung einer Nachhallzeitmessung mit Sinus-Sweep, TU Graz, 2013

1 Einleitung

1.1 Aufbau des Modellhallraums

Martin Müller hat im Zuge seiner Masterarbeit einen Modellhallraum entworfen. Die möglichst schallharten Wände wurden aus jeweils zwei MDF-Platten umgesetzt. Um einen annähernd dichten Abschluss zu gewährleisten, wurden am Deckel zwei umlaufende Dichtungen und vier Verriegelungen angebracht. Weiters hat Martin Müller verschiedene Positionen für die Messmikrofone und die Schallquelle untersucht. Als beste Variante erwies sich die Platzierung von jeweils einem Mikrofon je Ecke einer Seitenfläche und dem DUT in einer Ecke der gegenüberliegenden Fläche. Für die Ermittlung der ortsabhängigen Kammerfrequenzgänge ist in einer den Messmikrofonen gegenüberliegenden Ecke des Deckels ein Lautsprecher eingebaut. Für diese Messsituation ist der Modellhallraum bereits mit entsprechenden Vorrichtungen für die Kabelführung und Befestigung der Mikrofone vorbereitet (vgl. Abb. 1.1). Dieses Setup sollte nicht weiter verändert, sondern lediglich der dazugehörige Messablauf genauer untersucht und möglichst optimiert werden.

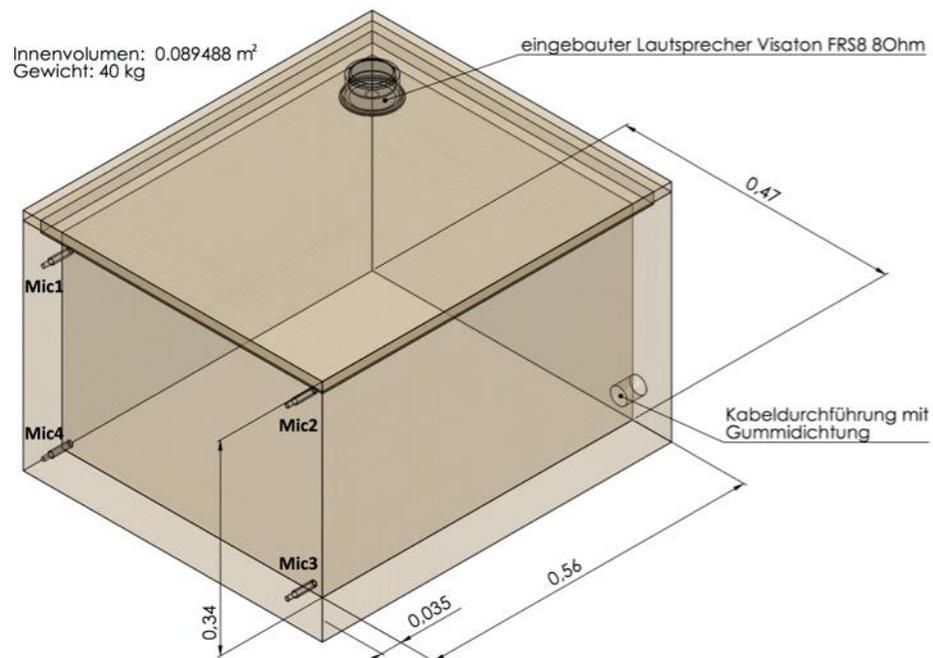


Abb. 1.1: Modellhallraum von Martin Müller

1.2 Ziele des Projekts

Die bisherige Vorgehensweise der Schallleistungsmessung in dem Modellhallraum erfolgte in der Masterarbeit mit Hilfe der ITA-Toolbox von Matlab. Dabei wurde zuerst der Frequenzgang des Modellhallraums mit dem Frequenzgang des Messlautsprechers korrigiert und anschließend die Messergebnisse mit dem so erhaltenen Korrekturfrequenzgang entzerrt.

Um den Messablauf zu optimieren und zu vereinfachen, werden in diesem Projekt folgende Punkte verfolgt:

- Messung des Frequenzgangs des Ecklautsprechers
- Generierung eines zeitveränderten Quellsignals zur inhärenten Entzerrung des Ecklautsprechers bei der Messung der Kammerfrequenzgänge
- Messung der Kammerfrequenzgänge an den vier vorbereiteten Eckmikrofonpositionen mit PAK
- Vergleich der gemessenen Raummoden mit den berechneten Raummoden aus der Masterarbeit von Martin Müller
- Implementierung einer für die Kammer entzerrten Schallleistungsmessung in PAK
- Untersuchung der Möglichkeit einer einheitlichen Wahl der Messmikrofone
- Erstellen einer Schallleistungs-Messreihe für ein DUT (Kompressor) im Modellhallraum und als Referenz im reflexionsarmen Raum (Tonstudio des SPSC)
- Vergleich der entzerrten Hallraummessreihe mit der Freifeldmessreihe

1.3 Vorbereitung der Messhardware

1.3.1 RME Babyface als Audio-Messinterface

Um ein Audiointerface für Messzwecke verwenden zu können, sind folgende Voreinstellungen erforderlich:

- Die entsprechenden Kanalzüge für In- und Output müssen auf 0 dB eingestellt sein.
- Alle Plugins wie Lowcuts und EQ's müssen deaktiviert sein.
- Nur die gewünschten Eingänge dürfen auf den Ausgang spielen.
- Die Samplerate muss entsprechend der geforderten Auflösung eingestellt werden.
- Die Buffer Size muss entsprechend der Rechner-Performance eingestellt werden, sodass während der Messung keine Artefakte auftreten.

Für die folgenden Messungen wird ein digitaler Eingang benötigt, der auf zwei Mono-Ausgänge geroutet wird. Über einen Ausgangskanal wird das Quellsignal an das PAK-Modul gesendet, der zweite Kanal schickt es über den Verstärker zum Lautsprecher. Die Samplerate ist auf 48 kHz eingestellt, was der maximalen Auflösung des Interfaces sowie der Einstellung des PAK-Moduls entspricht. Für die Buffer Size sind 1024 Samples eingestellt.

Für dieses Setup wurde am PAK-Rechner in der Software-Mixerkonsole „Total Mix“ ein Snapshot „TIP PAK“ erstellt, der bei Bedarf wieder aufgerufen werden kann.

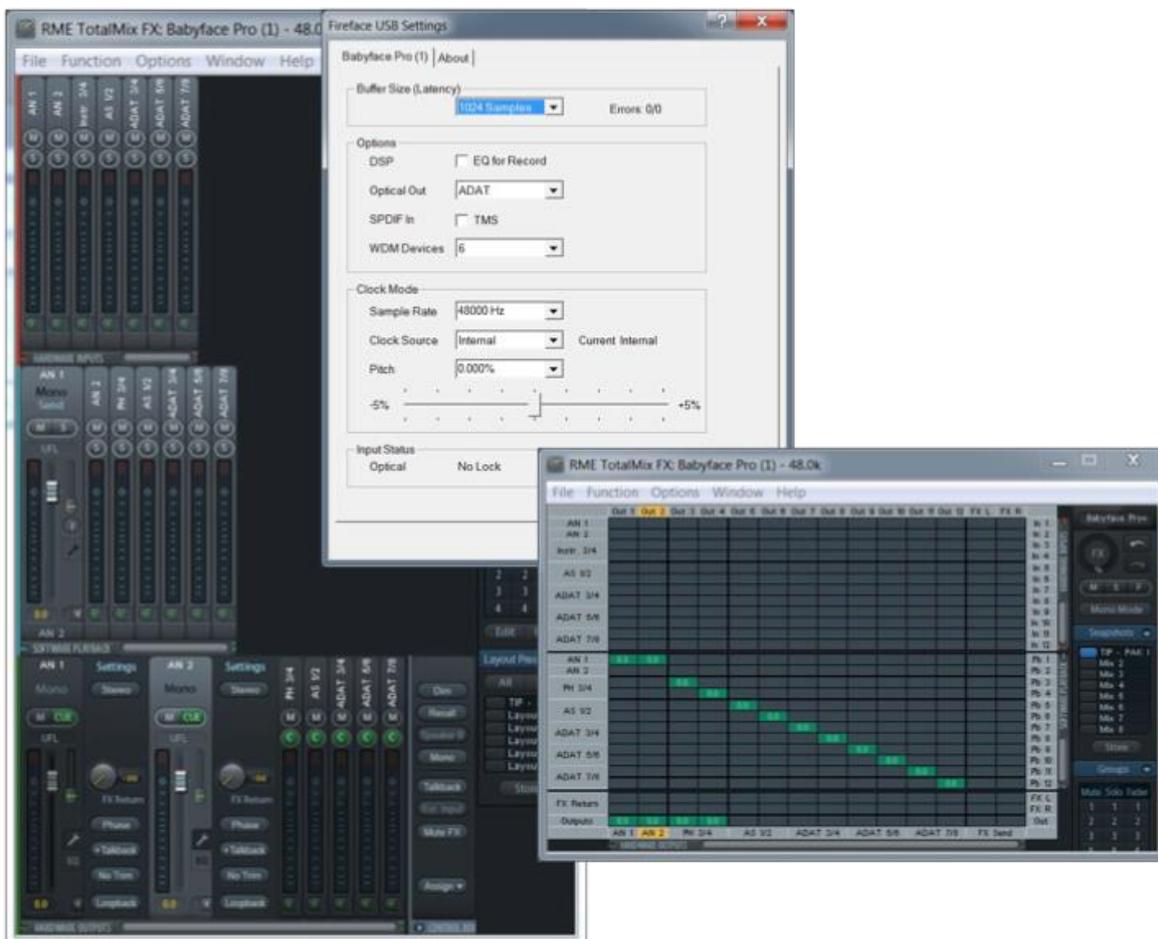


Abb. 1.2: RME Total Mix (Voreinstellung)

1.3.2 Parasound HCA-800

Für die Reproduzierbarkeit der Messungen ist es notwendig, die Pegel in der Messkette konstant zu halten. Da der Verstärker für den Ausgangspegel einen stufenlosen Volumeregler ohne Skala hat, wurde die optimale Einstellung für das vorliegende Messsetup entsprechend markiert. Die Einstellung entspricht dem Pegel, bei dem der Lautsprecher das mit 0 dBFS normalisierte Quellsignal des PAK-Rechners noch nicht wesentlich verzerrt wiedergibt.



Abb. 1.3: Parasound HCA-800 Verstärker

1.3.3 Wahl der Messmikrofone

Die Halterungen im Modellhallraum wurden für Viertelzollmikrofone der Firma G.R.A.S ausgelegt. Um das Messsetup der Schallleistungsmessung im reflexionsarmen Raum möglichst gleich zu wählen, erfolgte eine Eignungsprüfung dieser Mikrofone. Auch nach der Anpassung der Quantisierungsstufe auf die entsprechend geringen Messspannungen zeigte sich das ermittelte Grundrauschen zu hoch. Das SNR bei Verwendung der Viertelzoll-Mikrofone im mittleren Frequenzbereich von teilweise nicht einmal 5 dB ist deutlich zu gering. Weiters ist zu beachten, dass auch bei den größeren Halbzoll-Mikrofonen im Frequenzbereich unter 100 Hz lediglich mit einer relativ niedrigen SNR gemessen werden konnte.

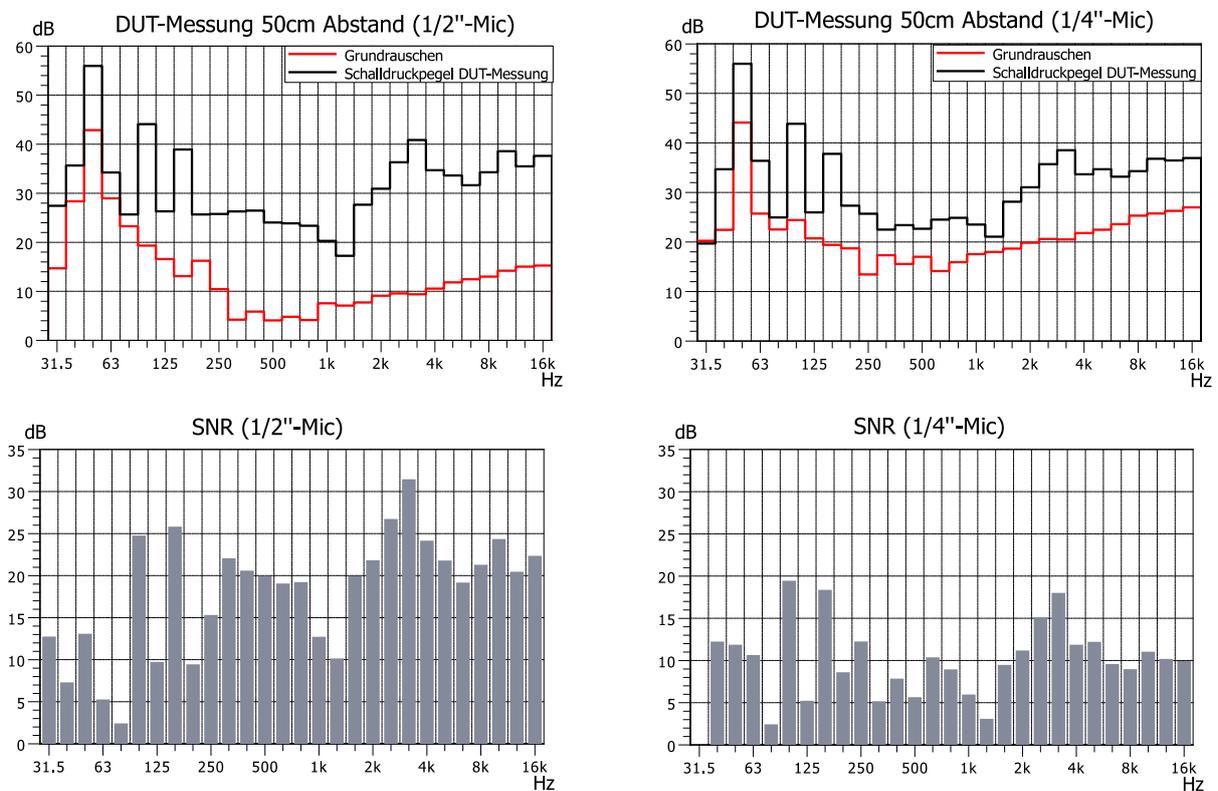


Abb. 1.4: Vergleich der Viertel- und Halbzoll-Messmikrofone

1.4 Vorbereitung der Mess-Software

Die Messung des Lautsprecherfrequenzgangs erfolgte mit der Software ARTA mit der Vorgehensweise aus der Elektroakustik-Laborlehrveranstaltung. Alle weiteren Messungen wurden mit Hilfe von PAK der Firma Müller-BBM und dem zugehörigen Front-End MKII mobile durchgeführt. Für diverse Berechnungen wurden Matlab-Standalone-Programme erstellt, die nach Bedarf von PAK aufgerufen werden. Diese Vorgehensweise kann dem Toningenieurprojekt von Jakob Spötl entnommen werden.

Die in PAK erstellten Messabläufe und Messauswertungen sind alle mit MHR („Modellhallraum“) gekennzeichnet und besitzen einheitliche Mess-Grundeinstellungen, um die Kombination der Messungen zu ermöglichen:

- Abtastrate: 48 kHz
- Messdauer: 20s (für die Schalleistungsmessungen 60s)
- Schrittweite: 0.5s
- Kanäle für die Mikrofone: Kanal 1 bis 5 (je nach Anzahl der benötigten Mikrofone)
- Kanal für das Quellsignal: Kanal 12 (falls benötigt)
- FFT/Oktav-Parameter:

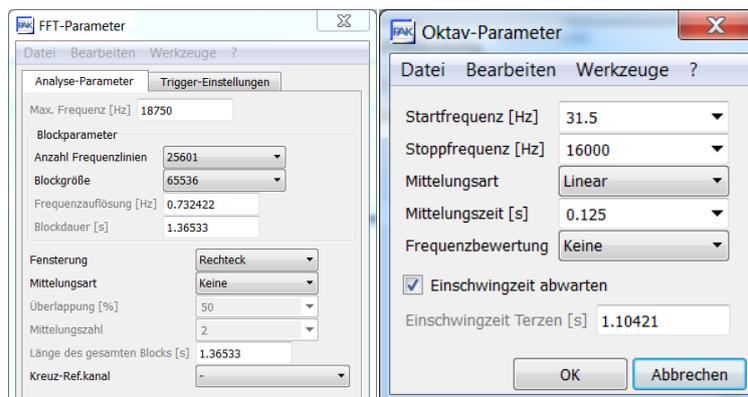


Abb. 1.5: PAK FFT/Oktav-Parameter-Einstellungen

Bei Messungen im Modellhallraum wird das Mikrofon 1 dem Kanal 1 zugeordnet, die weiteren Mikrofone werden aufsteigend im Uhrzeigersinn angeschlossen (vgl. Abb. 1.1).

