

# Fremdgeräuscheinwirkung und Raummoden bei tiefen Frequenzen im reflexionsarmen Raum

Bachelorarbeit  
von  
**SIEGFRIED GÜNDERT**  
(Mat.Nr: 501 88 98)

Ausgabetermin: 17.12.2010  
Abgabetermin: 17.2.2011  
Betreuer und Erstgutachter: Herr Prof. Dr.-Ing. M. Blau  
  
Zweiter Gutachter: Herr Dr.-Ing. I. Bork



Institut für Hörtechnik und Audiologie  
Jade Hochschule Oldenburg / Wilhelmshaven / Elsfleth  
Fachbereich Bauwesen und Geoinformation (B+G)  
Ofener Str. 16  
D-26121 Oldenburg



## Zusammenfassung:

Im Schallfeld reflexionsarmer Räume steigt der Reflexionsfaktor zu tiefen Frequenzen hin an. Dadurch entstehen Raumresonanzen. Fremdgeräusche, die in den Raum gelangen, werden durch die Raumresonanzen verstärkt und nehmen negativen Einfluss auf akustische Messungen. Außerdem können destruktive Interferenzen und die Fremdgeräusche den Signal-Rauschabstand (SNR) bei Übertragungsmessungen verschlechtern. Es sollten Empfängerorte mit hohem SNR und ein geeigneter Ort für die Schallquelle gesucht werden. Für Ruhegeräuschmessungen und die Bestimmung von Ersatzgeräuschpegeln sollte ein geeigneter Messort mit niedriger Fremdgeräuscheinwirkung bestimmt werden. Das Schallfeld wird durch die Messung von Übertragungsfunktionen quantifiziert. Durch eine Modalanalyse werden Resonanzfrequenzen, Dämpfungen und Schwingungsformen bestimmt. Die Mehrkanal-Messungen der Fremdgeräusche werden spektral, räumlich und statistisch analysiert. Dafür werden Spektrogramme, kalibrierte Leistungsdichtespektren, Pegelstatistiken berechnet und eine Migrationsanalyse durchgeführt. Zur Schätzung des SNR werden die Ergebnisse der Modalanalyse und Fremdgeräuschmessungen in einem Algorithmus verwendet. Aus den Analyseergebnissen wird das Raumzentrum als Ort niedriger Fremdgeräuscheinwirkung bestimmt. Ein geeigneter Quellort ist in einer Raumkante. Die Fremdgeräusche sind zeitvariant und folgen annähernd der modalen Struktur des Schallfeldes. Sie befinden sich im Frequenzbereich von 9 bis 20 Hz. Der mittlere Schalldruckpegel der Fremdgeräusche ist abhängig von der Tageszeit und kann zwischen 26 dB(ZS) und 40 dB(ZS) variieren. Bei Messungen außerhalb des Frequenzbereichs der Fremdgeräusche sollte ein Hochpassfilter eingesetzt werden. Der Fremdgeräusch-Eintrittsort bleibt unsicher, Analyseergebnisse weisen auf die Türe hin. Die Suche nach Empfängerorten mit hohem Signal-Rauschabstand zeigt Orte entlang einer horizontalen Koordinatenachse in der Raummitte.

## Abstract:

"External Noise and Roommodes at Low Frequencies in the Anechoic Chamber": In the soundfield of anechoic chambers, the reflection coefficient increases at the low frequency range. The reflections cause room resonances. External noise gets reinforced by the room resonances and takes negative influence on acoustic measurements. The signal to noise ratio may deteriorate by destructive interferences and external noise. Therefore receiver locations with high signal to noise ratio and a suitable place for the sound source are expected to be found. A suitable position with low external noise exposure for measurements of idle noise and the determination of noise levels is to be figured out. The sound field is quantified by measuring transfer functions. By a modal analysis, resonance frequency, damping and mode shapes are determined. The multichannel-measurements of the external noise are analysed spectrally, spatially and statistically. Spectrograms, calibrated power spectral densities, statistics of soundpressure levels are calculated and a migration analysis is performed. The results of modal analysis and external noise analyses are used to estimate the signal to noise ratio in an algorithm. The middle of the room is determined as site with low external noise exposure. An edge of the room is a suitable position for the sound source. The external noise is time variant and approximately complies with the modal structure. It covers a frequency range of 9 to 20 Hz. The sound pressure level of the external noise depends on daytime and varies between 26 dB(ZS) to 40 dB(ZS). For measurements outside the frequency range of external noise a highpass filter should be applied. The position of entrance of the external noise remains uncertain. As a possible location of entrance the door is indicated by results of analyses. The search for receiver positions with high signal to noise ratio shows locations along a horizontal axis in the middle of the room.

**Keywords: reflexionsarmer Raum, tiefe Frequenzen, Raummoden, Fremdgeräusche, SNR, modales Schallfeld, experimentelle Modalanalyse, Schallfeld Visualisierung**



# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Zielsetzung	1
1.2. Einordnung der Arbeit	3
1.3. Übersicht	3
2. Hintergrund und Stand der Technik	4
2.1. Bauformen reflexionsarmer Räume und Anforderungen an das Schallfeld	4
2.1.1. Luft- und Körperschallentkopplung durch Raum-im-Raum-Bauweise	4
2.1.2. Innenauskleidung mit schallabsorbierenden Materialien	5
2.1.3. Eignung des Schallfeldes reflexionsarmer Räume mit $1/r$ -Messungen nach DIN EN ISO 3745 Anhang A	5
2.2. Bekannte Eigenschaften des großen reflexionsarmen Raumes der PTB; das Messobjekt dieser Arbeit	6
2.3. Berandete Schallfelder und Moden	7
2.3.1. Eindimensionale stehende Wellen und Moden	7
2.3.1.1. Erzwungene Schwingung und Platzierung der Quelle	8
2.3.1.2. Einfluss von Dämpfung	8
2.3.2. Analytische Lösung für Raummoden im Rechteckraum	9
2.3.3. Raummoden in Räumen beliebiger Geometrie und Übertragungsfunktion	9
2.4. Fremdgeräuschquellen und qualitative Eigenschaften von Fremdgeräuschen in geschlossenen Räumen	10
2.5. Hintergrund der experimentellen Modalanalyse	10
2.5.1. Mechanische Modelle der Modalanalyse	11
2.5.2. Anwendung auf berandete Luftschallfelder	11
2.5.3. Messung der raumakustischen Übertragungsfunktionen	12
2.5.4. Modales Modell durch Parametrisierung der Übertragungsfunktionen	12
2.6. Arbeitsschritte zur Durchführung einer Modalanalyse in der Software ME'scope VES	13
2.6.1. Erstellung von Strukturmodellen	13
2.6.1.1. Erstellung der Strukturmodelle mit dem Drawing Assistant	14
2.6.1.2. Erstellung der Strukturmodelle als formatierte Tabelle	14
2.6.2. Import der Messdaten und deren Zuweisung	14
2.6.3. Curvefitting für MDOF-Systeme mit dem Polynomial-Verfahren	15
2.6.4. Export der modalen Parameter	15
3. Experimentelle Modalanalyse des reflexionsarmen Raumes für tiefe Frequenzen	17
3.1. Messaufbau zur Messung von Übertragungsfunktionen auf einer Kreisfläche	17
3.1.1. Verwendetes Equipment	17
3.1.2. Strukturmodell und resultierender Aufbau im reflexionsarmen Raum	18
3.1.3. Verschaltung der Messgeräte	19
3.1.4. Einstellungen der Messgeräte	20