1.4.1 PAK Project Manager

Der PAK Project Manager dient dazu, ein Projekt anzulegen, bei dem alle Dateien und Messdaten in einem Projektcontainer zusammenfasst werden.

Im Pfad „D:\PAK_ProjectManager\Project_Root_Container“ wird beim Erstellen eines neuen Projekts über die Schaltfläche „Neues“ ein Projektordner angelegt, der die gleiche Ordnerstruktur wie der PAK-Standardpfad enthält.



Abb. 1.6: PAK project manager (Startfenster)

Beim Zugriff auf Dateien aus dem PAK-Standardpfad werden diese nach einer Abfrage in den aktiven Projektordner kopiert. Auch das Abspeichern neuer Dateien ist nur in diesem Ordner möglich. Somit ist gewährleistet, dass alle Dateien und Messdaten ausnahmslos in dem Ordner liegen.

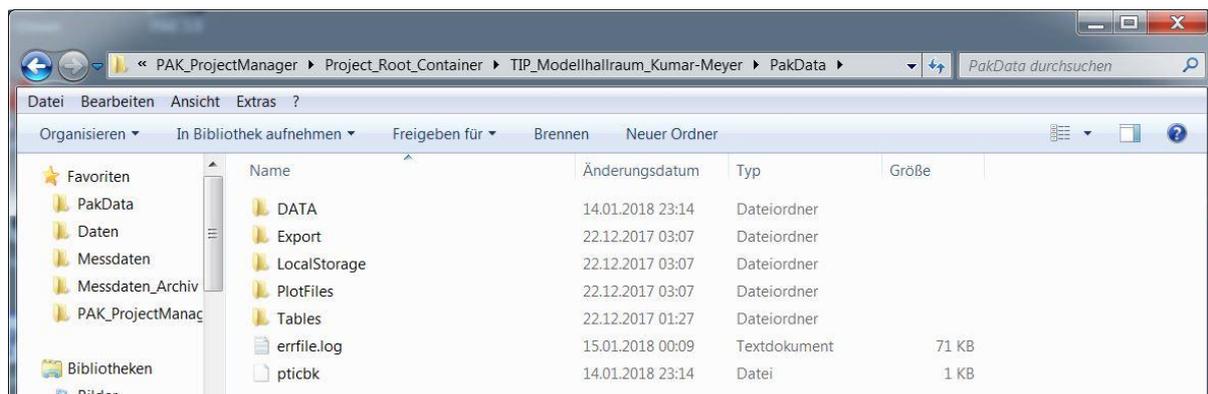


Abb. 1.7: PAK project manager (Projektpfad)

Für dieses Masterprojekt wurde ein neues Projekt mit der Bezeichnung „TIP_Modellhallraum_Kumar-Meyer“ angelegt. Alle Dateien und verwendeten Programme für dieses Projekt befinden sich in diesem Ordner. Somit beziehen sich alle folgenden Pfadangaben auf diesen Pfad:

D:\PAK_ProjectManager\Project_Root_Container\TIP_Modellhallraum_Kumar-Meyer

Im Ordner „PakData\DATA\TIP_Modellhallraum_Kumar-Meyer\Matlab“ sind die von PAK benötigten Matlab-Programme hinterlegt. Alle Zwischenspeicherungen zur Mittelung der Messdaten werden im Ordner „PakData\DATA\TIP_Modellhallraum_Kumar-Meyer\Messreihe_Messdaten“ abgelegt.

2 Entzerrung des Kammerfrequenzgangs

2.1 Messung der Lautsprecherimpulsantwort mit ARTA

Folgende Abbildung zeigt den Messaufbau im Tonstudio für die simulierte Freifeldmessung mit den Vorgaben und dem Equipment aus der Elektroakustik-Laborlehrveranstaltung. Die Messung des unteren Frequenzbereichs erfolgte im Nahfeld des in theoretisch unendlicher Schallwand eingebauten Lautsprechers. Dazu eignete sich der lose Deckel des Modellhallraums mit dem darin befestigten Lautsprecher. Die Fernfeldmessung für den oberen Frequenzbereich wurde mit einem baugleichen in einem Gehäuse eingebauten Lautsprecher durchgeführt. Da mit diesem lediglich höhere Frequenzen gemessen wurden, konnte die Federsteifigkeit dieses Gehäuses vernachlässigt werden. Ein entsprechender Lautsprecher-einbau erfolgte bereits in der Masterarbeit von Martin Müller.

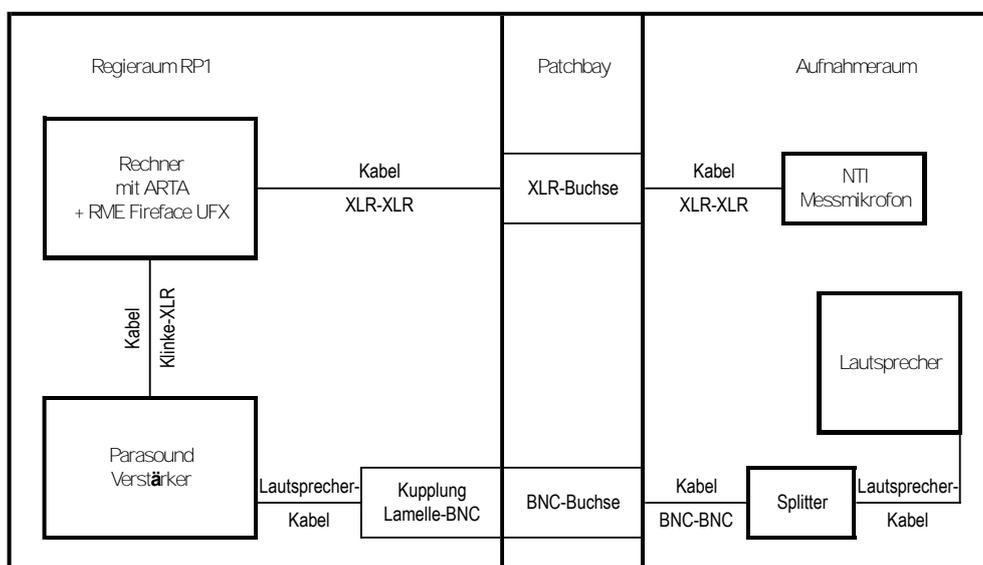


Abb. 2.1: Messaufbau (Lautsprecherimpulsantwort)

| Stückzahl | Bezeichnung | Hersteller, Typ | Stückzahl | Bezeichnung | Hersteller, Typ |
|-----------|---------------------------------------|---|-----------|------------------------------------|--|
| 1 | Rechner mit ARTA und RME Fireface UFX | | 1 | Splitterbox | BNC-Buchse Lamellen-Buchse |
| 1 | Verstärker | Parasound HCA-800 | 2 | Kabel XLR-XLR | XLR-female XLR-male |
| 1 | Messmikrofon inkl. Stativadapter | NTI | 1 | Kabel Klinke-XLR | Klinke-male (sym./6,3mm) XLR-male |
| 1 | Mikrofonstativ | König & Meyer 210/2 | 2 | doppeladriges Lautsprecherkabel | beidseitig zwei Lamellenstecker (4mm) |
| 1 | Lautsprecher | Visaton FRS8/8Ohm (im kleinen Gehäuse eingebaut) | 1 | BNC-Kabel | beidseitig BNC-male |
| 1 | Lautsprecher | Visaton FRS8/8Ohm (im Deckel der Kammer eingebaut) | 1 | Kupplung | zwei Lamellenbuchsen (4mm) BNC-male |

Abb. 2.2: Inventarliste (Messung der Lautsprecherimpulsantwort)

Um für die Nahfeldmessung eine möglichst große Schallwand zu erhalten, wurden die beiden vorhandenen Sperrholzbodenplatten der RaR-Schalleistungsmessung zur Hilfe genommen. Der kürzeste Abstand zwischen Lautsprecher und Seitenkante der Fläche $x_{S,min}$ konnte so vergrößert werden. Der Mikrofonabstand wurde so gering gewählt, dass es gerade zu keiner Berührung zwischen Membran und Messmikrofon bei der größten Membranauslenkung kam. Die Bedingung *Messabstand* \ll *Membranradius* wurde somit eingehalten. Die untere Grenzfrequenz $f_{G,us}$, ab der der folgende Messaufbau als Einbau in einer „unendlichen Schallwand“ gilt, konnte wie folgt bestimmt werden.

$$f_{G,us} = \frac{c}{4 \cdot x_{S,min}} = \frac{343}{4 \cdot 0,4} = 215 \text{ [Hz]} \quad (2.1)$$



Abb. 2.3: Lautsprecher-Nahfeldmessung in ARTA

Entsprechend der Elektroakustik-Laborlehrveranstaltung konnte die obere Grenzfrequenz f_{oG} für die Nahfeldmessung mithilfe des Membrandurchmessers d_M wie folgt berechnet werden.

$$f_{oG} = \frac{c}{\pi} \cdot \frac{1}{d_M} = \frac{343}{\pi} \cdot \frac{1}{0,06} = 1820 \text{ [Hz]} \quad (2.2)$$

Für die Fernfeldmessung sollte die Umgebung möglichst reflexionsarm sein. Dazu wurden alle Vorhänge im Aufnahmerraum zugezogen und die vorhandenen Absorber vor das Klavier gestellt. Die Messung erfolgte mittig im Raum. Als erste Reflexionsflächen ergeben sich bei einer Raumhöhe $h = 2,8$ [m] somit die Decke bzw. der Boden. Diese und alle nachfolgenden Reflexionen werden nach Aufnahme und Berechnung der Impulsantwort mit dem Setzen eines Zeitfensters ausgeblendet. Die aus dem Zusammenhang der daraus resultierenden maximalen Breite des Zeitfensters T und dem Einhalten der Fernfeldbedingung [d (Messabstand) $> 3 \cdot M$ (Raumdiagonale des Lautsprechergehäuses)] bestimmbare untere Grenzfrequenz f_{uG} wurde wie folgt berechnet.

$$f_{uG} = \frac{1}{T} = \frac{c}{\sqrt{h^2 + 9M^2} - 3M} = \frac{343}{\sqrt{2,8^2 + 9 \cdot 0,35^2} - 3 \cdot 0,35} = 177 \text{ [Hz]} \quad (2.3)$$

Es wurde der Messabstand $d = 3M = 1,05$ [m] gewählt.



Abb. 2.4: Lautsprecher-Fernfeldmessung in ARTA

Man kann gut erkennen, dass die Bedingung für eine Überlappung der Nah- und Fernfeldmessung ($f_{uG} < f_{oG}$) eingehalten werden konnte. Um eine Kombination der beiden Messungen zu ermöglichen, müssen diese für einen einheitlichen Messabstand d_{ref} im Pegel skaliert werden. Der ScaleLevel fürs Fernfeld ergibt sich zu $20 \log\left(\frac{d}{d_{ref}}\right) = 0,424$ [dB] und der fürs Nahfeld zu $20 \log\left(\frac{r_M}{2 \cdot d_{ref}}\right) = -36,5$ [dB]. Nach erfolgten Pegelkorrekturen und zeitlichen Fensterungen wurde der Bereich gesucht, bei dem die Nah- und Fernfeldmessung jeweils einen ähnlichen Verlauf und Pegel aufweisen. Zusätzlich wurden die Frequenzgänge mit einem Datenblatt des Herstellers (vgl. Abb. 2.6) verglichen. So wurde 1580 Hz als geeignete

Übergangsfrequenz bestimmt und die beiden Messungen zu einem Frequenzgang kombiniert (vgl. Abb. 2.5).

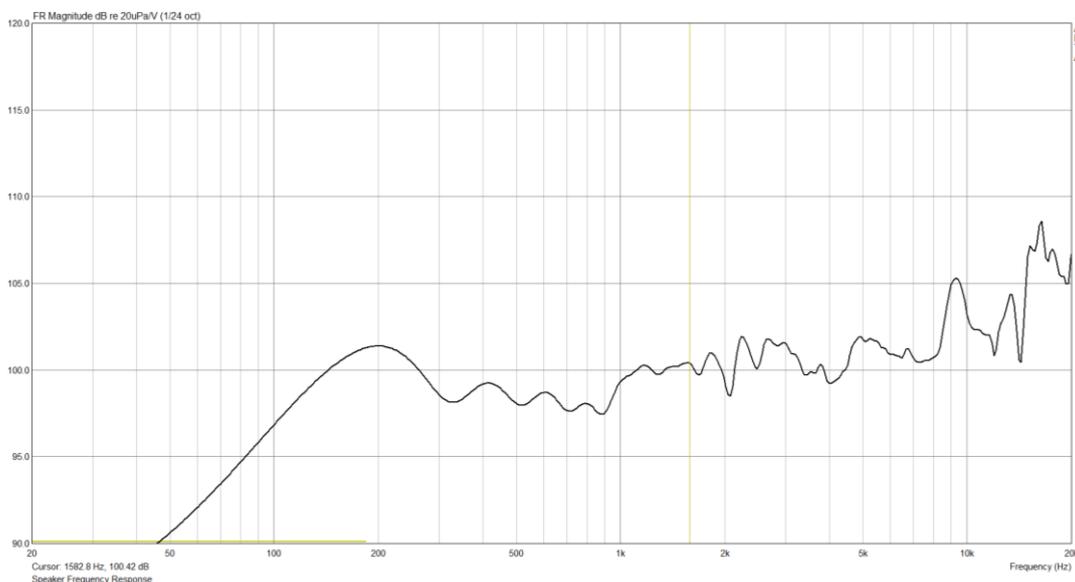


Abb. 2.5: kombinierter gemessener Lautsprecherfrequenzgang

Obwohl die „unendliche Schallwand“ erst ab 215 Hz als eine solche betrachtet werden dürfte, zeigt die gemessene Kurve sogar auch für noch tiefere Frequenzen große Ähnlichkeit mit dem angegebenen Frequenzgang des Herstellers. Ab ca. 200 Hz ist der deutliche Abstieg zu tiefen Frequenzen sowie ab 3 kHz ein leichter bzw. ab ~8 kHz ein starker Anstieg zu hohen Frequenzen hin zu erkennen. Ebenso die Unregelmäßigkeiten im Bereich von ~13 kHz stimmen mit dem Datenblatt weitestgehend überein. Zu beachten ist jedoch, dass bei der durchgeführten Messung auf ein Aufnehmen der an den Lautsprecher angelegten elektrischen Leistung verzichtet wurde, weshalb im Gegensatz zum Herstellerdatenblatt der absolute Pegel nicht korrekt dargestellt wird.