3.1.5. Entwicklung eines Messprogramms in Visual Basic 6 zur Automatisierung . . . . .	20
3.2. Messablauf der Übertragungsfunktionsmessungen mit unterschiedlichen Quellpositionen	21
3.2.1. Messungen mit Sender 1 in der Mitte einer yz-Wand . . . . .	22
3.2.2. Messungen mit einem koaxialen Beyma im Bassreflexgehäuse in einer Raumkante	22
3.2.3. Messungen mit Sender 2 in einer Raumkante . . . . .	22
3.3. Ergebnisse der Modalanalyse in ME'scope mit unterschiedlichen Quellpositionen im reflexionsarmen Raum . . . . .	23
3.3.1. Allgemeines zu den Ergebnissen der Modalanalyse . . . . .	23
3.3.2. Zum Verständnis der grafischen Darstellungsformen der Moden . . . . .	23
3.3.3. Darstellung der einzelnen Modenformen . . . . .	24
3.4. Vergleich der Wellenlängen der Resonanzen mit den Raumabmessungen und Einfluss der Keile auf die Schallausbreitung . . . . .	25
3.5. Zusammenfassung . . . . .	27
4. Fremdgeräuschemessungen im reflexionsarmen Raum mit einem Mehrkanal-Audiointerface	28
4.1. Messaufbau zur mehrkanaligen Fremdgeräuschemessung an gewählten Orten im Raum .	28
4.1.1. Verwendetes Equipment . . . . .	28
4.1.2. Positionierung der Mikrofone . . . . .	28
4.1.3. Verschaltung der Messkette und vorgenommene Einstellungen . . . . .	29
4.2. Ablauf der Fremdgeräuschemessungen zu unterschiedlichen Tageszeiten . . . . .	29
4.3. Verwendete Analyseverfahren und deren Einstellungen zur Überprüfung und zur Erzeugung von Metadaten der Fremdgeräuschemessungen . . . . .	30
4.3.1. Erzeugung von Spektrogrammen in Artemis . . . . .	30
4.3.2. Kalibrierte Autoleistungsdichtespektren und statistische Eigenschaften unter Annahme annähernd gaussverteilter Spektralbänder . . . . .	30
4.3.3. Berechnung der Schalldruckpegel-Häufigkeitsverteilung des $L_{Z,S}$ in Matlab . . .	31
4.4. Ergebnisse der Fremdgeräuschemessungen in spektraler, räumlicher und statistischer Hinsicht . . . . .	31
4.4.1. Qualitative Beobachtungen aus den Spektrogrammen und Korrelationskoeffizienten der Messpunkte . . . . .	31
4.4.2. Autoleistungsdichtespektren . . . . .	33
4.4.3. Schalldruckpegel-Häufigkeitsverteilung der einzelnen Messpunkte und Vergleich zwischen den Messungen . . . . .	34
4.4.4. Ergebnisse der Suche nach Fremdgeräusch-Eintrittsorten . . . . .	35
4.5. Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	36
5. Schlussfolgerungen für Messungen im reflexionsarmen Raum	39
5.1. Messungen bei Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenz des reflexionsarmen Raumes .	39
5.2. Ruhegeräuschemessungen und Ermittlung der Ersatzgeräuschpegel von Mikrofonen . . .	39
5.3. Entwicklung eines Algorithmus zur Kartierung des SNR für einen gewählten Frequenzbereich unter Verwendung der Ergebnisse aus den Fremdgeräuschemessungen und des Modalmodells . . . . .	40
5.3.1. Systemtheoretische Überlegungen . . . . .	40
5.3.2. Umsetzung des Algorithmus in Matlab . . . . .	41
A. Gerätelisten, Datentabellen und große Abbildungen	45
A.1. Geräteliste zur Modalanalyse in Kapitel 3 . . . . .	45
A.2. Verwendete Winkeltabelle zur Positionierung des Mikrofons auf Kreisbahnen . . . . .	45

A.3. Geräteliste zur Fremdgeräuschmessung im reflexionsarmen Raum . . . . .	46
A.4. Kartesische Koordinaten der Mikrofonpositionen für die Fremdgeräuschmessungen . . .	46
A.5. Ergebnisse der Eigengeräuschmessungen der Messkette für die Fremdgeräuschmessungen und Frequenzgang der RME-Geräte . . . . .	46
B. Mathematische Herleitungen und Verfahren . . . . .	49
B.1. Mikrofonpositionsrechnung für gleiche Abstände auf einer Kreisfläche, hergeleitet über den Kosinussatz und eine simple Methode . . . . .	49
B.2. Leistungsdichtespektren nach Welch und deren Kalibrierung . . . . .	50
C. Messunsicherheiten . . . . .	52
C.1. Empirischer-Mittelwert und Stichproben-Standardabweichung . . . . .	52
C.2. Berechnung der Messunsicherheit . . . . .	52
C.3. Kombinierte Messunsicherheit . . . . .	53
C.4. Erweiterte Messunsicherheit . . . . .	53
C.5. Ansätze für ein Messunsicherheitsbudget im Frequenzbereich der Fremdgeräuscheinwirkung . . . . .	54
D. Quellcode . . . . .	55
D.1. Ausschnitte aus dem Messprogramm „KreisbahnenFRF“ . . . . .	55
D.2. Matlab-Skripte . . . . .	61
D.2.1. Skripte für Strukturmodelle, speziell für Kreisbahn-Structures und allgemein für ME’scope . . . . .	61
D.2.2. Skripte zur Umwandlung von Messdaten für ME’scope . . . . .	64
D.2.3. Skripte zur Auswertung der Fremdgeräuschmessungen mit Pegelstatistik und Leistungsdichtespektren . . . . .	66
D.2.4. Skripte zur Schätzung des ortsabhängigen SNR im Frequenzbereich, der durch das Modalmodell abgedeckt wird . . . . .	72
D.2.5. Skript zur Ortung der Fremdgeräusche mit einer Migrationsanalyse . . . . .	79
Symbole und Abkürzungen . . . . .	83
Literaturverzeichnis . . . . .	86
Danksagung . . . . .	87





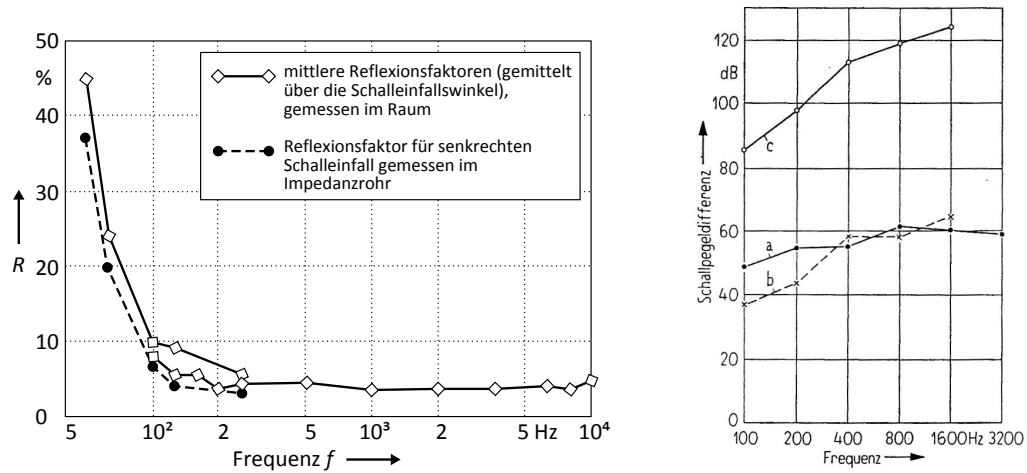
# 1. Einleitung

Der vorliegenden Arbeit ging ein berufspraktisches Studiensemester voraus, das ich in der Physikalisch Technischen Bundesanstalt Braunschweig in dem Zeitraum von August bis Dezember 2010 absolvierte. In dieser Zeit bearbeitete ich Fragestellungen bezüglich des tieffrequenten Verhaltens des großen reflexionsarmen Raumes in der Arbeitsgruppe 1.63 „Geräuschesmesstechnik“.

Da in der vorliegenden Arbeit Messungen mit vielen unterschiedlichen Positionen durchgeführt wurden, ist eine ausklappbare Karte der Messpositionen auf der letzten Seite dieser Arbeit zu finden. Dadurch soll das Verständnis von Messergebnissen erleichtert werden.

## 1.1. Motivation und Zielsetzung

Zur präzisen Kalibrierung akustischer Messgeräte muss das umgebende Schallfeld idealerweise frei von Störungen und für den Nutzfrequenzbereich bekannt sein. In einem reflexionsarmen Raum ist ein freies Schallfeld erwünscht, das nach DIN EN ISO 3745 Anhang A geprüft wird. Außerdem ist für eine angemessene Schalldämmung zu sorgen, da Nutzsignale je nach Messaufgabe eine festgelegte Pegeldifferenz zu Störsignalen einhalten müssen. Für den reflexionsarmen Raum (R-121) im Helmholtz-Bau II der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) wurden von [Grü63] und [Die68] Aussagen über die untere Grenzfrequenz ( $f_g \approx 95$  Hz), ab der ein Freifeld angenommen werden kann, und über die Luft- und Körperschallentkopplung ab dieser Frequenz getroffen. Die heute in R-121 durchzuführenden Messungen an Schallpegelmessern und Mikrofonen erstrecken sich bis zu einer Frequenz von 25 Hz und liegen somit weit unter der Grenzfrequenz von 95 Hz. Zukünftig ist geplant, die Messungen zu tieferen Frequenzen hin auszuweiten. Das Schallfeld im reflexionsarmen Raum ist für Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenz noch unbekannt. Hier liegen ausschließlich Messwerte des Reflexionsfaktors vor, die in Abbildung 1.1 dargestellt sind.



**Abb. 1.1.:** Links: Reflexionsfaktor der Wandauskleidung im großen reflexionsarmen Raum der PTB. Ergebnisse der Messungen im Impedanzrohr und der über die Schalleinfallswinkel gemittelten im Raum gemessenen Reflexionsfaktoren (Abbildung nach: [Die68]) Rechts: „An den Mauerschalen gemessene Schallpegeldifferenzen: a) innere Schale, b) äußere Schale und c) Summe der beiden Pegeldifferenzen“ (Quelle: [Grü63]).

Der ansteigende Reflexionsfaktor führt zu einer hohen Güte der Raumresonanzen und gleichzeitig zu einem ortsabhängigen Schalldruck. Außerdem ist anzunehmen, dass das Schalldämmmaß zu tieferen Frequenzen weiterhin abnimmt, sodass unterschiedliche Probleme aufeinander treffen:

- Bei tiefen Frequenzen gelangen zunehmend Fremdgeräusche in den Raum.
- Die Fremdgeräusche werden durch die Raumresonanzen ortsabhängig verstärkt.
- Die resultierenden tieffrequent verstärkten Fremdgeräusche stören die Messungen, erhöhen Messunsicherheiten und können dazu führen, dass der Signal-Rauschabstand durch die zu tiefen Frequenzen hin weniger abgestrahlte Schallleistung der Quelle nicht ausreicht.

Für Ruhegeräuschmessungen ist es z. B. wichtig zu wissen, wo im Raum ein geeigneter Messort mit niedrigem Fremdgeräuschpegel ist. Um eventuelle Maßnahmen zur Dämpfung der Resonanzen zu treffen, muss deren Frequenz bestimmt werden und der örtliche Schalldruckverlauf bekannt sein, weil sich der Wirkungsbereich je nach Absorbentyp unterscheidet. Wenn Sender-Empfänger Messungen wie z. B. Mikrofonkalibrierungen durchgeführt werden, so ist ein weiteres Problem, dass destruktive Interferenzen ortsabhängig bei unterschiedlichen Frequenzen zu einer schwachen Übertragung führen. Um dem entgegen zu wirken muss einerseits ein Quellort mit möglichst hoher Ankopplung an das Schallfeld bestimmt werden, andererseits muss auch ein Empfängerort gefunden werden, an dem der Signal-Rauschabstand für den gewünschten Frequenzbereich möglichst groß ist. Dazu ist es nötig, das Schallfeld mit unterschiedlichen Sender- und Empfängerpositionen zu untersuchen. Zusammengefasst ergeben sich folgende Fragen:

1. Wie hoch ist die Ausprägung der Fremdgeräusche?
  - a) Welche spektralen und räumlichen Eigenschaften haben diese? (Siehe Kapitel 4.4)
  - b) Welche maximalen Fremdgeräusch-Schalldruckpegel sind zu erwarten? (Kapitel 4.4.3 und 4.4.2)
  - c) Woher kommen die Fremdgeräusche? (Abschätzung in Kapitel 4.4.4)
2. Was für einen Einfluss haben die Raummoden auf die Fremdgeräusche?

- a) Wie ist der örtliche Verlauf der Moden, welche Frequenz haben diese und wie hoch ist die Güte? (Kapitel 3.3)
  - b) An welchem Ort können Messungen für Ruhegeräusche und Ersatzgeräuschpegel vorzugsweise durchgeführt werden? (Kapitel 3.5 und 5.2)
3. Wie und wo kann in einem nicht mehr freien Feld welcher Frequenzbereich hinreichend genau gemessen werden? Wie hoch ist der Signal-Rauschabstand in Abhängigkeit der Frequenz, des Ortes und der Anregung? (Kapitel 5.3).

Daraus ergeben sich folgende Ziele:

1. Bestimmung der spektralen, räumlichen und statistischen Eigenschaften der Fremdgeräusche an interessierenden Punkten im Schallfeld. (Kapitel 4)
2. Ermittlung der modalen Parameter des Raumes in einer repräsentativen Messebene bei geeigneter Schallfeldankopplung der Quelle. (Kapitel 3)
3. Verwendung des modalen Modells, um den Signal-Rauschabstand in Abhängigkeit des Ortes, der Frequenz und der Anregung abzuschätzen. Vergleich mit den Ergebnissen der Fremdgeräuschmessungen. Entwicklung eines Algorithmus zur Bestimmung eines geeigneten Empfängerortes aufgrund der ermittelten Daten für einen gewünschten Frequenzbereich unterhalb der Grenzfrequenz, bzw. im Frequenzbereich, der durch das Modalmodell abgedeckt wird. (Kapitel 5.3)
4. Suche nach Hinweisen auf einen Eintrittsort der Fremdgeräusche für eventuelle Gegenmaßnahmen. (Kapitel 4.4.4)
5. Rückschlüsse auf das Ausbreitungsverhalten in den Dämpfungскеilen könnten die Untersuchungen in anderen Räumen vereinfachen. (Kapitel 3.4)

## 1.2. Einordnung der Arbeit

Thematisch ist die Arbeit in die Fachgebiete Technische Akustik, Raumakustik und akustische Messtechnik einzuordnen.

Über das tieffrequente Verhalten reflexionsarmer Räume in Bezug auf Fremdgeräusche und Raumresonanzen existieren fast keine Artikel. In [SK08] wird über das tieffrequente Verhalten eines großen reflexionsarmen Raumes berichtet. Die Eignung kleiner reflexionsarmer Räume für tiefe Frequenzen wird in [FZSP98] behandelt. In [LV01] werden Reflexionen in reflexionsarmen Räumen thematisiert. Insgesamt geben die recherchierten Artikel hilfreiche Informationen für das Thema dieser Arbeit, aber es gibt keine Ergebnisse die für diese Arbeit direkt verwendet werden können. Der Grund dafür ist, dass sich die zu beantwortenden Fragestellungen speziell auf den reflexionsarmen Raum der PTB beziehen. Über Fremdgeräusche in reflexionsarmen Räumen wurden keine Berichte gefunden. Generell über reflexionsarme Räume und deren Eignung wird z. B. in [BW09] und [BW10] berichtet.

## 1.3. Übersicht

Nach der Erläuterung der Problemstellung und Ziele in Kapitel 1.1 sollen die Hintergrundinformationen zum Thema und der Stand der Technik in Kapitel 2 wiedergegeben werden. Die Messung des Übertragungsverhaltens im reflexionsarmen Raum und die Ergebnisse der experimentellen Modalanalyse sind in Kapitel 3 aufgeführt. In Kapitel 4 werden die Messungen der Fremdgeräusche beschrieben und die Ergebnisse der Messungen analysiert. Abschließend sollen in Kapitel 5 Folgen und Maßnahmen für Messungen diskutiert werden.

## 2. Hintergrund und Stand der Technik

In diesem Kapitel sollen für das Thema relevante Grundlagen und Hintergründe erläutert werden. Zu Beginn werden in Kapitel 2.1 wichtige Bauformen reflexionsarmer Räume und die allgemeinen Anforderungen an das Schallfeld behandelt. Anschließend sollen in Kapitel 2.2 die bekannten Eigenschaften des reflexionsarmen Raumes der PTB thematisiert werden. Da es in der vorliegenden Arbeit um den Frequenzbereich geht, bei dem die Berandungen des Raumes reflektieren, wird in Kapitel 2.3 auf berandete Schallfelder und deren parametrische Beschreibung eingegangen. Nachdem der Einfluss berandeter Schallfelder auf eingebrachten Schall geklärt ist, soll eine allgemeine Betrachtung von möglichen Fremdgeräuschquellen, Eintrittswegen und tendenziellen Eigenschaften in Kapitel 2.4 erfolgen. Das verwendete Verfahren der experimentellen Modalanalyse wird in Kapitel 2.5 theoretisch betrachtet. In Kapitel 2.6 werden die Arbeitsschritte zur praktischen Durchführung einer Modalanalyse in der Software ME'scope erklärt.

### 2.1. Bauformen reflexionsarmer Räume und Anforderungen an das Schallfeld

Das Anwendungsgebiet reflexionsarmer Messräume erstreckt sich insbesondere auf Schallempfänger- und Schallquellmessungen wie Richtcharakteristiken, Kalibrierungen (sekundär und primär), sowie Schalleistungs- und Schallintensitätsmessungen. Auch psychoakustische Messungen finden in reflexionsarmen Räumen statt. Allen Anwendungen ist die Forderung eines ungestörten, möglichst einfachen Schallfeldes gemein. Ungestört bedeutet, dass hauptsächlich Nutzschall und kaum Störschall vorhanden ist. Unter einem einfachen Schallfeld wird das „Freifeld“ verstanden, in dem sich eine Schallwelle ungehindert ausbreiten kann. Ein ideales Freifeld liegt beispielsweise in einem unendlich ausgedehnten, homogenen, elastischen Medium vor. Ein solches Schallfeld ist jedoch schwer zu realisieren, denn die Messungen müssen in geschlossenen Räumen stattfinden um ausreichend Schalldämmung gegenüber der lärmbelasteten Umwelt zu erreichen und ein regulierbares Klima zu erschaffen. In Kapitel 2.1.1 wird beschrieben, wie die Räume allgemein aufgebaut sind, damit sie diesen Anforderungen gerecht werden. Um zusätzlich ein Freifeld zu erhalten, werden die Räume mit Dämpfungsmaterialien ausgekleidet. Hier gibt es unterschiedliche Methoden, von denen die wichtigsten in Kapitel 2.1.2 aufgeführt sind. Neben der Auskleidung muss gewährleistet sein, dass vorhandene Gegenstände keine störenden Reflexionen verursachen. Laut Erfahrungsberichten wie beispielsweise in [Kör90] führen bereits Gitterrostböden zu signifikanten Änderungen des Schallfeldes. Auch in [DIN04] gibt es zu diesem Thema Hinweise.

#### 2.1.1. Luft- und Körperschallentkopplung durch Raum-im-Raum-Bauweise

Die geforderte Schalldämmung wird meistens durch den Bau eines elastisch gelagerten Raumes in einem größeren Raum erreicht. Das Luftschalldämmmaß von Doppelwänden wird in [Kut04, Kapitel 14.4] beschrieben und lässt sich in drei charakteristische Frequenzbereiche aufteilen. Bei Frequenzen unterhalb der Resonanz verhält sich das Schalldämmmaß wie ein Tiefpass erster Ordnung, darüber steigt es mit etwa 18 dB pro Oktave an. Dieser Bereich stellt den Vorteil gegenüber einschaligen Bauweisen dar. Bei Wellenlängen, die kürzer als der doppelte Wandabstand sind, entstehen Resonanzen zwischen den

Wänden, die zu Einbrüchen des Schalldämmmaßes führen.