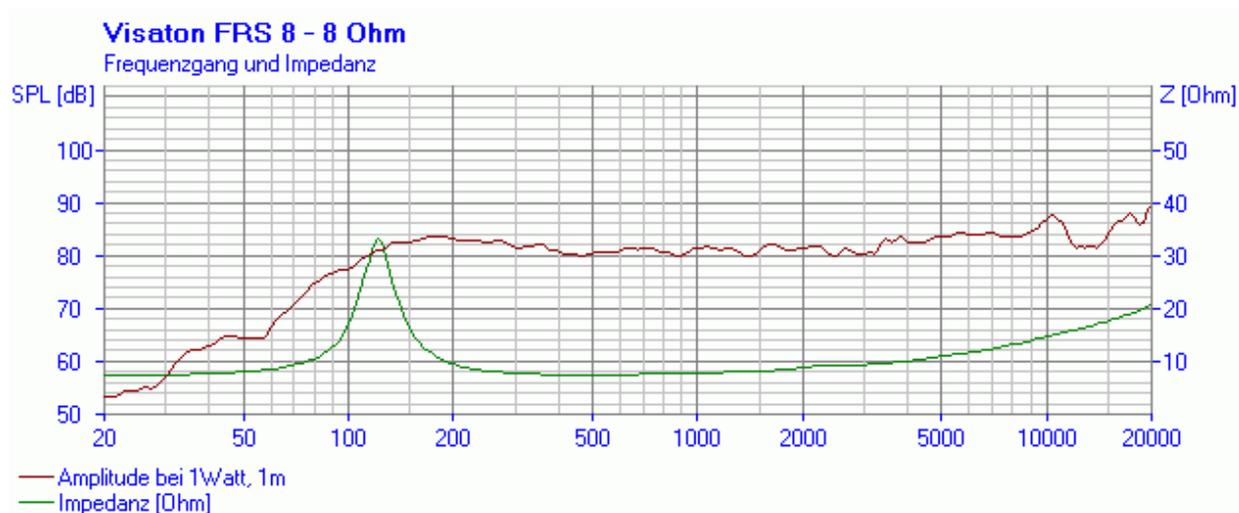


Abb. 2.6: Lautsprecherfrequenzgang aus dem Herstellerdatenblatt

Die Messwerte konnten aus ARTA im txt-Format exportiert werden. Die angelegten Dateien besitzen zwei Spalten, wobei die erste Spalte dem Frequenzwert entspricht und die zweite Spalte dem zugehörigen gemessenen Schalldruckpegel in dB. Die Ausgabe erfolgte entsprechend der gewählten maximalen Fourierauflösung linear. Der Export in dieser „unsmoothed“ Auflösung ist allerdings nur für unbearbeitete Pegelverläufe möglich, weshalb dieser für Nah- und Fernfeldmessung getrennt erfolgte. Die Pegelkorrekturen und die Kombination der Messungen wurde anschließend mithilfe von Matlab durchgeführt (vgl. Kapitel 2.2). Die Dateien sind im Projektordner unter „ARTA“ gespeichert.

2.2 Generierung des Quellsignals in Matlab

In Matlab können mit dem Button „Import“ im Reiter „Home“ txt-Dateien eingelesen werden. Der gewünschte Bereich wird anschließend markiert und mit der Auswahl „Numeric Matrix“ in den Workspace geladen. Mit Rechtsklick und „Save As“ erstellt Matlab ein mat-File.

Die erstellten Files der ARTA-Messung sind im Ordner ARTA\Matlab_Quellsignal als „unsmoothedlow.mat“ und „unsmoothedhigh.mat“ gespeichert und werden von sweeps.m im gleichnamigen Pfad aufgerufen. Mit Hilfe dieses Matlab-GUIs aus der AMT-VO können sweepratengesteuerte Sinussweeps erstellt werden. Um den gemessenen Frequenzgang einzulesen, wurde der Code für „case 5“ und „case 6“ entsprechend angepasst (Zeile 224-281).

```
load('unsmoothedhigh.mat');
load('unsmoothedlow.mat');
a=0;
a=unsmoothedlow(1:8640,2);
a=a-36.5*ones(8640,1);
b=unsmoothedhigh(8641:131072,2)+0.424*ones(131072-8640,1);
a=[a;b];
a(1)=0;
f1=unsmoothedlow(:,1);
SPL_LS_dB = a;
```

Die Nahfeldmessung kann den Zeilen 1 bis 8640 in „unsmoothedlow.mat“ entnommen werden (bis zur Frequenz von 1580 Hz). Die Fernfeldmessung ist ab Zeile 8641 in „unsmoothedhigh.mat“ gültig. Die Korrekturterme von -36,5 und 0,424 entsprechen der Korrektur in ARTA für die Kombination der Messungen (siehe Kapitel 2.1).

Über das GUI können nun verschieden gewichtete Sinussweeps erstellt werden. Mit der Auswahl „Expononlinearer Sweep“ und „Nonlinearer Sweep“ wird ein dem Frequenzgang des Visaton FRS 8 angepasstes Signal generiert.

Für die anschließenden Messungen wurden 4 Quellsignale mit folgenden Parametern erzeugt:

- Samplingfrequenz: 48 kHz
- Startfrequenz: 20 Hz
- Stopfrequenz: 20 kHz
- Dauer: 20 s

Die wav-Files sind im Projektordner unter „SourceSignals“ abgelegt.

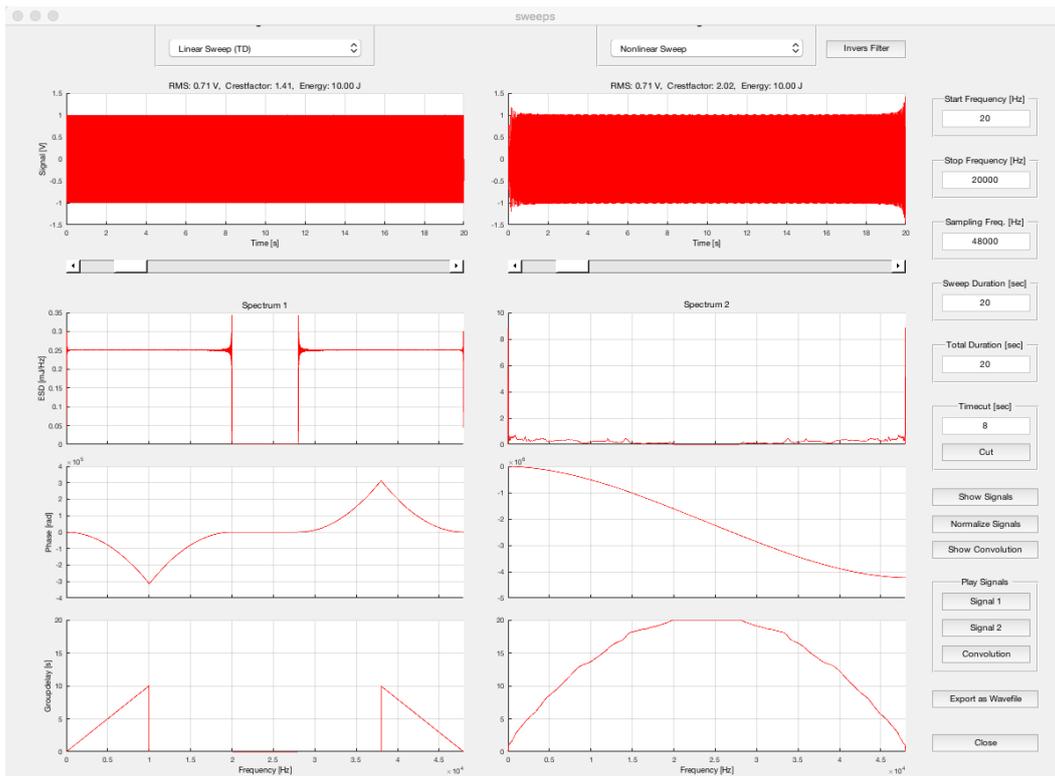


Abb. 2.7: Matlab GUI sweeps.m (linearer und nonlinearer Sweep)

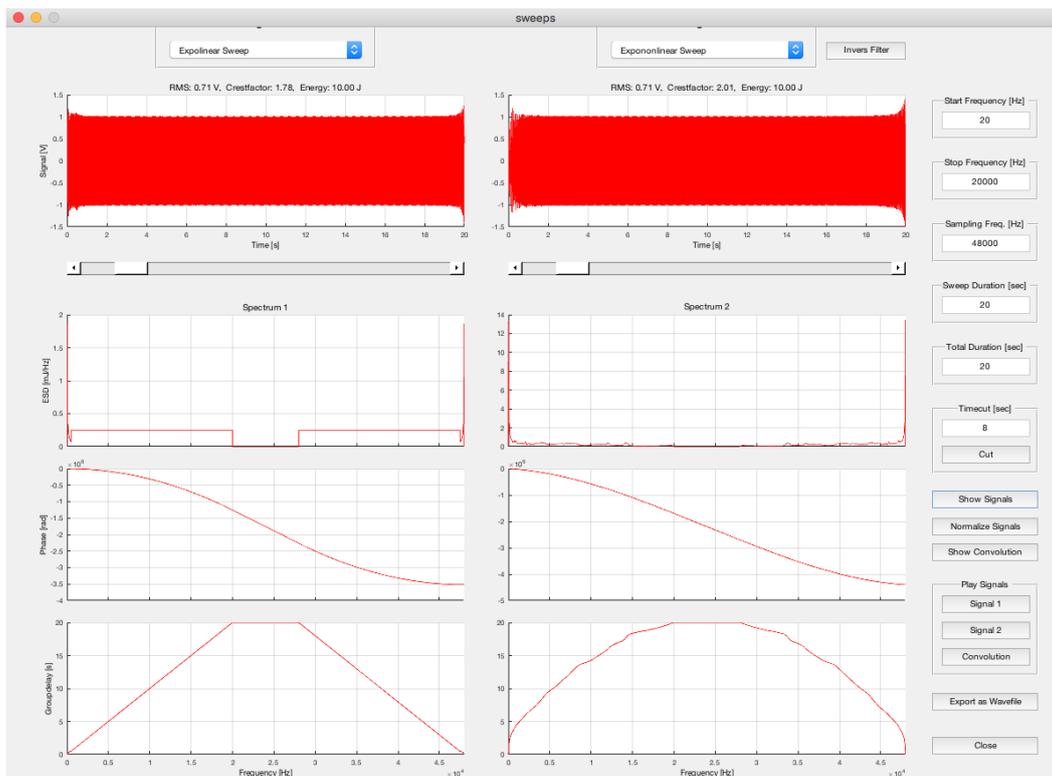


Abb. 2.8: Matlab GUI sweeps.m (exponentieller und nonexponentieller Sweep)

2.3 Messung der Frequenzgänge und Impulsantworten

Die Messung erfolgte mit folgendem Messaufbau in dem implementierten Setup in PAK „ModellHR_Frequenzgang“. In der Messdefinition sind vier Mikrofonkanäle und der Quellsignalkanal (Nr.12) aktiv geschaltet. Da für die Lautsprechermessung nur ein Mikrofonkanal verwendet wird, können die Kanäle 2 bis 4 deaktiviert werden, um die Messdaten zu reduzieren.

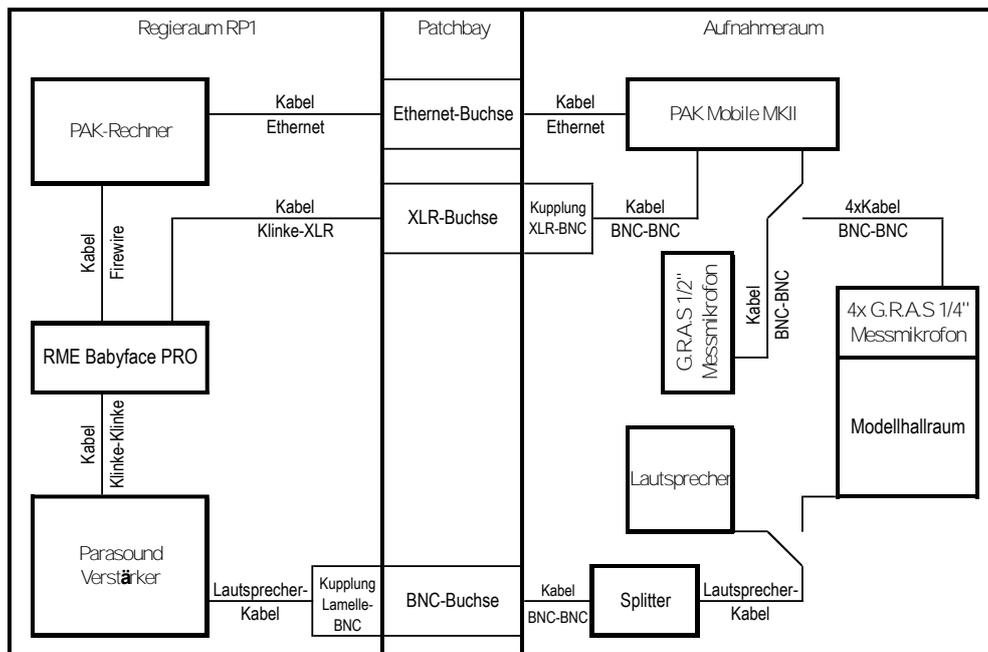


Abb. 2.9: Messaufbau (Frequenzgang/Impulsantwort)

| Stückzahl | Bezeichnung | Hersteller, Typ | Stückzahl | Bezeichnung | Hersteller, Typ |
|-----------|----------------------------------|--|-----------|---------------------------------|---|
| 1 | Laptop mit PAK-Software | Lenovo Thinkpad W520 | 2 | Ethernetkabel | ohne Metallabschirmung |
| 1 | Multichannel- Messgerät | Müller BBM PAK Mobile MKII | 1 | Firewirekabel | Firewire-male (6-polig) auf Firewire-male (4-polig) |
| 1 | Audiointerface | RME Babyface PRO | 1 | Kabel Klinke-Klinke | beidseitig Klinke-male (sym./6,3mm) |
| 1 | Verstärker | Parasound HCA-800 | 1 | Kabel Klinke-XLR | Klinke-male (sym./6,3mm) XLR-male |
| 1 | Messmikrofon inkl. Stativadapter | G.R.A.S. 46AE 1/2" CCP Free-field | 2 | doppeladriges Lautsprecherkabel | beidseitig zwei Lamellenstecker (4mm) |
| 4 | Messmikrofon | G.R.A.S. 46BE 1/4" CCP Free-field | 7 | BNC-Kabel | beidseitig BNC-male |
| 1 | Mikrofonstativ | König & Meyer 210/2 | 1 | Kupplung | zwei Lamellenbuchsen (4mm) BNC-male |
| 1 | Lautsprecher | Visaton FRS8/8Ohm (im Gehäuse eingebaut) | 1 | Kupplung | XLR-female BNC-male |
| 1 | Lautsprecher | Visaton FRS8/8Ohm (im Deckel der Kammer eingebaut) | 1 | Splitterbox | BNC-Buchse Lamellen-Buchse |

Abb. 2.10: Inventarliste (Messung des Frequenzgangs/der Impulsantwort)

Wie bei der Messung in ARTA wird der Lautsprecher bis 1580 Hz im Nahfeld und für Frequenzen darüber im Fernfeld untersucht. (siehe Kapitel 2.1)

FFT der Lautsprechersignale

Im Reiter „Lautsprecherfrequenzgang“ in der Grafikausgabe erfolgt eine Anzeige des FFT-Spektrums des aufgenommenen Signals, welches über die Zeit gemittelt wird. Die entsprechenden Messdaten werden in der Arithmetik als Datendefinition übergeben. Derzeit ausgewählt sind die Messungen mit den Quellsignalen „lin20_Signal.wav“ und „nonLin20_Signal.wav“.