Kritische Elemente, die die Schalldämmung verschlechtern, sind meist Türen, Kabelkanäle, Klimaanlage und auch Decken, die oft eine niedrigere Masse besitzen, wodurch sich das einfache Massegesetz zu höheren Frequenzen hin ausweitet. Ein weiterer vermeidbarer Eintrittsweg ist über Körperschall. Durch elastische Lagerung des Innenraums z. B. auf Federn oder Gummi wird ein Masse-Feder-System erzeugt, das wie ein Tiefpass zweiter Ordnung wirkt und oberhalb der Resonanz mit ansteigender Güte stärker abfällt. Dieser Zusammenhang wird in [Kut04, Kapitel 15.4.2] beschrieben. Die Resonanzfrequenz wird möglichst niedrig abgestimmt. Die Entkopplung verschlechtert sich in der Nähe der Resonanz, da bei tiefen Frequenzen Dämpfung schwer zu realisieren ist. Deshalb sollte die Resonanzfrequenz in der Praxis mindestens eine Oktave unterhalb der tiefsten Betriebsfrequenz liegen (Vgl. [Mös07, S. 152]).

### 2.1.2. Innenauskleidung mit schallabsorbierenden Materialien

Die Innenauskleidung wird allgemein durch poröse Absorber vorgenommen. In dem porösen Material wird die kinetische Energie des Schalls durch Dissipation in Wärmeenergie umgewandelt. Die Absorber werden dafür vor den annähernd schallharten reflektierenden Wänden angebracht. Da die Absorbermaterialien so dicht sein müssen, dass sie befestigt werden können, ist ihre spezifische Impedanz anders als die von Luft. Impedanzsprünge führen grundsätzlich zu Reflexionen (Vgl. [Kut04, S. 94 ff.]), die hier unerwünscht sind. Es muss deshalb ein möglichst fließender Übergang von Luft in das poröse Medium erzeugt werden. Das bedeutet, dass sich der sog. Strömungswiderstand zur schallharten Berandung hin langsam erhöht. Dazu gibt es unterschiedliche Strategien. Die konventionelle Vorgehensweise ist, die Wände mit spitz zulaufenden Keilen aus einem annähernd homogenen porösen Material wie Mineralwolle auszukleiden. Eine andere Idee von [Cre74] sind an Schnüren aufgehängte Würfel, die zur Wand hin größer werden und im Strömungswiderstand zunehmen. In [Fuc10, S. 413 ff.] werden außerdem „alternative Absorberbausteine“ vorgestellt, die aus Plattenresonatoren für tiefere Frequenzen und aus porösen Materialien mit niedrigerer Einbautiefe zusammengesetzt sind.

Die Absorptionswirkung poröser Absorber nimmt vor allem zu tiefen Frequenzen hin ab, denn mit zunehmender Wellenlänge entfernt sich das erste Schnellextrimum von den Absorbern, sodass immer weniger kinetische Energie durch viskose Reibung an den Grenzschichten im Absorber in Wärme umgewandelt werden kann. Die sog. untere Grenzfrequenz, unter der kein Freifeld mehr herrscht, wird durch Messungen im Kundt'schen Rohr oder direkt im Raum (Vgl. [Die68]) und durch die normativen Regelungen aus Anhang A der Norm [DIN04] bestimmt. Der Betrag des Reflexionsfaktors  $|R|$  der Wandauskleidung sollte kleiner 10 % sein. Für den Absorptionsgrad gilt  $\alpha = 1 - |R|^2$  (Vgl. [Kut04, Kapitel 6.4, Gl. 22]).

### 2.1.3. Eignung des Schallfeldes reflexionsarmer Räume mit $1/r$ -Messungen nach DIN EN ISO 3745 Anhang A

Im Anhang A der DIN EN 3745 [DIN04] wird das normative „allgemeine Verfahren zur Feststellung der Eignung von reflexionsarmen Räumen und Halbräumen“ festgelegt. Obwohl sich die Norm auf den Frequenzbereich oberhalb der Grenzfrequenz bezieht, ist sie für diese Arbeit interessant. Im Freifeld nimmt der Schalldruck des Fernfeldes einer Schallquelle umgekehrt proportional mit dem Radius  $r$  ab. Im reflexionsarmen Raum werden Abweichungen vom sog.  $1/r$ -Gesetz überprüft. Dies geschieht durch Messung des Schalldruckpegels mit einem Mikrofon auf radialen Pfaden, die ihren Ursprung im akustischen Zentrum der Quelle haben. Für den Frequenzbereich zwischen 800 Hz und 5 kHz ist eine Abweichung von  $\pm 1$  dB zulässig, für  $630 \text{ Hz} \geq f \geq 6.3 \text{ kHz}$  eine Abweichung von  $\pm 1.5$  dB. Als Messsignal werden Einzeltöne unterschiedlicher Frequenz verwendet. Alternativ kann mit Rauschen gemessen werden, dessen

Terzbänder auf Abweichungen untersucht werden. Die Prüfschallquellen sollen eine annähernd omnidirektionale Richtcharakteristik aufweisen und „ein feststellbares Zentrum besitzen“ [DIN04, S. 23]. Das Zentrum ändert sich jedoch in Abhängigkeit von der Frequenz. Gleichzeitig müssen die von der Quelle erzeugten Schalldruckpegel mindestens 10 dB über dem Fremdgeräuschpegel liegen und zeitinvariant sein. Ist der Fremdgeräuschpegel im Bereich  $10 \text{ dB} \leq L_{SNR} \leq 20 \text{ dB}$ , so muss von den Schalldruckpegeln der Messungen ein Korrekturwert

$$K = -10 \log \left( 1 - 10^{(-L_{SNR}/10)} \right) \text{ dB} \quad (2.1)$$

subtrahiert werden.

## 2.2. Bekannte Eigenschaften des großen reflexionsarmen Raumes der PTB; das Messobjekt dieser Arbeit

Über den Bau in den 1960er Jahren und über die Eigenschaften des großen reflexionsarmen Raumes der PTB wird in [Grü63] berichtet. Die hier gemachten Angaben sind von dort teilweise entnommen. Die Raummaße wurden nochmals mit einem Laser Distometer nachgemessen.

Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, handelt es sich um eine Raum-im-Raum-Bauweise. Der Raum ist auf „mäanderförmigen“ Stahlfedern **elastisch gelagert**. Die Resonanzfrequenz wurde auf  $f_r = 5.3 \text{ Hz}$  und der Gütefaktor auf  $Q_r = 9$  bestimmt. Die **Luftschalldämmung** wurde durch Pegeldifferenzen gemessen. Ihr Verlauf über der Frequenz wird in Abbildung 1.1 dargestellt.

Die **Innenraumabmessungen** zwischen den Keilspitzen sind  $6 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 9 \text{ m}$ . Die 80 cm langen „Sillan“-Keile haben eine Basis von  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ . Sie sind vor Hohlräumen angebracht, die als Helmholtzresonatoren wirken sollen. Die unterste **Grenzfrequenz** für den reflexionsarmen Raum wurde auf  $f_g = 95 \text{ Hz}$  festgelegt. Oberhalb  $f_g$  kann ein Freifeld angenommen werden.

Der Verlauf des Reflexionsfaktors nach Messungen im Kundt'schen Rohr und Messungen im Raum von [Die68] wird in Abbildung 1.1 gezeigt. Der Raum wird durch eine Klimaanlage im Norm-Wertebereich gehalten, die jedoch während der Messungen wegen Störgeräuschen abgeschaltet sein muss. In dem Raum ist ein begehbares Stahlseilnetz aufgespannt.

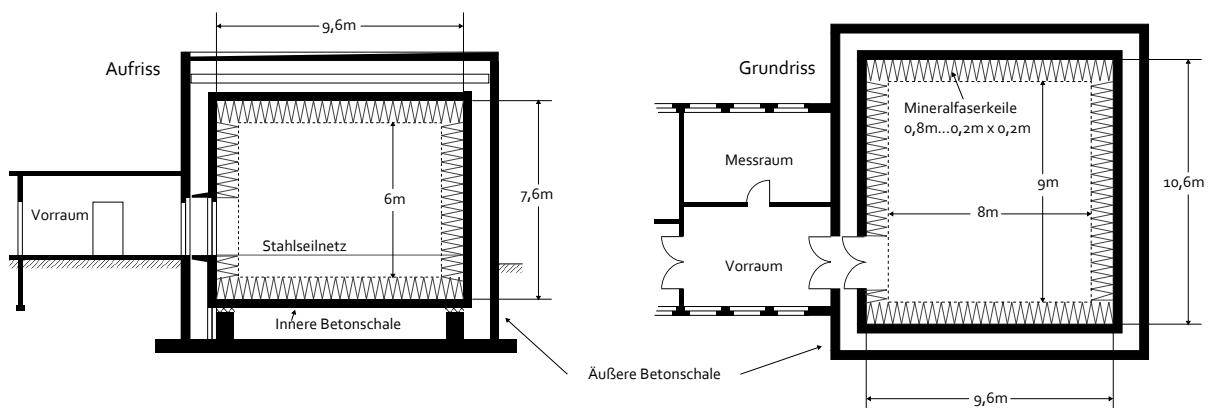


Abb. 2.1.: Aufriß und Grundriß des großen reflexionsarmen Raumes der PTB.