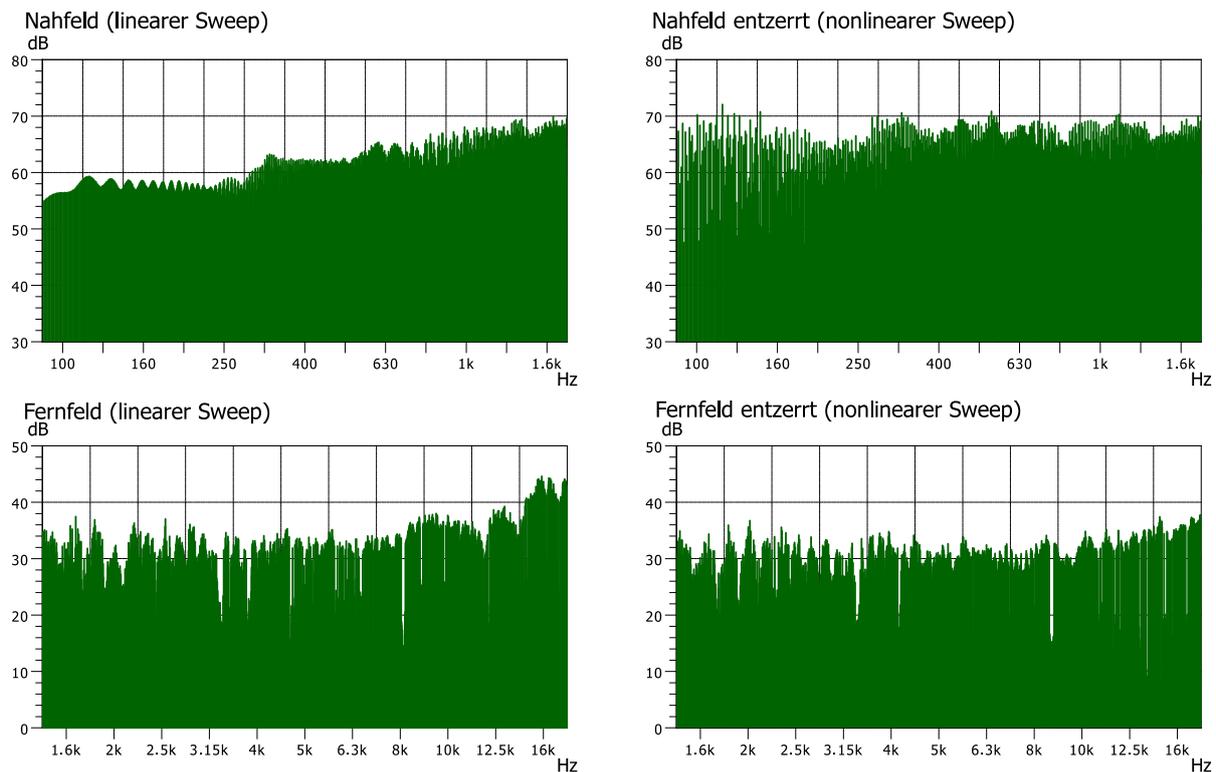


Abb. 2.11: FFT der Lautsprechersignale im Vergleich

Die Auswertung zeigt eine deutliche Linearisierung durch den gewichteten Sinussweep als Quellsignal. Gegenüber dem Abfall von 15 dB bei tiefen Frequenzen liegen die Schwankungen der entzerrten Nahfeldmessung bei etwa 3 dB. Auch im Fernfeld wurde das ansteigende Verhalten ab ~6,3 kHz des Lautsprechers weitestgehend ausgeglichen. Die Fernfeldmessung weist gegenüber der Nahfeldmessung geringere Pegel auf, da wieder beide Messungen mit gleicher Lautstärke des Quellsignals erfolgten. Die Pegel müssten entsprechend dem Vorgang der ARTA-Messung in Kapitel 2.1 aneinander angepasst werden.

Allerdings ist hier zu beachten, dass es sich bei dieser Art der Lautsprecherfrequenzgangauswertung um keine typische Impulsantwortmessung handelt. Um den hier gewünschten Einfluss des Quellsignals im Messergebnis zu erhalten, muss die Faltung des aufgenommenen Signals mit der Inversen des Quellsignals entfallen. Hier ist wichtig anzumerken, dass gerade dieser Schritt zusammen mit der nachfolgenden zeitlichen Fensterung einer der größten Vorteile des herkömmlichen Messverfahrens mittels Sinussweeps ist. So würden unter anderem Störgeräusche aus der Umgebung sowie Verzerrungen des Lautsprechers aufgrund dessen

großer Auslenkung aus dem Messergebnis gefiltert werden können. Vergleicht man daher den aufgenommenen Lautsprecherfrequenzgang von Abb. 2.11 links oben und unten (linearer Sweep) mit dem der Impulsantwortmessung von Abb. 2.5 bzw. Abb. 2.6 ist vor allem im tief-frequenten Bereich (Abb. 2.11 links oben) eine deutliche Abweichung im Verlauf feststellbar.

FFT der Lautsprecherimpulsantwort

Um zu zeigen, dass es zu dieser Abweichung aufgrund der Messauswertung und nicht der Messung an sich kommt, wurde mit denselben Messdaten ebenfalls eine Auswertung mittels Impulsantwortberechnung über den Reiter „Berechnung der Lautsprecherimpulsantwort“ durchgeführt. Dafür werden zwei Funktionen in Matlab aufgerufen, die das jeweilige Direkt- und Messsignal für die Nah- und Fernfeldmessung als Zeitsignal erhalten.

Die Funktion Impulsantwort.exe führt nach einer FFT durch Division der Spektren die zeitliche Faltung mit dem inversen Quellsignal aus.

```
for i = 1:NMic
    waitbar(i/(NMic+1), waitH);

    % Reinladen des MicX-Signals
    P_Mic = [P_Dir(1:length(P_Dir)-8), 'Mic', int2str(i), '.dat'];
    [~, ~, ~, ~, ~, temp_Mic, ~] = pak52_binary_in(P_Mic);
    Mic(1:length(temp_Mic)) = temp_Mic;
    Mic_FFT = fft(Mic, nx);

    % Entfaltung IR_BB = Breitbandige IR
    IR_FFT_BB = Mic_FFT./Dir_FFT;
    IR_BB = ifft(IR_FFT_BB);

    % Shiften der IR (um fs/100) und Einfaden (mittels Hann-window)
    % um Arefakte zu vermeiden. d.h. Multiplikation des Anfangs/Endes
    % 5 mit einem halben Hann-Fenster.
    L_W = round(fs/100);
    Fenst = hann(L_W*2);
    IR_BB = circshift(IR_BB, L_W);
    IR_BB(1:L_W) = IR_BB(1:L_W).*Fenst(1:L_W);
    IR_BB(length(IR_BB)-L_W+1:length(IR_BB))=...
    IR_BB(length(IR_BB)-L_W+1:length(IR_BB)).*Fenst(L_W+1:length(Fenst));
    fax = 0:fs/nx:fs-fs/nx;
    IR_FFT = abs(fft(IR_BB,nx));
end
```

In der Funktion Impulsantwort_Fernfeld.exe erfolgt zusätzlich eine Fensterung der Impulsantwort, um die Reflexionen in der Messung nicht mit auszuwerten (siehe Kapitel 2.1).

```
IR_BB_Fernfeld = IR_BB(620:880);

fax = 0:fs/260:fs-fs/260;
%260 Samples, da dies dem benötigten Fenster zum "Freischneiden" der
%Impulsantwort von der ersten Reflexion entspricht (!GENAUE ZAHL VON
%MESSSETUP ABHÄNGIG!)
IR_FFT = abs(fft(IR_BB_Fernfeld,260));
```

In nachfolgender Grafik sind die Ergebnisse dieser Auswertung dargestellt.

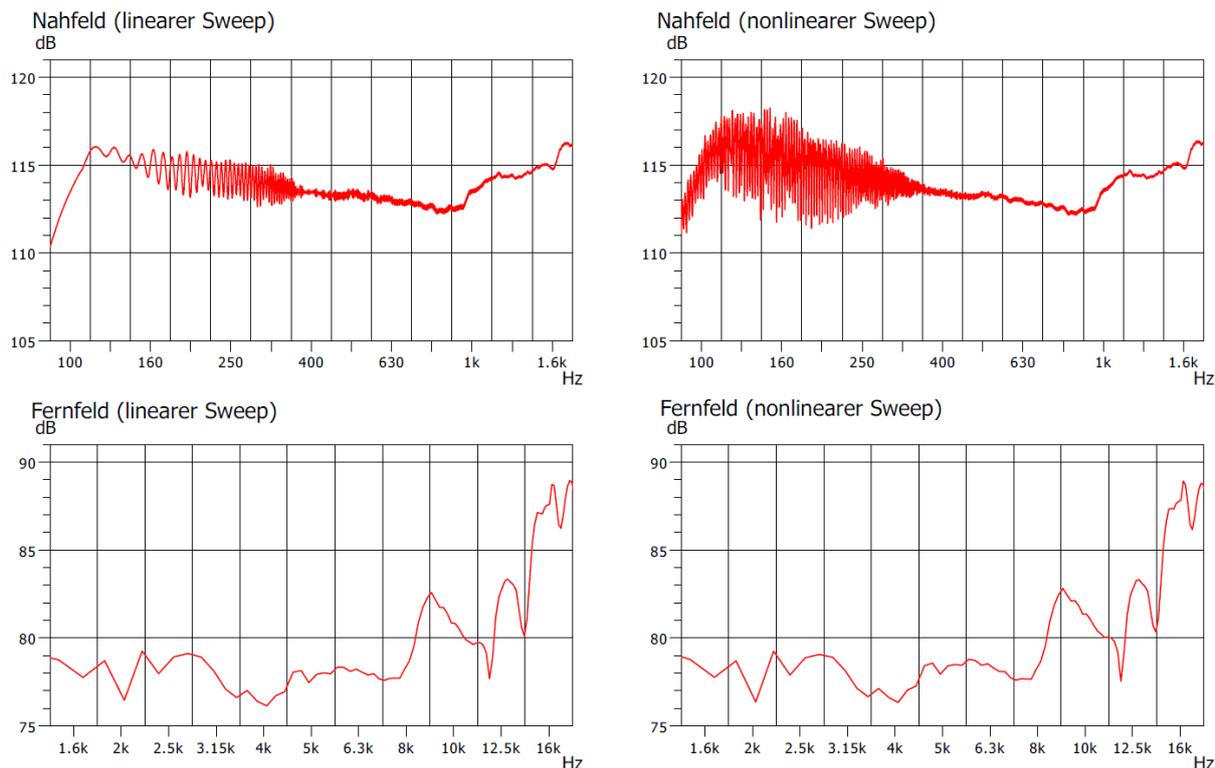


Abb. 2.12: FFT der Lautsprecherimpulsantwort im Vergleich

Hier lässt sich gut erkennen, dass die Messergebnisse sowohl für den linearen als auch den sweepratengesteuerten Sweep sehr gut mit den bekannten Ergebnissen aus Abb. 2.5 und Abb. 2.6 übereinstimmen. Der höhere Rauschpegel im tieffrequenten Bereich lässt sich vermutlich damit erklären, dass hier zum einen im Gegensatz zu vorhin mit (non-)linearen Sweeps statt exponentiellen gemessen wurde und zum anderen, weil hier auf eine zeitliche Fensterung der Impulsantwort für die Nahfeldmessung verzichtet wurde. Allerdings ging, wie vorhin bereits erwähnt, auch der hier gewünschte Einfluss des Anregungssignals methodenbedingt verloren. Da jedoch die Auswertung der Messung mit dem sweepratengesteuerten Anregungssignal eine weitest gehende Linearisierung des Lautsprechers vermuten lässt (vgl. Abb. 2.11 rechts) und die Restwelligkeiten im Vergleich zu den aus der Masterarbeit von Martin Müller bereits bekannten Einflüssen der Messkammer praktisch vernachlässigbar sind, wurde dennoch mit dieser Methode zur Lautsprecherentzerrung fortgesetzt. Zu den Abweichungen der durchschnittlichen Pegel zwischen Auswertung mittels Impulsantwortberechnung und FFT des aufgenommenen Signals, wurden an dieser Stelle keine weiteren Nachforschungen angestellt. Es liegen allerdings Hinweise vor, dass dies der der Berechnungsart zugrundeliegenden Theorie geschuldet ist.

FFT des Antwortsignals der Kammermessung

Durch das Abspielen des entzerrten Lautsprechersignals am nichtlinearen Lautsprecher kann der Modellhallraum somit nahezu linear angeregt werden. Durch Messung an den vier Mikrofonpositionen kann daher der Frequenzgang des Modellhallraums bestimmt werden, ohne die Unregelmäßigkeiten im Frequenzgang des Lautsprechers in die Messergebnisse miteinfließen zu lassen.

Auch diese Messung erfolgte mit dem Setup „MHR_Frequenzgang“ und dem obenstehenden Messaufbau. Wichtig ist beim Anschluss der vier Mikrofone die richtige Reihenfolge, damit bei der später folgenden Schalleistungsentzerrung die richtigen Messdaten zugeordnet werden (siehe Kapitel 1.1).

Die Ausgabe erfolgt in der Grafikdefinition im Reiter „Kammerfrequenzgang FFT“. Die Messdaten werden in der Datendefinition zugeordnet. In den Reitern „Kammermoden Mic1 bis Mic4“ wird die Darstellung auf den kritischen Bereich bis 3,2 kHz begrenzt, da für höhere Frequenzen die Kammer ohnehin ausreichend viele Moden aufweist und von keiner halbkugelförmigen Abstrahlung des Lautsprechers mehr ausgegangen werden kann (vgl. MA von Martin Müller). Die nachfolgenden Abbildungen zeigen diese Grafiken. Zudem ist die Tabelle aus der Masterarbeit von Martin Müller mit den anhand der für Quaderräume bekannten Formel theoretisch bestimmten Eigenmoden des vorliegenden Modellhallraums angehängt.

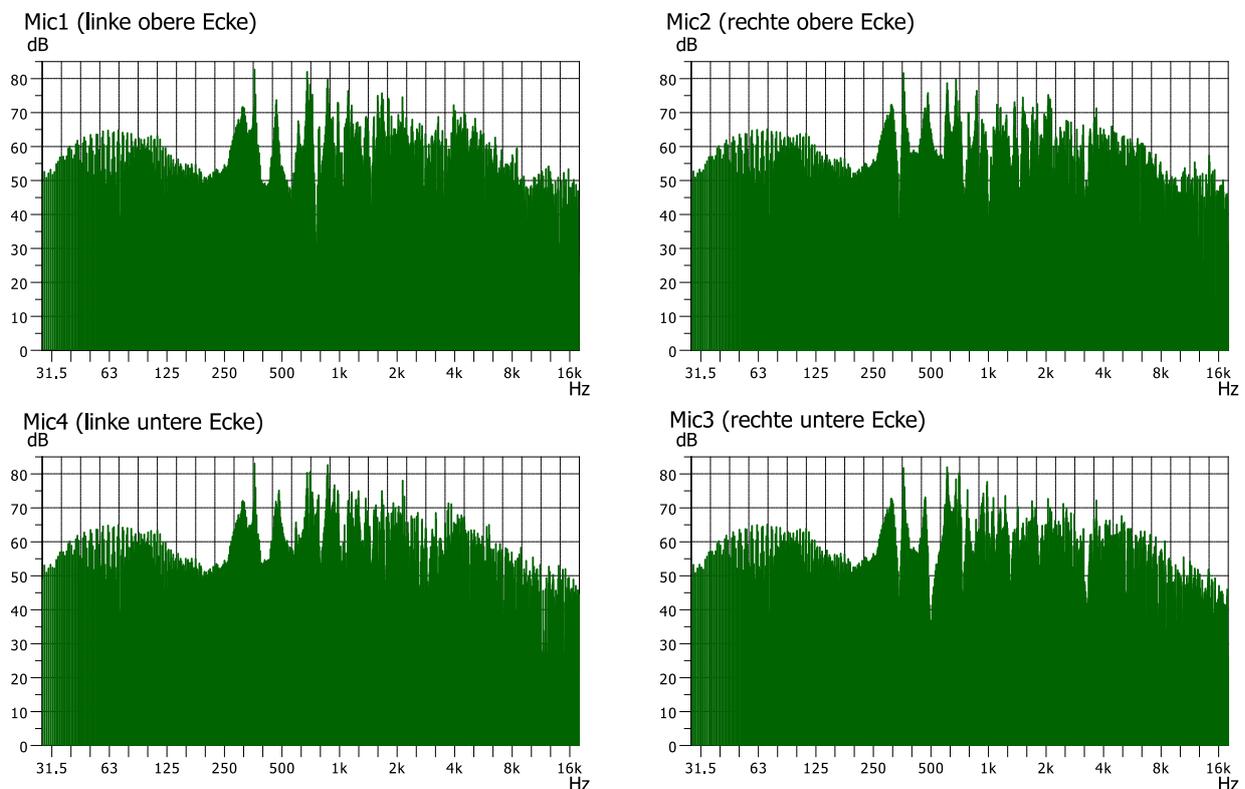


Abb. 2.13: FFT des Antwortsignals der Kammermessung an den 4 Mikrofonpositionen

| | Koordinaten | Frequenz [Hz] | Art | | Koordinaten | Frequenz [Hz] | Art |
|----|-------------|---------------|------------|----|-------------|---------------|------------|
| 1 | 1-0-0 | 306Hz | Axial | 12 | 2-0-1 | 793Hz | Tangential |
| 2 | 0-1-0 | 365Hz | Axial | 13 | 2-1-1 | 873Hz | Schräg |
| 3 | 1-1-0 | 476Hz | Tangential | 14 | 0-2-1 | 887Hz | Tangential |
| 4 | 0-0-1 | 504Hz | Axial | 15 | 3-0-0 | 919Hz | Axial |
| 5 | 1-0-1 | 590Hz | Tangential | 16 | 1-2-1 | 938Hz | Schräg |
| 6 | 2-0-0 | 612Hz | Axial | 17 | 2-2-0 | 953Hz | Tangential |
| 7 | 0-1-1 | 622Hz | Tangential | 18 | 3-1-0 | 989Hz | Tangential |
| 8 | 1-1-1 | 694Hz | Schräg | 19 | 1-0-2 | 1009Hz | Tangential |
| 9 | 2-1-0 | 713Hz | Tangential | 20 | 0-1-2 | 1048Hz | Tangential |
| 10 | 0-2-0 | 730Hz | Axial | 21 | 2-2-1 | 1054Hz | Schräg |
| 11 | 1-2-0 | 791Hz | Tangential | 22 | 0-0-2 | 1073Hz | Axial |