## 2.3. Berandete Schallfelder und Moden

In diesem Abschnitt wird über die qualitative Betrachtung eines eindimensionalen, berandeten Schallfeldes in Kapitel 2.3.1 auf das tieffrequente Schallfeld in Räumen eingegangen. Für Rechteckräume lässt sich das Verhalten vom Eindimensionalen übertragen, was in Kapitel 2.3.2 erläutert wird. Die Erweiterung auf allgemeine Räume erfolgt in Kapitel 2.3.3. In der Literatur wird diese Grundlage der wellentheoretischen Raumakustik mehrfach, aber nicht ganz einheitlich beschrieben und findet sich u. a. in [Kut04, S. 159 ff.], [Kut09, S. 67 ff.], [LSW09, S. 216 ff.] und [Vor08, S. 53 ff.]. Die Hintergründe werden in der vorliegenden Arbeit nicht von Grund auf behandelt, sind aber in der genannten Literatur oder kurz gefasst unter [Vei05] zu finden.

### 2.3.1. Eindimensionale stehende Wellen und Moden

Im eindimensionalen, ideal schallhart berandeten Schallfeld mit der Länge  $L_x$  gibt es bestimmte Bedingungen für die Schallfeldgrößen. An den Rändern mit unendlich hoher Wandimpedanz  $Z = p/v = \infty \text{ Pa s/m}$  müssen die Schallschnelle  $v = 0 \text{ m/s}$  und der Schalldruck  $p$  maximal sein. Eine Schallwelle wird zwischen den Rändern hin- und herreflektiert, sodass sich die reflektierten Wellen konstruktiv und destruktiv überlagern. Wegen der Randbedingungen können sich jedoch nur Wellen mit

$$\frac{\lambda_n}{2} = \frac{L_x}{n} \quad (2.2)$$

ausbreiten, dabei ist  $n = 1, 2, 3, \dots$  die Ordnungszahl. Die zugehörige Frequenz  $f_n = c/\lambda_n$  wird **Eigenfrequenz** oder auch Resonanzfrequenz genannt. Für die Bedingung aus Gl. 2.2 bilden sich im Falle stationärer Anregung **stehende Wellen**, bei denen die Schallschnelle um  $90^\circ$  zum Schalldruck verschoben ist. Es findet also kein Energietransport aus dem berandeten Gebiet mehr statt. Diese Eigenschwingungszustände werden auch Moden genannt, deren Schallfeldgrößen einen charakteristischen räumlichen Verlauf haben. In Abbildung 2.2 werden die ersten drei Moden dargestellt. Der Schalldruckverlauf folgt einer Kosinusfunktion, deren Nulldurchgänge am gleichen Ort bleiben. Gleichzeitig bedeutet das, dass die Gebiete zwischen den sog. Knotenpunkten einen Schalldruck gleicher Phase, aber unterschiedlichen Betrags aufweisen und dies mit alternierendem Vorzeichen (bzw.  $0^\circ$  und  $180^\circ$ ). Die Welle hat nur noch eine zeitliche aber keine örtliche Änderung der Phase. Diese Schwingungsform wird auch als **Eigenfunktion**  $\Psi_n$  bezeichnet. Im eindimensionalen, schallhart berandeten Schallfeld gilt für die Eigenfunktion

$$\Psi_n(x) = \cos(k_n x) \quad (2.3)$$

mit der Kreiswellenzahl  $k_n = \omega_n/c = 2\pi/\lambda_n$ .

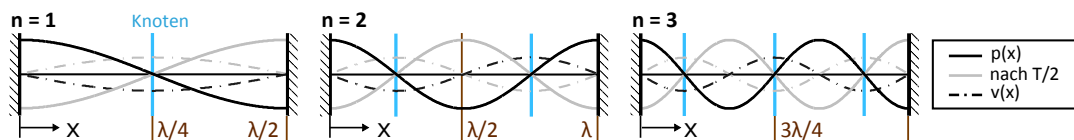


Abb. 2.2.: Moden, bzw. Stehende Wellen im schallhart berandeten eindimensionalen Schallfeld.

Der Ursprung für die analytische Beschreibung eindimensionaler berandeter Schallfelder liegt in der Lösung der eindimensionalen Wellengleichung. In deren allgemeine Lösung werden Exponentialschwingungen für die hin- und rücklaufende Welle eingesetzt und Randbedingungen festgelegt. Eine mathematische Beschreibung von stehenden Wellen und Eigenschwingungen in eindimensionalen Schallfeldern ist beispielsweise in [Kut04, S. 94 – 100 und S. 158 – 161.] gegeben.

### 2.3.1.1. Erzwungene Schwingung und Platzierung der Quelle

Bei Anregung mit einer Schallquelle wird das Schallfeld zu Schwingungen erzwungen [Kut04, S. 166 – 170]. Durch die orts- und frequenzabhängige Schallfeldimpedanz ist die Platzierung der Quelle für die Stärke der Anregung von Bedeutung. Sobald sich die Quelle an einem Ort niedriger Impedanz befindet, wird sie weniger Schall abstrahlen. Befindet sie sich genau im Knoten einer Mode, so kann diese praktisch nicht angeregt werden. Umgekehrt gilt das für einen Druckempfänger. Die ortsabhängige Schalldruckamplitude bei stationärer Anregung mit der Eigenfrequenz  $f_n$  der Mode  $n$  wird also durch die Werte der Eigenfunktion am Ort des Empfängers und der Quelle bestimmt und somit ist die Amplitude des Schalldruckzeigers

$$\hat{p}_n(x_e) \propto \Psi_n(x_e)\Psi_n(x_s). \quad (2.4)$$

Zwischen den Sender- und Empfängerpositionen gilt Reziprozität. Sender und Empfänger können also unter gewissen Bedingungen vertauscht werden. Unterschiedliche Richtcharakteristiken von Sender und Empfänger beschränken die Gültigkeit der Reziprozität. Durch die Phasenverschiebung der Feldgrößen im modalen Schallfeld ist vor allem das Nahfeld der Quelle wirksam. Es kann sich kaum ein Fernfeld ausbilden, denn dafür müssten  $p$  und  $v$  gleichphasig sein. Im Realfall hat die Schallschnelle meist eine Teilkomponente in Richtung des komplexen Schalldruckzeigers, deshalb gibt es einen entsprechenden Fernfeldanteil.

### 2.3.1.2. Einfluss von Dämpfung

Erweitert man das Szenario nun auf eine **frequenzabhängig absorbierende Randbedingung**, so wird die Ausbreitungsbedingung komplizierter. Die Absorption führt zu einer Dämpfung der Resonanzen, die dadurch im Frequenzbereich breiter werden, also nunmehr ein bestimmtes Frequenzband für eine erkennbare Wellenausbreitung zulassen. Die Halbwertsbreite  $\delta_n$  der Resonanzkurve einer Mode steht mit dem Absorptionsgrad nach Gl. 2.5 in Zusammenhang.

$$\begin{aligned} \delta_n &= -\frac{c}{2L} \ln \sqrt{1 - \alpha(\omega_n)} \\ &= -\frac{c}{2L} \ln |R(\omega_n)| \end{aligned} \quad (2.5)$$

Die frequenzabhängige Resonanzkurve  $\Lambda_n$  der Mode  $n$  wird mit  $\omega_n = 2\pi f_n$  zu

$$\Lambda_n = \frac{1}{\omega^2 - \omega_n^2 - j2\omega\delta_n}. \quad (2.6)$$

Je höher die Dämpfung bzw. Absorption, desto glatter wird der Frequenzgang der Resonanzkurven und die Schallwellen können sich zunehmend frei ausbreiten. Bei Dämpfungen, die der Bedingung  $\delta_n \ll \omega_n$  nicht mehr genügen, wird die Kreiswellenzahl mit

$$k_n = \frac{\omega_n}{c} + j\frac{\delta_n}{c} \quad (2.7)$$

zunehmend komplex. Und die in Gl. 2.6 und Gl. 2.3 dargestellten Modelle sind nicht mehr gültig. Die Eigenfunktion wird zu einer komplexen Größe und die überlappenden Resonanzkurven führen zur gleichzeitigen Anregung mehrerer Moden. Außerdem ist die Absorption nicht nur diskret bei jeder Eigenfrequenz gegeben, sondern allgemein frequenzabhängig. Bei hoher Absorption wird die Beschreibung des Schallfeldes mit den sog. modalen Parametern  $f_n$ ,  $\delta_n$  und  $\Psi_n$  unmöglich.

Die Dämpfung wird oft in Prozent angegeben und kann durch folgende Zusammenhänge umgerechnet werden: Mit der Dämpfung  $[D] = \%$  ist der Verlustfaktor

$$d_n = D_n/100 \% \quad (2.8)$$



und

$$d_n = \frac{1}{Q_n} = \frac{\delta_n}{f_n} \quad , \quad (2.9)$$

$Q_n$  ist der Gütefaktor.