Abb. 2.14: berechnete Kammermoden bis 1 kHz (laut MA von Martin Müller)

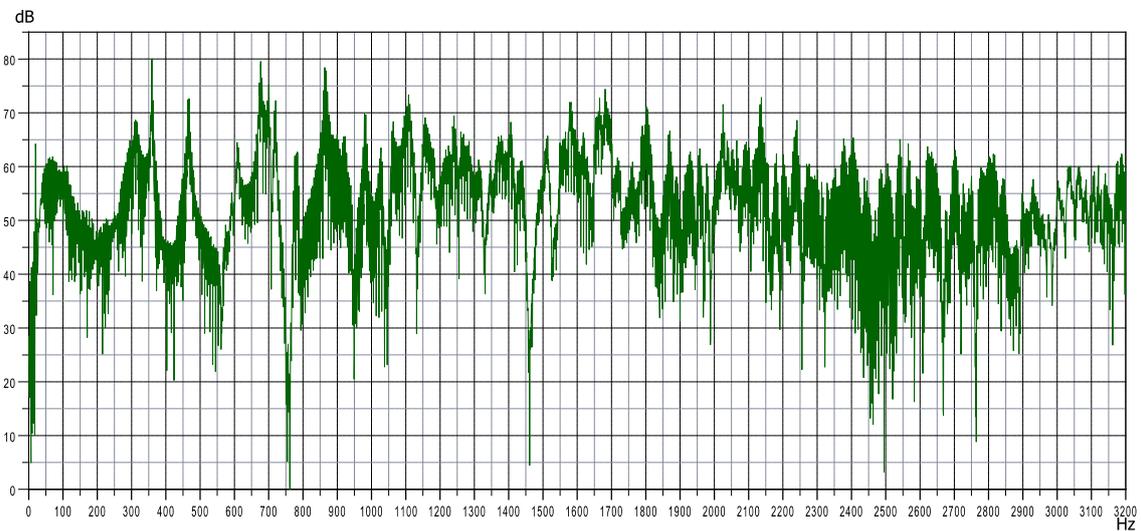


Abb. 2.15: Kammermoden bis 3,2 kHz (Mikrofonposition 1)

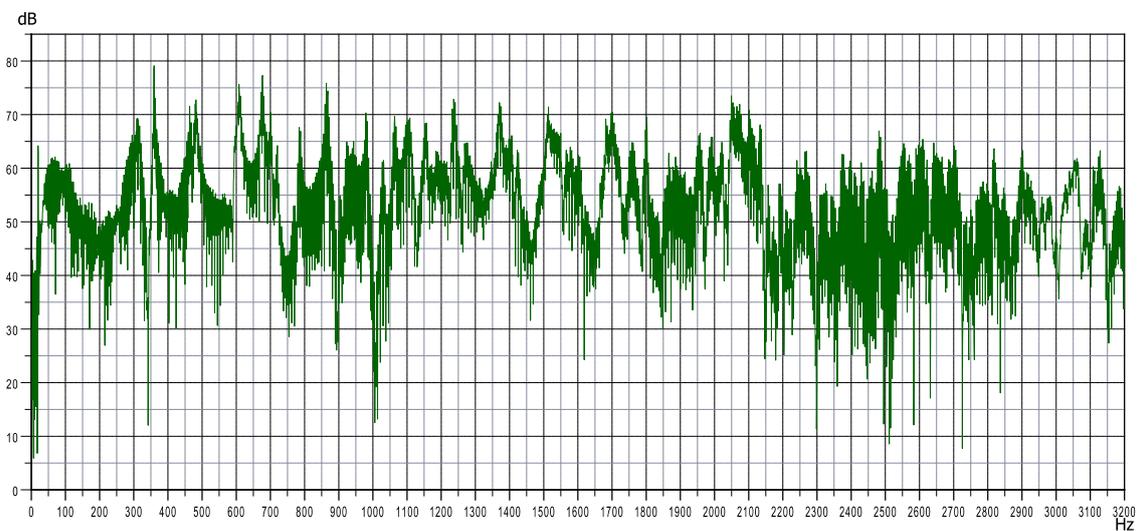


Abb. 2.16: Kammermoden bis 3,2 kHz (Mikrofonposition 2)

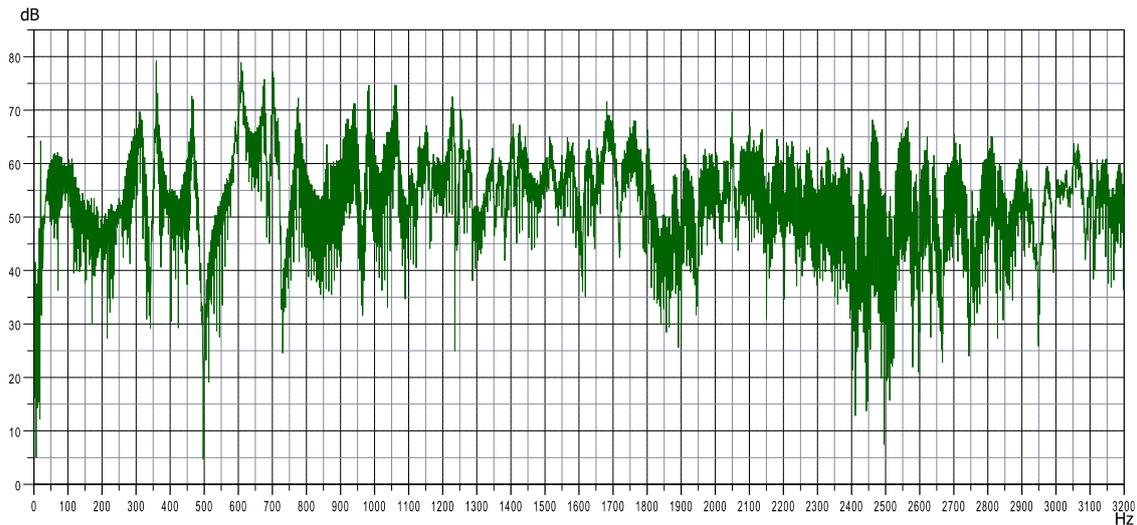


Abb. 2.17: Kammermoden bis 3,2 kHz (Mikrofonposition 3)

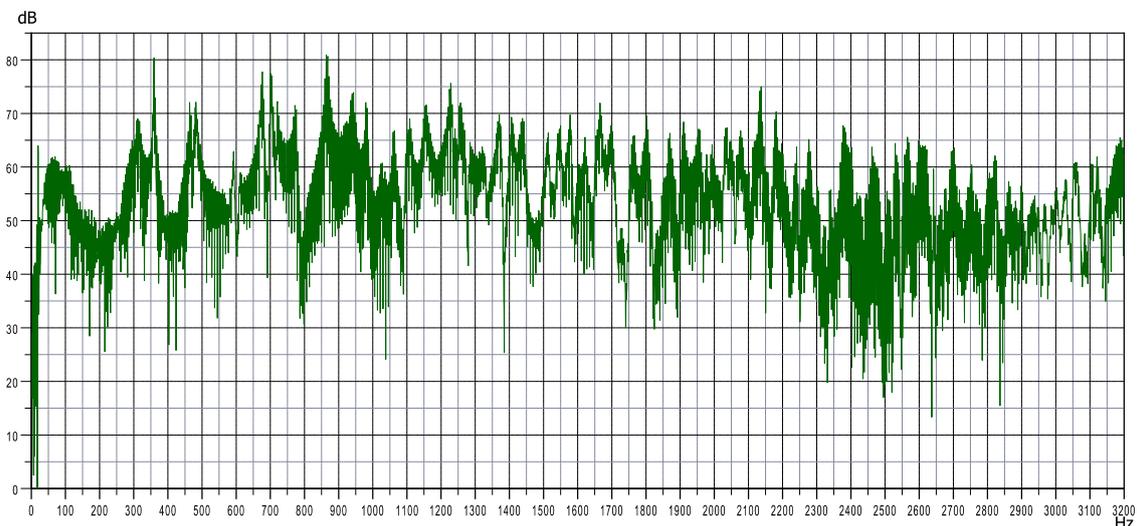


Abb. 2.18: Kammermoden bis 3,2 kHz (Mikrofonposition 4)

Vergleicht man die aufgenommenen Schalldruckpegel-Frequenzdiagramme mit den berechneten Werten der Tabelle, so lassen sich die ersten beiden axialen Moden sehr gut an allen vier Mikrofonpositionen als deutliche Pegelüberhöhungen erkennen. Beim Versuch die dritte axiale Mode bei 504 Hz, welche sich entlang der Modellhallraumhöhe ausbilden müsste (0-0-1), zu identifizieren, fallen enorme Abweichung vom erwarteten Pegelverlauf auf. Zum einen scheint es, als könnte die Mode in der Praxis ~ 20 Hz tiefer als berechnet auftreten (deutlich zu erkennen in Abb. 2.16 bzw. Abb. 2.18) oder aber an Mikrofonposition 3 einen extremen Pegel einbruch hervorrufen (vgl. Abb. 2.17). Während sich erstere Annahme noch anhand von in der Akustik üblichen Diskrepanzen zwischen theoretischen Berechnungen und praktischen Messungen erklären lassen könnte, so wirft jedoch letztere Tatsache, nämlich der Pegel einbruch bei ~ 500 Hz, große Fragen auf. Denn unter Einbezug aller bekannter theoretisch akustischer Überlegungen, dürfte es bei entsprechendem Messaufbau (sowohl Schallquelle als auch Druckempfänger-Messmikrofone in Ecken positioniert) lediglich zu modenbedingten Pegelüberhöhungen, jedoch nicht zu Pegel einbrüchen kommen. Bei weiterer Betrachtung der

aufgenommenen Diagramme, lassen sich an allen vier Mikrofonpositionen bei scheinbar willkürlichen Frequenzen weitere extrem scharfe und tiefe Pegeleinbrüche erkennen. Eine ähnliche Beobachtung konnte auch bereits von Martin Müller in entsprechender Masterarbeit gemacht, aber nicht eindeutig begründet werden. Auch an dieser Stelle muss dieser Sachverhalt weiterhin als nicht eindeutig geklärt stengelassen werden. Wenn man bedenkt, dass sowohl der Modellhallraum als auch die Mikrofonpositionierung symmetrisch aufgebaut bzw. gewählt wurden und sich lediglich die Schallquelle an einer dezentralen Position befindet, wäre ein möglicher Ansatz für dahingehend weiterführende Untersuchung eine Positionierung der Schallquelle im Zentrum der gegenüber den Mikrofonen liegenden Seitenfläche. Möglicherweise würden bei diesem Messaufbau die Pegeleinbrüche dann an allen Mikrofonen zumindest bei denselben Frequenzen auftreten. So könnte bewiesen werden, dass es in Räumen scheinbar zu Wechselwirkungen zwischen Schallquelle und Mikrofon kommt, welche „stärker“ als die Resonanzeigenschaften des Raumes sind. Anschließend könnten möglicherweise über die Entfernung zwischen Quelle und Mikrofonen weitere Rückschlüsse gezogen werden. Ein möglicher Denkansatz wäre, dass es zu solchen Erscheinungen kommt, wenn der Abstand zwischen Quelle und Mikrofon (beides in Raumbegrenzungsflächen eingebaut) ein ungerade ganzzahliges Vielfaches von $\lambda/4$ beträgt (Druckmaximum/Schnellemaximum). An Mikrofonposition 1 (Quelle axial gegenüberliegend) kommt es nämlich bei ~ 760 Hz zu einem enormen Pegeleinbruch (vgl. Abb. 2.15). Die Raumabmessung entlang dieser Achse beträgt hier genau $5\lambda/4$. Um diesen Verdacht zu untermauern, bedarf es allerdings, wie vorhin bereits erwähnt, noch deutlich intensiverer Nachforschungen – zum Beispiel anhand von entsprechenden Messungen im Kundt’schen Rohr mit schallhartem Abschluss, bei denen die Rohrlänge genau einem ungeradzahligem Vielfachen von $\lambda/4$ der abgestrahlten Welle entspricht.

3 Schalleistungsmessungen

3.1 Benötigtes Equipment

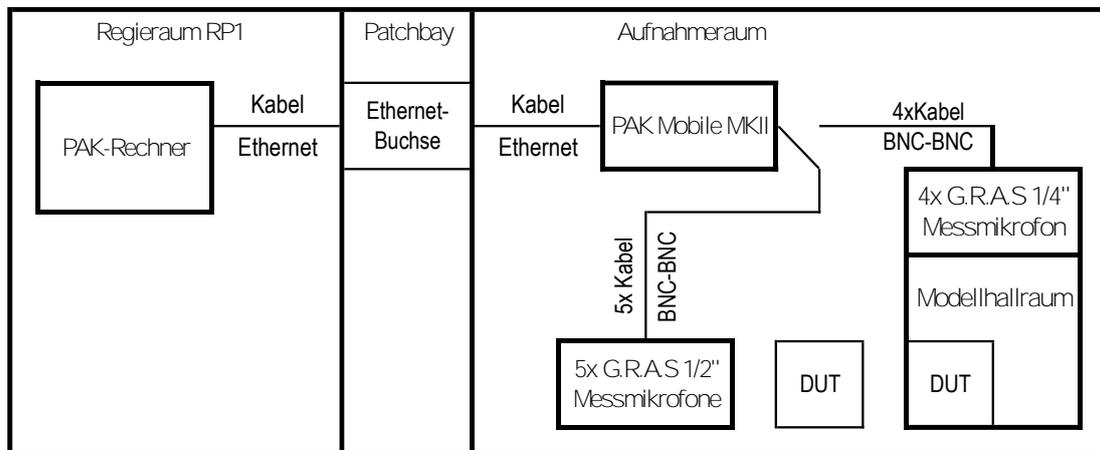


Abb. 3.1: Messaufbau (Schalleistungsmessung)

| Stückzahl | Bezeichnung | Hersteller, Typ | Stückzahl | Bezeichnung | Hersteller, Typ |
|-----------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------|-------------------------------------|---------------------|
| 1 | Laptop mit PAK-Software | Lenovo Thinkpad W520 | 5 | Mikrofonstativ | König & Meyer 210/2 |
| 1 | Multichannel- Messgerät | Müller BBM PAK Mobile MKII | 9 | BNC-Kabel | beidseitig BNC-male |
| 2 | Ethernetkabel | ohne Metallabschirmung | 1 | Schalldruck-Kalibrator | Brüel & Kjaer |
| 5 | Messmikrofon inkl. Stativadapter | G.R.A.S. 46AE 1/2" CCP Free-field | 1 | Temperatur-/ Feuchtigkeitsmessgerät | Bosch |
| 4 | Messmikrofon | G.R.A.S.46BE 1/4" CCP Free-field | | | |

Abb. 3.2: Inventarliste (Schalleistungsmessung)

3.3 Messaufbau im Modellhallraum

Die Schalleistungsmessung wurde in Anlehnung an die Norm ISO 3741 durchgeführt. Das Messsetup aus der AMT-Laborübung wurde dazu entsprechend den Angaben im Kapitel 1.4.1 angepasst und im Projektordner als „MHR_Schalleistung“ angelegt.

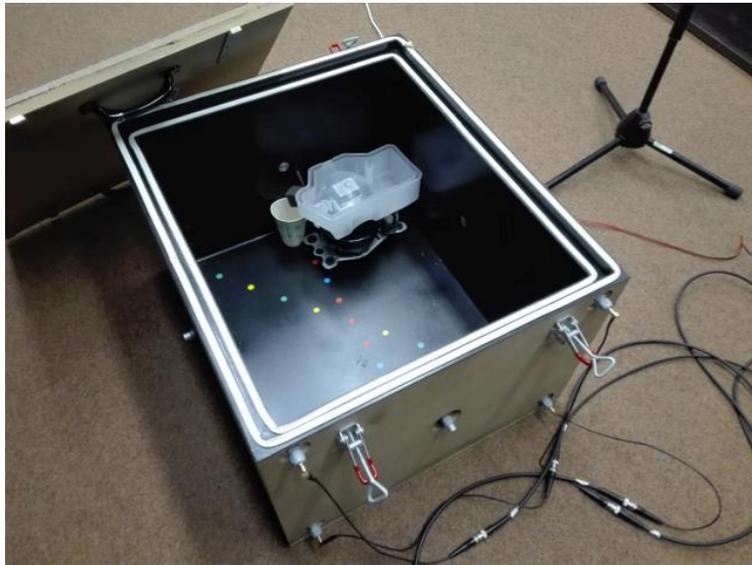


Abb. 3.5: Schalleistungsmessung im Modellhallraum

Für den Anschluss der Mikrofone muss die Reihenfolge aus Kapitel 1.1 beachtet werden. Beginnend mit der linken oberen Ecke werden die Mikrofone im Uhrzeigersinn angeschlossen. Die Mikrofone werden bündig mit der Innenoberfläche eingebaut und luftdicht verschraubt. Das Netzkabel muss vom Kompressor abgesteckt und durch die Kabeleinführung durchgezogen werden. Der Kompressor wird möglichst nah an die Wände in der Ecke gestellt, jedoch so, dass er trotz den im laufenden Betrieb auftretenden Vibrationen keine der Wände berührt.

3.4 Messung der Nachhallzeit zur Bestimmung der Schalleistung

Um die Schalleistung im Direktverfahren nach ISO 3741 zu bestimmen, muss zusätzlich zur Schalldruckmessung die Nachhallzeit für die Korrekturterme bestimmt werden. Dafür wurde das Setup des TI-Projekts von Jakob Spötl verwendet. Der dazugehörige Messaufbau ist mit dem der Schalleistungsmessung identisch. Das DUT wird dazu im Modellhallraum belassen, da es sich entsprechend auf die Nachhallzeit auswirkt und deshalb bei der Schalleistungsmessung mitkorrigiert werden soll. Zur Berechnung der Schalleistung wird die gemittelte RT_{20} in den Ordner „PakData\DATA\TIP_Modellhallraum_Kumar-Meyer\Messreihe_Messdaten“ als „MHR_RT20.dat“ kopiert.

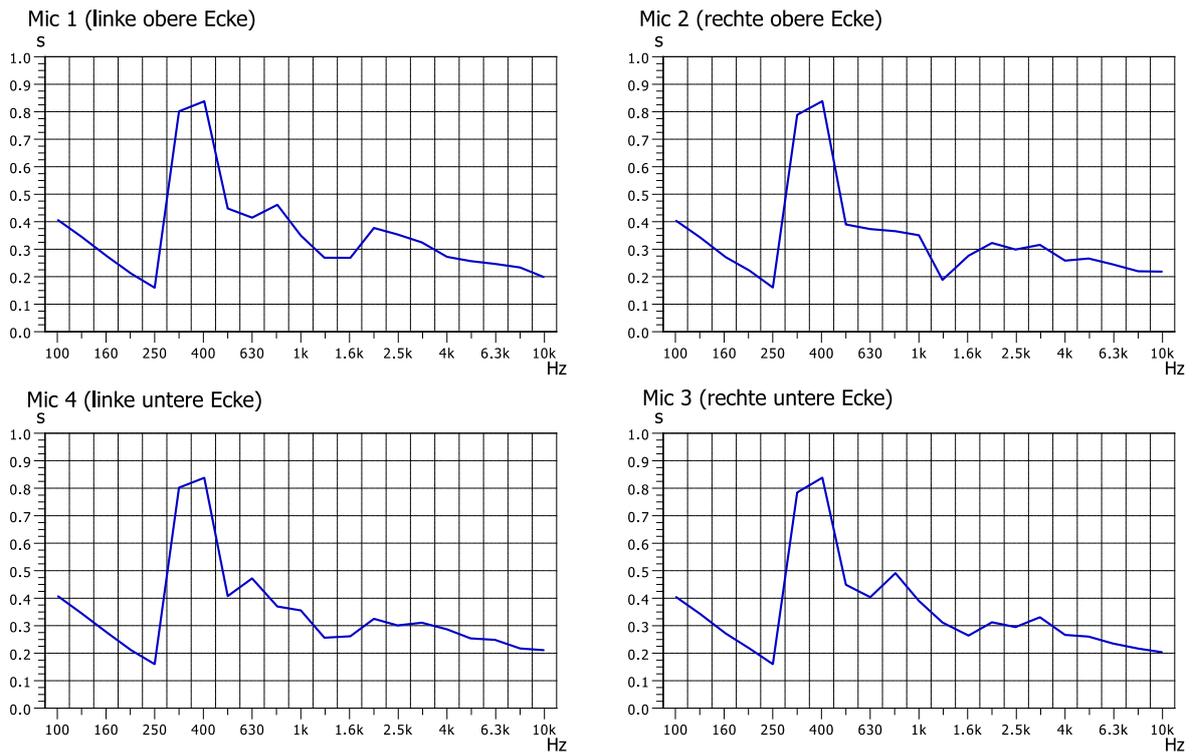


Abb. 3.6: T₂₀ an den 4 Messmikrofonen

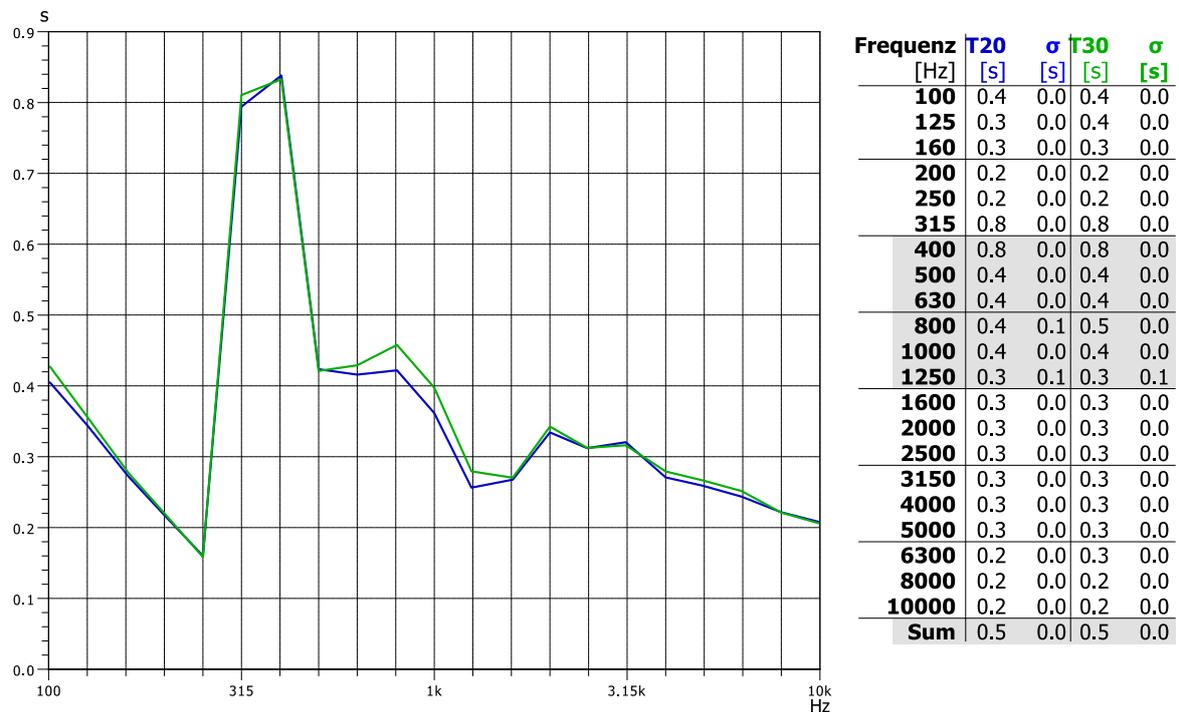


Abb. 3.7: Nachhallzeit über die Mikrofone gemittelt (blau T₂₀, grün T₃₀)

Die Messung unter 100 Hz ist in diesem Messsetup nicht möglich, da für tiefere Frequenzen die Aufweitung der Impulsantworten durch die Filterkoeffizienten zu groß wird (siehe TI-Projekt von Jakob Spötl).

3.5 Durchgeführte Messreihe

Um den Kompressor möglichst realitätsgetreu zu vermessen und die Modellhallraummessung mit der Referenzmessung vergleichen zu können, wurden folgende Messbedingungen geschaffen:

- Kalibrierung der Mikrofone
- Einlaufen des DUTs zur Erwärmung auf Betriebstemperatur
- abwechselnde Messung im reflexionsarmen Raum und Modellhallraum um eine aussagekräftige Messreihe zu erhalten (Überprüfung der Konsistenz des Betriebsgeräuschs vom DUT)
- Messung in klimatisierter Umgebung mit konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit (Aufnahmeraum im Tonstudio)
- einheitliche Einlauf- und Abkühlzeiten des DUTs zwischen den Messungen

Die folgende Messreihe wurde spät abends während der lehrveranstaltungsfreien Zeit erstellt, sodass keinerlei hörbare Außengeräusche die Messungen verfälschen konnten.

| | | | |
|---------------------------------------|----------------|---------------|-----|
| 3min Einlaufen lassen | | | |
| 5min Abkühlen, 30s Einlaufen lassen | | | |
| 1min Dummymessung (ohne Aufzeichnung) | | | |
| 5min Abkühlen, 30s Einlaufen lassen | | | |
| 1min | 1. Messung RaR | 22,7°C | 42% |
| 5min Abkühlen, 30s Einlaufen lassen | | | |
| 1min | 1. Messung MHR | 22,9°C | 43% |
| 5min Abkühlen, 30s Einlaufen lassen | | | |
| 1min | 2. Messung RaR | 23,3°C | 41% |
| 5min Abkühlen, 30s Einlaufen lassen | | | |
| 1min | 2. Messung MHR | 23,3°C | 39% |
| 5min Abkühlen, 30s Einlaufen lassen | | | |
| 1min | 3. Messung RaR | 23,2°C | 40% |
| 5min Abkühlen, 30s Einlaufen lassen | | | |
| 1min | 3. Messung MHR | 23,3°C | 39% |
| 5min Abkühlen, 30s Einlaufen lassen | | | |
| 1min | 4. Messung RaR | 23,3°C | 41% |
| 5min Abkühlen, 30s Einlaufen lassen | | | |
| 1min | 4. Messung MHR | 23,3°C | 39% |
| 5min Abkühlen, 30s Einlaufen lassen | | | |
| 1min | 5. Messung RaR | 23,3°C | 41% |
| 5min Abkühlen, 30s Einlaufen lassen | | | |
| 1min | 5. Messung MHR | 23,2°C | 42% |

Abb. 3.8: Messreihe vom 21.12.2017, 22:30 Uhr

3.6 Vergleich der Ergebnisse

Alle folgenden Diagramme stellen die Messwerte frequenzbewertet in dB(A) dar. Die Amplituden werden als Spitzenwerte dargestellt, da es in PAK nicht möglich ist, die Werte nach einer Differenzbildung von zwei Arrays als RMS auszugeben, auch wenn die Arrays die gleiche Einheit und gleiche Führungsgröße besitzen.