### 2.3.2. Analytische Lösung für Raummoden im Rechteckraum

Die Gesetzmäßigkeiten im eindimensionalen Schallfeld lassen sich auf den Rechteckraum wegen der linearen Unabhängigkeit der Wandnormalen auf jede einzelne Koordinate übertragen. Die Benennung der Moden erfolgt hier oft über die Anzahl der Knotenebenen entlang jeder Koordinate. Mit dem Ordnungsvektor

$$\vec{n} = (n_x \ n_y \ n_z)^T \quad (2.10)$$

und einem Ortsvektor

$$\vec{r} = (r_x \ r_y \ r_z)^T \quad (2.11)$$

gilt für die Eigenfunktion des Rechteckraumes

$$\Psi_{\vec{n}}(\vec{r}) = \cos\left(\frac{n_x \pi r_x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n_y \pi r_y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{n_z \pi r_z}{L_z}\right) . \quad (2.12)$$

Die Eigenfrequenzen ergeben sich aus dem Betrag des Frequenzvektors mit

$$f_{\vec{n}} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} . \quad (2.13)$$

Die Richtung des Frequenzvektors gibt die Ausbreitungsrichtung der Welle an (Vgl. [LSW09, S. 217]). Dabei ergeben sich drei Modentypen. Axiale Moden haben ausschließlich Knotenebenen entlang einer Raumkoordinate, der Frequenzvektor verläuft entlang einer Achse. Tangentiale Moden haben Knotenebenen entlang zweier Koordinaten, es ist also ein Element des Ordnungsvektors gleich Null. Der Frequenzvektor verläuft in einer durch zwei Achsen aufgespannten Fläche. Schräge Moden haben Knotenebenen entlang jeder Raumkoordinate, der Frequenzvektor zeigt in den Raum.

### 2.3.3. Raummoden in Räumen beliebiger Geometrie und Übertragungsfunktion

Für Räume mit beliebiger Geometrie sind die Modenformen nicht mehr analytisch beschreibbar. Sie können entweder durch Nachmessen oder durch numerische Verfahren wie die FEM-Methode bestimmt werden. Die Knotenebenen sind gekrümmt und keiner Koordinate explizit zuweisbar. Die Nummerierung der Moden erfolgt mit der Ordnungszahl  $n$ , wobei die Nummerierung bei der tiefsten Eigenfrequenz beginnt und mit den Eigenfrequenzen steigt.

Die Übertragungsfunktion in einem berandeten Schallfeld lässt sich bis zu einer Frequenz, ab der die Dämpfung bzw. Modendichte zu hoch wird, durch die Summe der Moden mit

$$H(\omega, \vec{r}_s, \vec{r}_e) = \frac{p(\omega, \vec{r}_e)}{q(\omega, \vec{r}_s)} = \text{const.} \sum_n \frac{\Psi_n(\vec{r}_e) \Psi_n(\vec{r}_s)}{\omega^2 - \omega_n^2 - 2j\omega\delta_n} \quad (2.14)$$

beschreiben. Das bedeutet, dass die Resonanzkurve jeder Mode mit der Eigenfunktion am jeweiligen Punkt im Raum bewertet wird. Die Übertragungsfunktion hat die Dimension einer akustischen Impedanz  $[p/v] = \text{Pa s/m}^3$ . Es gilt auch hier  $\delta_n \ll \omega_n$ .

## 2.4. Fremdgeräuschquellen und qualitative Eigenschaften von Fremdgeräuschen in geschlossenen Räumen

Auf Fremdgeräusche und ihre Eigenschaften in Räumen wird in der Literatur nicht explizit eingegangen, es werden jedoch Quellmechanismen und der Einfluss von Schalldämpfung, Schalldämmung und Berandungen allgemein in Fachbüchern beschrieben. In [Cro07] und [Sch06] sind u. a. diese Themen im Hinblick auf Geräusche und Lärm zu finden.

Geräusch- und Lärmquellen gibt es viele, deshalb seien hier nur die wichtigsten erwähnt. In urbanen Gebieten wäre beispielsweise der Lärm von den Straßen, Zügen und Flugzeugen, sowie von der Industrie und von Baustellen zu nennen. Die Ausbreitungswege sind Körper- und Luftschall.

Der primäre **Luftschall** wird durch vibrierende Flächen der Lärm erzeugenden Objekte verursacht. Die spektralen Eigenschaften und Schalldruckpegel hängen zum einen von der Größe und Auslenkung der Fläche und zum anderen vom Anregungssignal und von den dynamischen Eigenschaften des Systems ab (Masse, Steifigkeit, Reibung). Der Frequenzgang des Luftschalls von abstrahlenden Flächen hat einen Hochpass- bzw. Bandpasscharakter. Bei tiefen Frequenzen ist er durch die Größe der Fläche begrenzt und zu hohen Frequenzen kann der Frequenzgang je nach Quellmechanismus durch Trägheits-, Reibungs- und Rückstellkräfte begrenzt sein.

Die Entfernung von Quelle und Senke über die Luft hat insofern Einfluss, dass der Luftschall durch Ausbreitungsdämpfung zu hohen Frequenzen stärker abgeschwächt wird und die Intensität wegen Vergrößerung der Wellenfläche abnimmt.

Der **Körperschall** wird vor allem über das Erdreich und über Schallbrücken in Gebäuden übertragen. Die Anregung hängt von den dynamischen Eigenschaften der Quellankopplung an die Struktur und von den gegenübergestellten Massen ab. Es entstehen gekoppelte dynamische Schwingssysteme die in [Vei05] als „Tonpilz“ bezeichnet werden. Der weitergeleitete Körperschall kann von größeren Flächen wiederum in die Luft abgestrahlt werden.

Durch die Tiefpassprozesse während des *Ausbreitungsvorgangs* werden tiefe Frequenzen besonders gut weitergeleitet, denn prinzipiell nimmt die zur Schnelle proportionale Reibungskraft zu tiefen Frequenzen hin ab. Und die Trägheitskraft der Masse nimmt proportional zur Beschleunigung ab, welche proportional zu  $\omega^2$  ist. Die tieffrequenten Anteile können also auch schwere Mauern in Schwingungen versetzen.

Gelangen nun die Geräusche über die beschriebenen Wege in ein berandetes Schallfeld und treten sie dort in Form von Luftschall auf, so wird das Schallfeld mit seinen Systemeigenschaften angeregt. Deshalb müsste der Anteil des Schalls, der im Raum reflektiert wird, der modalen Struktur folgen. Das ist gleichbedeutend mit einer ortsabhängigen Filterung des Eingangssignals mit der dortigen Raumimpulsantwort.

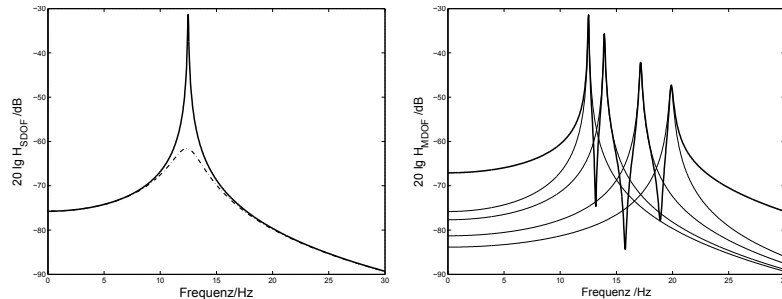
Die Schalldruckpegel von Stör- oder Fremdgeräuschen werden oft als A-bewertete Pegel angegeben. In der vorliegenden Arbeit werden unbewertete Schalldruckpegel verwendet, da die Information bei sehr tiefen Frequenzen liegt, die durch eine A-Bewertung fast vollständig entfernt würden.

## 2.5. Hintergrund der experimentellen Modalanalyse

Die experimentelle Modalanalyse ist ein Verfahren zur Parametrisierung resonanzfähiger Systeme. Sie findet im Bereich des Körperschalls häufig Anwendung. Deshalb werden ihr in der Literatur mechanische Modelle zu Grunde gelegt, auf die hier nur kurz eingegangen werden soll. Die „Theorie und Praxis“

des Verfahrens wird in [Ewi88] und [Nat92] ausführlich beschrieben. Einzelne Kapitel werden z. B. in [Mös10, S. 499 ff.] und [Ros07, S. 1127 ff.] dem Thema Modalanalyse gewidmet.

### 2.5.1. Mechanische Modelle der Modalanalyse



**Abb. 2.3.:** Prinzipieller Verlauf des Betragsfrequenzganges eines Single-Degree-Of-Freedom Systems (links) und eines Multiple-Degree-Of-Freedom Systems (rechts).

Das elementare mechanische Modell ist das sog. Single-Degree-Of-Freedom (SDOF) System. Es handelt sich um das einfache Masse-Feder-System mit Dämpfung. Dessen Parameter sind die Resonanzfrequenz  $\omega_r = \sqrt{k/m}$ , die Dämpfung  $D$  und die Auslenkung als Skalar der Eigenfunktion. Die Theorie der Modalanalyse geht davon aus, dass sich die Resonanzkurven dynamischer Systeme aus einer Summe von SDOF-Systemen mit unterschiedlichen Parametern zusammensetzen, was in Gl. 2.14 im Prinzip die Summe des Nennerterms zeigt. Dieses Modell wird als Multiple-Degree-Of-Freedom (MDOF) System bezeichnet. Meistens sind dies räumlich ausgedehnte Systeme, in denen sich Wellen ausbreiten und dadurch mehrere Resonanzen ausbilden können. Deshalb sind mehrere Freiheitsgrade (DOFs) zur ausreichend genauen Modellierung nötig. Außerdem gibt es je nach gemessener Feldgröße für jeden diskreten Punkt auf der Struktur mehrere Freiheitsgrade. Im Bereich Körperschall sind das für translatorische und rotatorische Bewegungen aller Raumkoordinaten über sechs Freiheitsgrade.