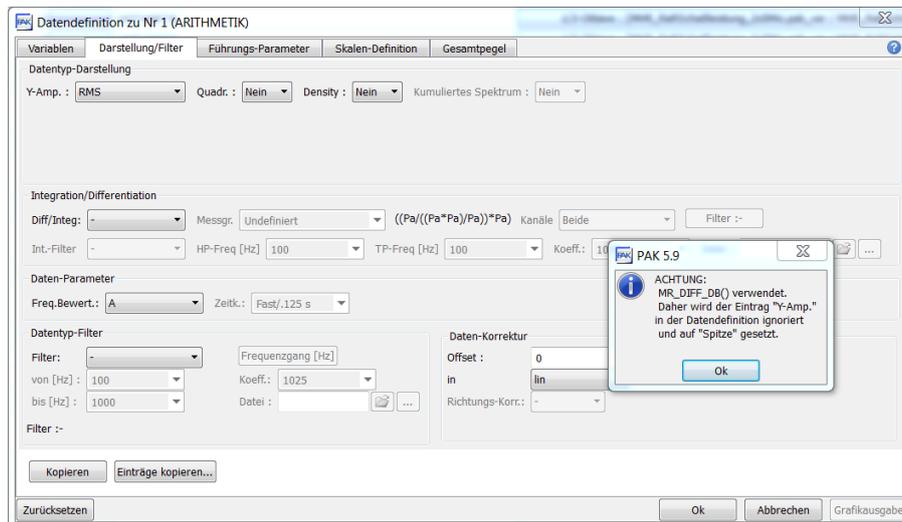


Abb. 3.9: Fehlermeldung in PAK bei Amplitudeneinstellung auf RMS

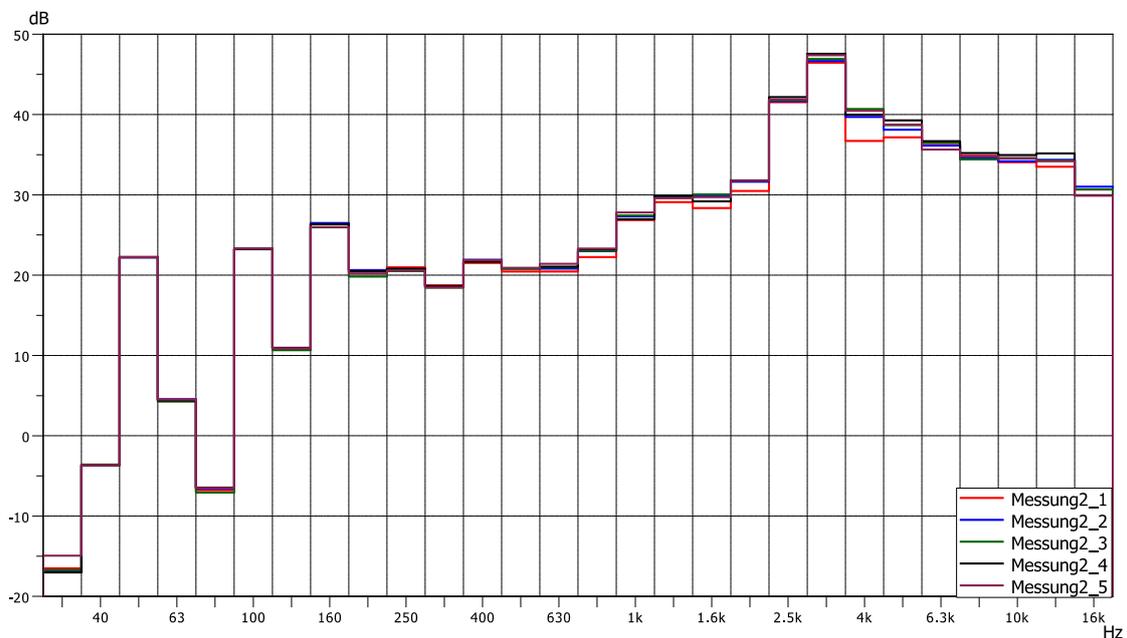


Abb. 3.10: Schalleistungsmessung (RaR) nach ISO 3746

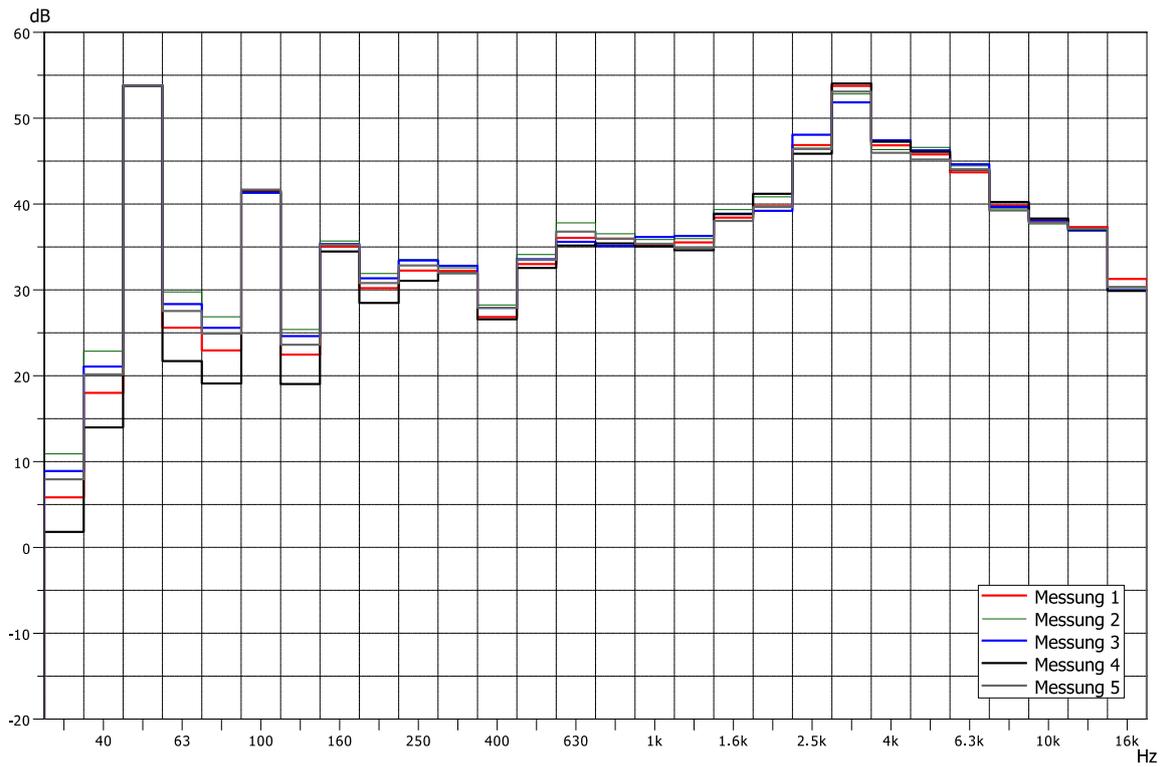


Abb. 3.11: Schalleistungsmessung (MHR) nach ISO 3741 ohne Entzerrung

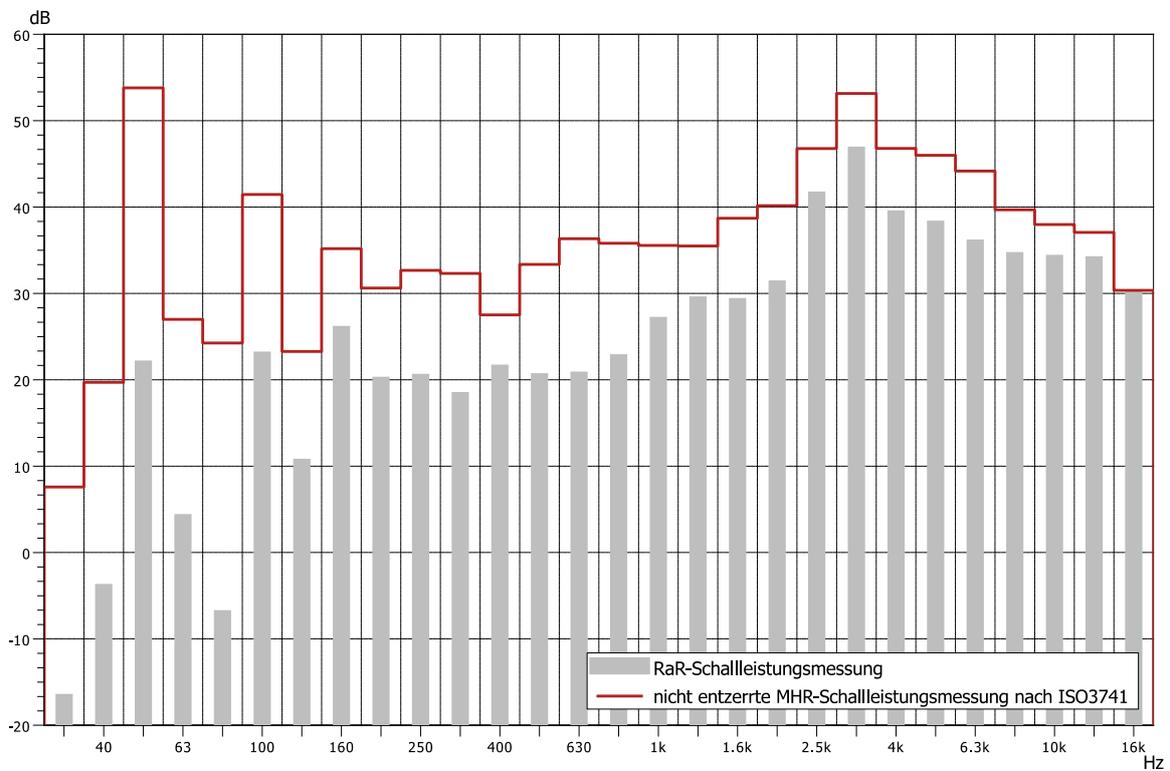


Abb. 3.12: Vergleich der Schalleistungen (RaR und MHR ohne Entzerrung)

In Abb. 3.10 bzw. Abb. 3.11 ist erkennbar, dass beide Messreihen vom Messaufbau, das Fremdgeräusch von außen und das Betriebsgeräusch des DUTs offensichtlich sehr konstant gehalten werden konnten, da es nur zu äußerst geringen Abweichungen zwischen den einzelnen Messungen in einer Messumgebung gekommen ist. Werden, wie in Abb. 3.12 gezeigt, allerdings die Ergebnisse der beiden Messreihen gegenübergestellt, so wird eine deutliche Abweichung zwischen diesen deutlich. Das nachfolgende Kapitel behandelt die gewählten Lösungsansätze für die Messverzerrung des Modellhallraums.

4 Entzerrung des MHR

4.1 PAK-Grafikausgabe „MHR-Schalleistung“

Reiter „BERECHNEN Entzerrung“

Hier erfolgt die Übergabe der Messdaten an Matlab, der Aufruf der Matlabfunktionen zur Entzerrung, sowie das Einlesen der entzerrten Schalldruckpegel. Über die Variablendefinition „MHR_Messreihe_entzerren.pak_var“ werden die gewünschten Messdaten übergeben, sowie in „MHR_KammerFFT_speichern.pak_var“ die gemessenen Kammerfrequenzgänge. Die Formeln „MHR_Messreihe_entzerrenArtderEntzerrung“ rufen diese Messungen auf, erstellen eine über die Zeit gemittelte FFT und speichern die Daten im Temp-Messdaten-Ordner des Projektpfads ab:

```
tmp1 = WRITE_52DATA_FILE(AVER(MAG(mic1m%a)), "D:\PAK_ProjectManager\
Project_Root_Container\TIP_Modellhallraum_Kumar-Meyer\PakData\DATA\
TIP_Modellhallraum_Kumar-Meyer\Matlab\Temp_Messdaten\Messung1.dat", BIN,
NEW_FILE, "in")
```

Anschließend erfolgen ein Programmaufruf und das Einlesen der entzerrten Schalldruckpegel der Messungen als FFT-Spektrum. Mit der Funktion „CALC_OCT“ berechnet PAK aus dem FFT-Spektrum Terzschalldruckpegel, die gemittelt und im Messdaten_Messreihe-Ordner des Projektpfads gespeichert werden:

```
Lp1 = CALC_OCT(m1,OKT_3T,8,NO_OVERLAP)
Lp2 = CALC_OCT(m2,OKT_3T,8,NO_OVERLAP)
Lp3 = CALC_OCT(m3,OKT_3T,8,NO_OVERLAP)
Lp4 = CALC_OCT(m4,OKT_3T,8,NO_OVERLAP)
Lpg = (Lp1+Lp2+Lp3+Lp4)/4
tmp6 = WRITE_52DATA_FILE(Lpg,"D:\PAK_ProjectManager\Project_Root_
Container\TIP_Modellhallraum_Kumar-Meyer\PakData\DATA\TIP_
Modellhallraum_Kumar-Meyer\Messreihe_Messdaten\LpEntzOGainOHa
n_Messung%a.dat", BIN, NEW_FILE, "in")
```

Reiter „Entzerrungskurve“

Die übergebenen Kurven aus Matlab werden im Temp-Messdaten-Ordner eingelesen und für jedes Mikrofon angezeigt.

Reiter „Schalleistungspegel“

Für die Berechnung der Schalleistung wurde die Formel „ISO3741_Schalleistung.pak_for“ modifiziert und als „MHR_Schalleistung_ISO3741_ArderEntzerrung“ gespeichert. Die Formel liest aus dem Messdaten-Ordner des Projektpfads die gemittelten Terzschalldruckpegel sowie die Nachhallzeitkurve ein.

Mit Hilfe von „GET_DATA“ wird der zugehörige Wert von T_{20} des jeweiligen Terzbands ausgelesen und mit der Sabine-Nachhallzeitgleichung die äquivalente Absorptionsfläche bestimmt:

$$Abs100 = 55.262 * V / (c * GET_DATA_VAL(RT20, Y_VAL, AT_VAL, 100))$$

...

$$Abs16000 = 55.262 * V / (c * GET_DATA_VAL(RT20, Y_VAL, AT_VAL, 16000))$$

Für die Werte unter 100 Hz wird die Nachhallzeit entsprechend interpoliert:

$$Abs31 = 55.262 * V / (c * 0.5)$$

Anschließend werden die Absorptionsflächenwerte in ein Array gespeichert:

$$Abs1 = CREATE_ARRAY(31.5, Abs31, \dots, 16000, Abs16000, CREATE_CURVE)$$

Bei der Kommunikation zwischen Matlab und PAK werden eingelesene dat-Files in der Z-Achse konstant auf 1 gesetzt, auch wenn sie als zweidimensional eingelesen werden. Auch eine Mittelung mit der Funktion „AVER“ kann die Daten nicht manipulieren. Deshalb muss das erstellte Array als dreidimensionale Kurve mit konstantem Z-Wert 1 interpretiert werden, um es mit den Terzschalldruckpegeln verarbeiten zu können:

$$Abs = CREATE_3D(31.5, 16000, 28, 'Frequency', 'No_Unit', 'No_Unit', '1/3-Oktave', 1, LIN, Abs1)$$

Für alle weiteren Terme, die nicht konstant über das gesamte Spektrum sind, gilt das gleiche Vorgehen.

Für die Summenbildung der Terme dient die Funktion „MR_SUM_DB“. Für weiterführende Berechnungen werden die Daten zwischengespeichert. Da aber nach der Zwischenspeicherung von den mit „MR_SUM_DB“ gemittelten Daten diese nicht mehr richtig von PAK eingelesen werden können, erfolgt das Zwischenspeichern der Terme einzeln, um sie von der Formel zur Messreihen-Mittelung einlesen zu können.

Reiter „Vergleich Schalleistungspegel“

Hier werden die zwischengespeicherten Daten jeder Messung eingelesen und als gemittelte Schalleistungsterzpegel wieder ausgegeben.

4.2 Entzerrung in Matlab

Nachfolgend werden die drei Matlabfunktionen, welche jeweils einen leicht variierten Ansatz verfolgen, mit den zugehörigen relevanten Codeausschnitten vorgestellt.

Fkt_Entzerrung.exe

```
function Fkt_Entzerrung(P_Messung, P_Kammer, P_Return, NMic)
% function Fkt_Entzerrung(P_Messung, P_Kammer, P_Return, NMic)
% Dies ist die Masterfunktion, welche von PAK aus aufgerufen wird um die
Messdaten
% bis zum Diffusbereich des Modellhallraums entsprechend dessen inversen
% Frequenzgangs zu korrigieren. Dabei werden hier lediglich Dämpfungen und
% keinerlei Verstärkungen vorgenommen. Der Übergang zwischen Modal- und
% Diffusbereich wird hier als "harte" Grenze bei ~3000 Hz angenommen.
% P_Messung ist der Pfad zu den aufgenommenen Messsignalen (MessungX.dat).
% P_Kammer ist der Pfad zu den aufgenommenen Kammerfrequenzgängen
(KammerX.dat).
% P_Return der Pfad wo die korrigierten Messdaten (MicKorrigiertFFTX.dat)
% und die Korrekturfrequenzgänge (OGainOHanX.dat) abgelegt werden sollen.
% NMic ist die Anzahl der verwendeten Mikrophone (maximal 4).
% Alle Parameter müssen als Strings übergeben werden.

NMic = str2double(NMic);

%% Reinladen des 1. Messsignals zur Initialisierung:
[Header, lD, ~, ~, ~, ~, ~] = pak52_binary_in([P_Messung,
'\Messung1.dat']);

MessungFFT = zeros(lD, 1);
KammerFFT = zeros(lD, 1);
MicKorrigiertFFT = zeros(lD, 1);

%%
waitH = waitbar(0, 'Berechnen...');
for i = 1:NMic
    waitbar(i/(NMic+1), waitH);

    % Reinladen der MessungX-Signale
    P_Messung_i = [P_Messung, '\Messung', int2str(i), '.dat'];
    [~, ~, ~, ~, ~, MessungFFT, ~] = pak52_binary_in(P_Messung_i);

    % Reinladen der entsprechenden Kammerfrequenzgänge (Überkreuzung
    % aufgrund der unterschiedlichen Aufstellung von Lautsprecher bzw. DUT)
    if i == 1
        P_Kammer_i = [P_Kammer, '\Kammer3.dat'];
        [~, ~, ~, ~, ~, KammerFFT, ~] = pak52_binary_in(P_Kammer_i);
    end

    if i == 2
        P_Kammer_i = [P_Kammer, '\Kammer4.dat'];
        [~, ~, ~, ~, ~, KammerFFT, ~] = pak52_binary_in(P_Kammer_i);
    end

    if i == 3
        P_Kammer_i = [P_Kammer, '\Kammer1.dat'];
        [~, ~, ~, ~, ~, KammerFFT, ~] = pak52_binary_in(P_Kammer_i);
    end
end
```

```

end

if i == 4
    P_Kammer_i = [P_Kammer, '\Kammer2.dat'];
    [~, ~, ~, ~, ~, KammerFFT, ~ ]= pak52_binary_in(P_Kammer_i);
end

KammerFFT(:) = KammerFFT(:)/KammerFFT(275);

for counter = 1:length(KammerFFT)
    if KammerFFT(counter) < 1
        KammerFFT(counter) = 1;
    end
    if counter > 4096
        KammerFFT(counter) = 1;
    end
end

% Entzerrung der Messdaten
MicKorrigiertFFT(:) = MessungFFT(:)./KammerFFT(:);

%obere Grenzfrequenz evtl. aus Daten berechenbar?!
fax = 0:18750/1D:18750-18750/1D;

pak52_binary_out(Header, length(KammerFFT), 1, fax, 1, KammerFFT, ...
    [P_Return, '\OGainOHan', int2str(i), '.dat']);

    pak52_binary_out(Header, length(MicKorrigiertFFT), 1, fax, 1,
MicKorrigiertFFT, ...
    [P_Return, '\MicKorrigiertFFT', int2str(i), '.dat']);

    save([P_Return, '\Mat-Files\OGainOHan', int2str(i)]);

end

waitbar(NMic/(NMic+1), waitH);
close(waitH);

end

```

Fkt_EntzerrungOhneGain.exe

```

function Fkt_EntzerrungOhneGain(P_Messung, P_Kammer, P_Return, NMic)
% function Fkt_EntzerrungOhneGain(P_Messung, P_Kammer, P_Return, NMic)
% Dies ist die Masterfunktion, welche von PAK aus aufgerufen wird um die
Messdaten
% bis zum Diffusbereich des Modellhallraums entsprechend dessen inversen
% Frequenzgangs zu korrigieren. Dabei werden hier lediglich Dämpfungen und
% keinerlei Verstärkungen vorgenommen. Zusätzlich wird der Übergang von
% Modal- zu Diffusbereich des Korrekturfrequenzgangs (ca. 2200 - 3000 Hz)
% für einen gleichmäßigeren Verlauf gefenstert.
% P_Messung ist der Pfad zu den aufgenommenen Messsignalen (MessungX.dat).
% P_Kammer ist der Pfad zu den aufgenommenen Kammerfrequenzgängen
(KammerX.dat).
% P_Return der Pfad wo die korrigierten Messdaten (MicKorrigiertFFTX.dat)
% und die Korrekturfrequenzgänge (OGainMHanX.dat) abgelegt werden sollen.
% NMic ist die Anzahl der verwendeten Mikrophone (maximal 4).
% Alle Parameter müssen als Strings übergeben werden.