### 2.5.2. Anwendung auf berandete Luftschallfelder

Im Bereich Luftschall ist die experimentelle Modalanalyse seltener zu finden. In [Ros07, S. 1136 ff.] wird sie in einem kleinen Abschnitt in Bezug auf Luftschallfelder behandelt und in [Bor91] wird über die „Modalanalyse von Schallfeldern“ berichtet. Ein Grund für die seltene Anwendung des Verfahrens in Räumen ist, dass die Modendichte bei den meisten interessierenden Frequenzen so hoch ist, dass das Verfahren nicht angewendet werden kann. Ebenso hat die Dämpfung Einfluss auf die Anwendbarkeit. In der Raumakustik werden u. a. aus diesen Gründen statistische Verfahren angewendet, auf die hier jedoch nicht eingegangen werden soll (siehe [Kut09]). Erst bei tieferen Frequenzen sind die Moden weit genug voneinander entfernt, sodass eine modale Beschreibung des Schallfeldes möglich ist. Wie tief die Frequenzen sein müssen hängt u. a. vom Raumvolumen ab. Die theoretischen Hintergründe zu modalen Schallfeldern wurden in Abschnitt 2.3 erläutert. Dank der mechanisch-akustischen Analogien und der Tatsache, dass berandete Schallfelder räumlich ausgedehnte Resonanzsysteme sind, kann das Verfahren auch auf Luftschallfelder angewendet werden. Der Unterschied ist, dass es sich bei den Schallfeldgrößen um den skalaren Schalldruck und um die gerichtete Schallschnelle handelt. Dadurch vereinfachen sich die Freiheitsgrade. Für den Schalldruck eines Messpunktes gibt es nur noch einen skalaren Freiheitsgrad, für die Schallschnelle sind es drei Freiheitsgrade. Die Anregung des Schallfeldes erfolgt durch eine möglichst omnidirektionale Schallquelle, die einen Schallfluss  $q$  in das Schallfeld einbringt.

### 2.5.3. Messung der raumakustischen Übertragungsfunktionen

Für die Modalanalyse müssten theoretisch Übertragungsfunktionen der Form  $H(j\omega) = p(\omega)/q(\omega)$  gemessen werden. Die Messung des Schalldrucks ist problemlos realisierbar, nur die Messung des tatsächlichen Schallflusses wäre kompliziert. Stattdessen wird das elektrische Eingangssignal der Quelle als eine annähernd proportionale Größe verwendet. Im Bereich der Grenzfrequenzen und Resonanzen der Quelle wird das elektrische Eingangssignal wahrscheinlich nicht proportional zum Schallfluss sein. So gilt dies auch für das Mikrofon, wobei die Empfindlichkeit guter Messmikrofone gerade bei tiefen Frequenzen sehr glatt über der Frequenz verläuft.

Die Bestimmung der Übertragungsfunktionen geschieht über das Verhältnis geschätzter Leistungsdichtespektren der elektrischen Signale. In dieser Arbeit wird der  $H_1$ -Schätzer verwendet, der für Systeme mit Rauscheinwirkung am Ausgang geeignet ist:

$$\hat{H}_1 = \frac{\hat{S}_{xy}}{\hat{S}_{xx}} \quad (2.15)$$

Die Berechnung der Übertragungsfunktion wird beispielsweise von einem FFT-Analysator übernommen. Die genaue Implementierung der Leistungsdichte-Schätzung im FFT-Analysator, der für diese Arbeit verwendet wurde, ist unbekannt. Im Anhang B.2 befindet sich jedoch ein Beispiel für ein Schätzverfahren. Zur Beurteilung der Vertrauenswürdigkeit einer Übertragungsfunktion wird die Kohärenz als ein Maß für die lineare Abhängigkeit zwischen Ein- und Ausgang des Systems verwendet. Die Kohärenz berechnet sich durch

$$\gamma^2 = \frac{H_1}{H_2} \quad (2.16)$$

mit

$$\hat{H}_2 = \frac{\hat{S}_{yy}}{\hat{S}_{xy}^*} . \quad (2.17)$$

Die Kohärenz kann Werte zwischen Null (kein linearer Zusammenhang) und Eins (linear abhängig) annehmen.

### 2.5.4. Modales Modell durch Parametrisierung der Übertragungsfunktionen

Aus den gemessenen Übertragungsfunktionen sollen die modalen Parameter Frequenz, Dämpfung und Schwingungsform ermittelt werden. Die Parametrisierung kann mit den Eigenfunktionen  $\Psi_{s,n}$  und  $\Psi_{n,e}$  der Sender- und Empfängerpositionen und den Resonanzkurven  $\Lambda_n(\omega)$  jeder Mode  $n$  wie folgt beschrieben werden:

$$[\mathbf{H}_{se}(\omega)] = \Psi_{s,n}[\Lambda_n(\omega)]\Psi_{n,e} \quad (2.18)$$

Die Sender-Eigenfunktion einer Mode verläuft entlang der Zeilenelemente von  $\Psi_{s,n}$ , die Empfänger-Eigenfunktion einer Mode entlang der Spaltenelemente von  $\Psi_{n,e}$ . Dabei nimmt  $[\Lambda_n(\omega)]$  folgende Form an:

$$[\Lambda_n(\omega)] = \begin{pmatrix} (\omega^2 - \omega_1^2 - 2j\omega\delta_1)^{-1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & (\omega^2 - \omega_n^2 - 2j\omega\delta_n)^{-1} \end{pmatrix}$$

(2.19)

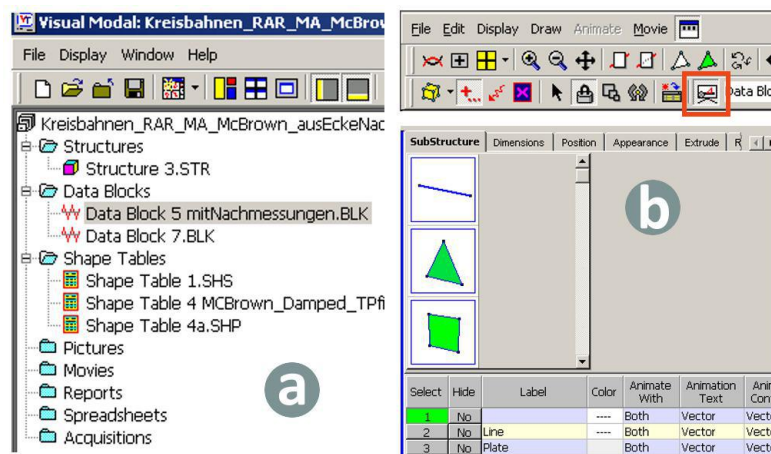
Die Parametrisierung erfolgt im Modalanalyseprogramm durch sog. Curvefitting-Verfahren. Dabei werden den gemessenen Übertragungsfunktionen Kurven mit Modellen verschiedener Curvefitting-Verfahren angepasst. In der vorliegenden Arbeit wird das „Polynomial“-Verfahren in ME’scope angewendet.

Für die Parameter Frequenz und Dämpfung werden in dieser Arbeit „globale“ Curvefits für alle Übertragungsfunktionen durchgeführt, da sie für das Resonanzsystem überall gleich sein müssen. Die Schwingungsformen sind dagegen vom einzelnen Messpunkt abhängig.

## 2.6. Arbeitsschritte zur Durchführung einer Modalanalyse in der Software ME’scope VES

Bei der praktischen Durchführung einer experimentellen Modalanalyse bedarf es neben der Messung von Übertragungsfunktionen mehrerer Arbeitsschritte zur modalen Parametrisierung in einer geeigneten Modalanalysesoftware. In der vorliegenden Arbeit wurde die Modalanalysesoftware ME’scope verwendet. In ME’scope besteht ein Projekt aus einer Hauptdatei mit der Dateierendung \*.prj und aus mehreren Unterdateien, die Messdaten, Strukturmodelle, Ergebnisse der Modalanalyse oder andere Informationen enthalten. Als Beispiel ist ein Ausschnitt des Projektfensters in Abbildung 2.4 (a) zu sehen.

Eine empfehlenswerte Vorgehensweise zur Erstellung eines Projektes ist, ein dem Messvorgang entsprechendes Strukturmodell zu erstellen (Kapitel 2.6.1), anschließend die gemessenen Daten zu importieren (Kapitel 2.6.2) und schlussendlich die Parametrisierung durch das entsprechende Curvefitting-Verfahren durchzuführen, worauf in Kapitel 2.6.3 eingegangen wird.



**Abb. 2.4.:** Ausschnitte aus der grafischen Oberfläche von ME’scope. (a) Projektfenster mit eingebundenen Files. (b) Drawing Assistant im Structure-Fenster. Oben die Bedienleiste mit dem markierten Button für den Drawing Assistant.