```

```

...

KammerFFT(:) = KammerFFT(:)/KammerFFT(275);
KammerFFT(:) = KammerFFT(:)-1;
window = hann(2184);

for counter = 1:1093
    KammerFFT(3003+counter) =
KammerFFT(3003+counter)*window(1091+counter);
end

for counter = 1:length(KammerFFT)
    if KammerFFT(counter) < 0
        KammerFFT(counter) = 0;
    end
    if counter > 4096
        KammerFFT(counter) = 0;
    end
end

KammerFFT(:) = KammerFFT(:)+1;

% Entzerrung der Messdaten
MicKorrigiertFFT(:) = MessungFFT(:)./KammerFFT(:);

%obere Grenzfrequenz evtl. aus Daten berechenbar?!
fax = 0:18750/1D:18750-18750/1D;

pak52_binary_out(Header, length(KammerFFT), 1, fax, 1, KammerFFT, ...
    [P_Return, '\OGainMHan', int2str(i), '.dat']);

pak52_binary_out(Header, length(MicKorrigiertFFT), 1, fax, 1,
MicKorrigiertFFT, ...
    [P_Return, '\MicKorrigiertFFT', int2str(i), '.dat']);

save([P_Return, '\Mat-Files\OGainMHan', int2str(i)]);

end

waitbar(NMic/(NMic+1), waitH);
close(waitH);

end

```

Fkt_EntzerrungMitGain.exe

```

function Fkt_EntzerrungMitGain(P_Messung, P_Kammer, P_Return, NMic)
% function Fkt_EntzerrungMitGain(P_Messung, P_Kammer, P_Return, NMic)
% Dies ist die Masterfunktion, welche von PAK aus aufgerufen wird um die
Messdaten
% bis zum Diffusbereich des Modellhallraums entsprechend dessen inversen
% Frequenzgangs zu korrigieren. Dabei werden hier nicht nur Dämpfungen
% sondern auch die entsprechenden Verstärkungen vorgenommen. Zusätzlich

```

```

% wird der Übergang von Modal- zu Diffusbereich des Korrekturfrequenzgangs
% (ca. 2200 - 3000 Hz) für einen gleichmäßigeren Verlauf gefensterter.
% P_Messung ist der Pfad zu den aufgenommenen Messsignalen (MessungX.dat).
% P_Kammer ist der Pfad zu den aufgenommenen Kammerfrequenzgängen
(KammerX.dat).
% P_Return der Pfad wo die korrigierten Messdaten (MicKorrigiertFFTX.dat)
% und die Korrekturfrequenzgänge (MGainMHanX.dat) abgelegt werden sollen.
% NMic ist die Anzahl der verwendeten Mikrophone (maximal 4).
% Alle Parameter müssen als Strings übergeben werden.

```

...

```

KammerFFT(:) = KammerFFT(:)/KammerFFT(275);
KammerFFT(:) = KammerFFT(:)-1;
window = hann(2184);

for counter = 1:1093
    KammerFFT(3003+counter) =
KammerFFT(3003+counter)*window(1091+counter);
end

for counter = 1:length(KammerFFT)
    if counter > 4096
        KammerFFT(counter) = 0;
    end
end

KammerFFT(:) = KammerFFT(:)+1;

% Entzerrung der Messdaten
MicKorrigiertFFT(:) = MessungFFT(:)./KammerFFT(:);

%obere Grenzfrequenz evtl. aus Daten berechenbar?!
fax = 0:18750/1D:18750-18750/1D;

pak52_binary_out(Header, length(KammerFFT), 1, fax, 1, KammerFFT, ...
    [P_Return, '\MGainMHan', int2str(i), '.dat']);

pak52_binary_out(Header, length(MicKorrigiertFFT), 1, fax, 1,
MicKorrigiertFFT, ...
    [P_Return, '\MicKorrigiertFFT', int2str(i), '.dat']);

save([P_Return, '\Mat-Files\MGainMHan', int2str(i)]);

end

waitbar(NMic/(NMic+1), waitH);
close(waitH);

end

```

4.3 Entzerrungskurven

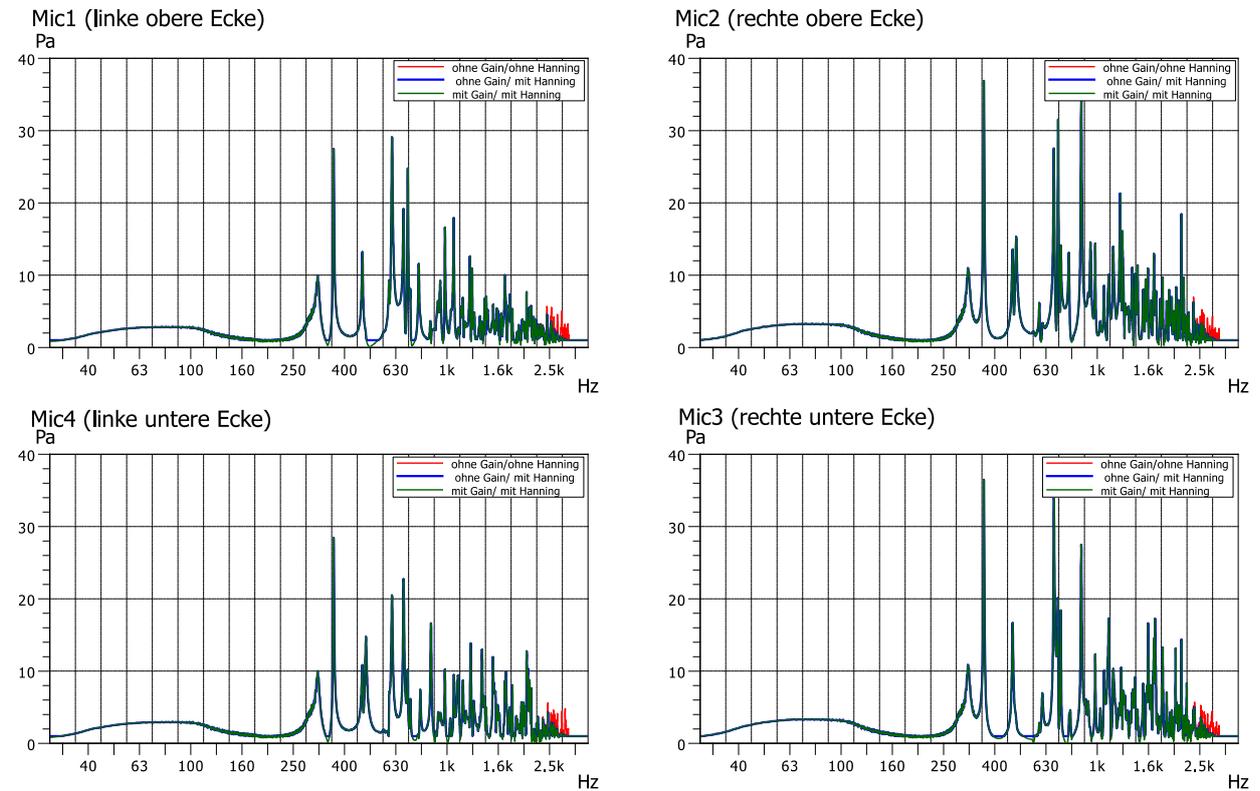


Abb. 4.1: Entzerrungskurven

Hier sei anzumerken, dass, wie in den vorhergehenden Codeausschnitten zu erkennen ist, eine Entzerrung im Pa-Bereich durch Division erfolgte und daher die Frequenzen, bei welchen keine Entzerrung erfolgen sollte, auf einen Wert von 1 Pa normalisiert werden mussten – eine Division durch 0 wurde dadurch verhindert.

4.4 Entzerrte Messergebnisse

In nachfolgender Abbildung ist der Vergleich der erhaltenen MHR-Messergebnisse vor bzw. nach Entzerrung mit den drei vorhin vorgestellten Matlabfunktionen mit den Ergebnissen der RaR-Referenzmessung dargestellt.

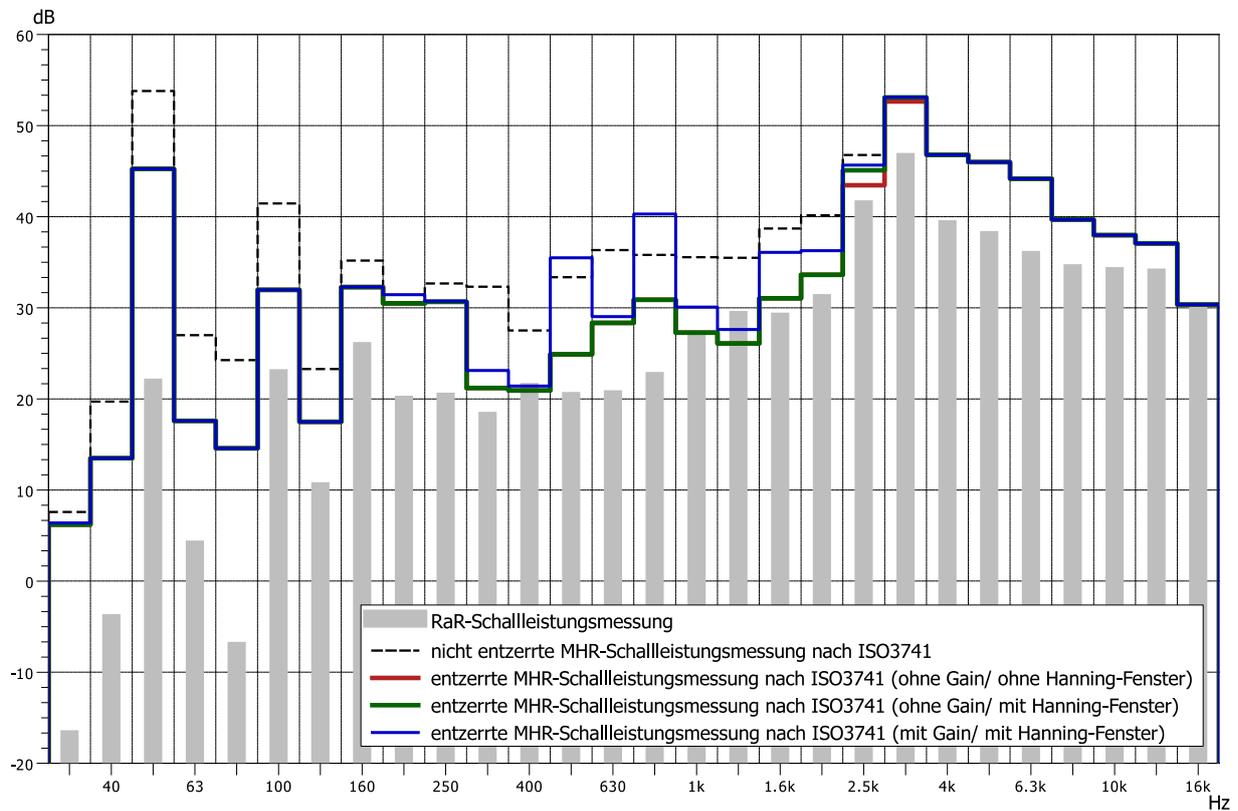


Abb. 4.2: Vergleich der Schalleistungsmessungen (RaR und MHR ohne/mit Entzerrung)

5 Diskussion der Messergebnisse

Wie in Abb. 4.2 zu erkennen ist, kommt es trotz sorgfältig durchgeführter Entzerrungen zu relevanten Diskrepanzen zwischen MHR- und RaR-Messergebnissen. Der gemessene Schalleistungspegel im MHR ist, ausgenommen bei 1,25 kHz, über das gesamte Spektrum zu hoch. Die Entzerrungsmethode mit Berücksichtigung der nicht eindeutig erklärbaren Pegelbrüche – also mit Gain – zeigt, wie bereits durch die Vorkenntnisse der Masterarbeit von Martin Müller zu vermuten war, eine weitere Verschlechterung der erhaltenen Messergebnisse. Wenn diese tatsächlich auf die Beziehung zwischen Mikrofon- und Quellenpositionen zurückzuführen sind, ist dieser Sachverhalt auch erklärbar. Während der Deckenlautsprecher bündig in der Decke des MHR eingebaut wurde (akustisches Zentrum befindet sich quasi in der Decke), so befand sich das vermutete akustische Zentrum des DUTs doch gezwungenermaßen an einer davon relativ zur Größe des MHR deutlich abweichenden Position. Es kann vermutet werden, dass dies auch ein Mitgrund dafür ist, weshalb es überhaupt zu so großen Abweichungen zwischen MHR- und RaR-Messergebnissen kommt. Denn selbst im Frequenzbereich über 3 kHz, wo auch der MHR theoretisch einen guten Hallraum darstellt und daher keine Entzerrungen durchgeführt wurden, kommt es zu erheblichen Abweichungen zwischen den beiden Messmethoden. Die beiden anderen Entzerrungsmethoden führten zu einer Annäherung der MHR-Messergebnisse an die der RaR-Referenzmessung.

Eine weitere Möglichkeit, weshalb es zu so großen Messfehlern kommt, stellt die Positionierung der Mikrofone dar. Während in gewöhnlichen Hallräumen eine „statistische Verteilung“ der Mikrofone im Raum mit genügend Abstand zu den begrenzenden Flächen gefordert wird, wurde beim MHR diese Forderung eklatant missachtet. Durch die Positionierung aller Mikrofone und sogar des DUTs selbst in den MHR-Ecken, wurde jegliche „Statistik“ aus der Messung genommen, obwohl diese den Grundstein der Hallraummessmethodik darstellt. Der MHR kann als sehr schwach gedämpftes Resonanzsystem betrachtet werden, dessen Resonanzen eine entsprechend hohe Güte aufweisen, weshalb der Frequenzgang auch stark ortsabhängig ist. Um behaupten zu können, dass die mit dem Deckenlautsprecher aufgenommenen Kammerfrequenzgänge als Vorkenntnis der erwarteten Abweichungen genügen, ist der Drift zwischen Position des DUTs und des Deckenlautsprechers vermutlich zu groß.

Ebenso wurden bisher keinerlei Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen des eingebauten passiven Lautsprechers auf das Verhalten des Schallfelds im MHR bei der Messung des DUTs angestellt. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass dieser vor allem bei seiner Resonanzfrequenz einen nicht zu vernachlässigbaren Einfluss auf das sich ausbildende Schallfeld im MHR hat.

Ein Teil der vorhin erwähnten Umstände könnte vielleicht mit einem anstelle des DUTs platzierten Lautsprecher zur Wiedergabe eines deterministischen Quellsignals und einer erneuten Aufnahme der Nachhallzeit bzw. der Kammerfrequenzgänge zur Entzerrung der Messergebnisse geklärt werden. Weiters gilt es zu überlegen, ob nicht eine Messung der erwähnten Parameter mittels MLS-Rauschen, welches eher dem Charakter des DUT-Betriebsgeräuschs entspricht, von Vorteil wäre, um untersuchen zu können, ob die erwähnten Pegelbrüche auch bei einer breitbandigen Anregung des MHR auftreten. Eine zusätzliche Möglichkeit zur Evaluierung der Messmethode wäre die Verwendung eines deutlich lautereren DUTs, welches im RaR vermessen werden könnte, ohne die dortigen SNR-Grenzen auszureizen.

Eine weitere Begründung stellt möglicherweise die nicht ideale Entzerrung des Lautsprechers mithilfe des nonlinearen Sweeps dar. Es kann jedoch, wie in Kapitel 2.3 erklärt wurde, davon ausgegangen werden, dass dies normalerweise nur für sehr geringe Abweichungen der Messergebnisse verantwortlich ist. Gewissheit über diesen Umstand würde eine Auswertung der im Zuge dieser Arbeit aufgenommenen Messungen mithilfe der von Martin Müller vorgeschlagenen Entzerrungsmethode bringen.