### 2.6.1. Erstellung von Strukturmodellen

Das räumliche Modell beinhaltet Informationen über die Position der Messpunkte, eventuelle Verbindungslinien und aufgespannte Flächen. In ME’scope werden die Strukturmodelle **Structure** genannt,

das zugehörige binäre Dateiformat hat die Endung \*.str. Erstellte werden Structures entweder direkt in ME'scope mit dem sog. **Drawing Assistant** oder als **formatierte Tabelle** (Spreadsheet) mit der Endung \*.sts.

Allgemein wird jeder erstellte diskrete Punkt als DOF bezeichnet (Degree Of Freedom) und bekommt sein eindeutiges Label mit Nummer und die Angabe, in welche Richtung sich der Freiheitsgrad bewegt. In Luftschallfeldern wird meistens der skalare Schalldruck gemessen, also sollte in diesem Fall auch die Veränderung des Schalldrucks in der Structure-Animation später sichtbar werden. Da die Darstellung der Schwingungsformen in ME'scope auf Festkörperschwingungen optimiert ist, gibt es entweder die Möglichkeit *bewegte DOFs* oder *Pfeile* darzustellen. Falls Flächen mit definiert wurden, gibt es auch eine Farbdarstellung, die sich für diese Arbeit jedoch nicht bewährt hat. Als Kompromiss sollte eine Bewegungsrichtung festgelegt werden, die möglichst orthogonal zum Strukturverlauf ist. Bei der späteren Darstellung können die erwähnten Darstellungsoptionen frei gewählt werden.

Die **Nummerierung der Messpunkte** sollte so einfach wie möglich und logisch erfolgen, da sie sich durch alle Arbeitsschritte zieht. Es sollte zuerst überlegt werden, in welcher Reihenfolge die Punkte gemessen werden, sodass eine automatische fortlaufende Nummerierung der Messdaten während des Messens vorgenommen werden kann. Gleichzeitig sollte sie der Nummerierung im Strukturmodell entsprechen.

### 2.6.1.1. Erstellung der Strukturmodelle mit dem Drawing Assistant

Der Drawing Assistant bietet eine Auswahl an Linien, Flächen und einfachen Polyedern. Aus den gegebenen Grundgeometrien lassen sich komplexere Strukturmodelle mit den entsprechenden Abmessungen und der gewünschten Messpunktanzahl zusammensetzen. Mit Aufruf des Assistenten wird ein Dialog geöffnet, bei dem selbsterklärende Reiter in fortlaufender Reihenfolge bearbeitet werden können (Abbildung 2.4 (b)). Wichtig ist hier wiederum die Nummerierung, die bei einigen Geometrien automatisch vorgenommen werden kann. Ansonsten gibt es die Möglichkeit über Draw>Number Points die Punkte per Mausklick sukzessiv zu nummerieren.

### 2.6.1.2. Erstellung der Strukturmodelle als formatierte Tabelle

Werden spezielle Strukturmodelle benötigt, so können Koordinaten und Merkmale der DOFs in einer formatierten Tabelle gespeichert werden. Die Struktur der formatierten Tabelle ist im Matlab-Skript `writeMEscopeStructure.m` implementiert und befindet sich in Kapitel D.2.1. Das erstellte \*.sts-File wird anschließend in ME'scope importiert und kann mit dem Drawing Assistant auch weiter bearbeitet werden. Für Kreisflächen mit annähernd äquidistanten Messpunkten findet sich eine Matlab-Implementierung unter Kapitel D.2.1.

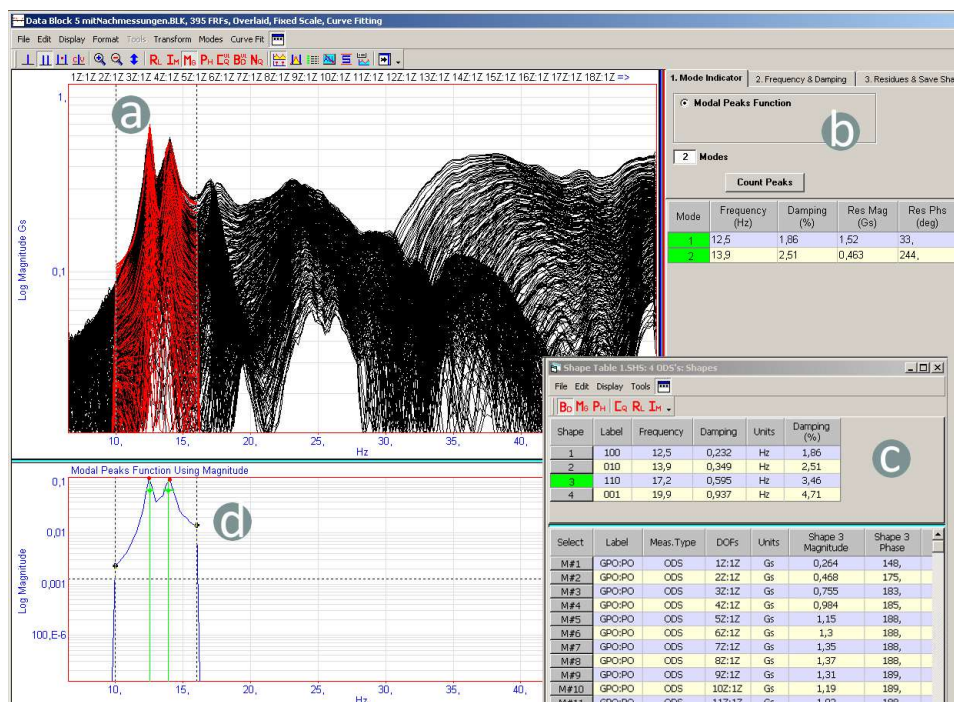
## 2.6.2. Import der Messdaten und deren Zuweisung

Messdaten können für jeden DOF einzeln oder auch als formatierte Tabelle mit Labels für die Zuordnung zu den entsprechenden DOFs über die Importoption importiert werden. Für Projekte mit vielen Messpunkten empfiehlt sich die Erstellung einer formatierten Tabelle (\*.bls), in der für jeden DOF Betrag und Phase spaltenweise hinterlegt sind. Wenn die Dateien bei der Messung korrekt benannt wurden, kann die Konvertierung automatisiert und fehlerfrei durchgeführt werden. Entsprechende Matlab-Funktionen sind in Kapitel D.2.2 zu finden.

## 2.6.3. Curvefitting für MDOF-Systeme mit dem Polynomial-Verfahren

Das Curvefitting hat für die Parametrisierung der Übertragungsfunktionen zentrale Bedeutung. In ME'scope gibt es Verfahren, die im Zeit- oder im Bildbereich arbeiten. In diesem Fall sind die Bildbereichsverfahren interessant. Sie teilen sich in zwei Gruppen auf: Für SDOF-Systeme und für Systeme, deren Resonanzen weit auseinander liegen, eignen sich das „CoQuad“- und das „Peak“-Fitting. Das für die vorliegende Arbeit verwendete „**Polynomial**“-Verfahren eignet sich vor allem für Übertragungsfunktionen mit überlappenden Moden und generell für MDOF-Systeme (mehrere Übertragungsfunktionen). Mit dem Frequenzband-Cursor wird der Frequenzbereich, in dem das Fitting durchgeführt werden soll, ausgewählt. Daraufhin werden nach Zählen der Resonanzen die modalen Parameter Frequenz und Dämpfung ermittelt. Die Dämpfungen werden nicht von allen Fitting-Verfahren berücksichtigt. Danach werden die Residuen ermittelt und die Schwingungsformen bestimmt. Wichtig ist, dass ein globaler Fit über alle Übertragungsfunktionen durchgeführt wird.

Die Ergebnisse sollten in den gewünschten Toleranzen reproduzierbar sein. Durch mehrmaliges Fitten der gleichen Mode mit etwas verändertem Frequenzband und durch Betrachten der Schwingungsformen kann die Reproduzierbarkeit und die Vertrauenswürdigkeit der Ergebnisse überprüft werden. In den Schwingungsformen zeigt sich die Qualität der Messungen, da hier Abweichungen in der Phase sofort sichtbar werden.



**Abb. 2.5.:** Ausschnitte aus der grafischen Oberfläche von ME'scope. (a) Fenster, in dem der zu fittende Frequenzbereich in den Übertragungsfunktionen gewählt wird. (b) Die Reiter für das Curvefitting. (c) Die gefitteten Moden werden in „Shapetables“ abgespeichert. (d) Eigenwertfunktion, die durch die ermittelten modalen Parameter Frequenz und Dämpfung erstellt wurde.

## 2.6.4. Export der modalen Parameter

Die modalen Parameter werden in \*.shp-Files gespeichert. Alternativ können auch Shapetables mit der Endung \*.shs erstellt werden. Mit der Matlabfunktion `readSHS()` können die Parameter in Matlab geladen und dort verwendet werden. In den Files gibt es für jede Mode nur eine Eigenfunktion, sie ist also

schon das Produkt aus den Werten der Sender- und Empfängerposition:

$$\Psi_{n,ME'scope} = \Psi_{s,n} \Psi_{n,e} \quad (2.20)$$

Die Eigenfunktionen aus ME'scope werden als komplexe Zahl in Betrag und Phase ausgegeben.



## 3. Experimentelle Modalanalyse des reflexionsarmen Raumes für tiefe Frequenzen

Um das Übertragungsverhalten des bei tiefen Frequenzen vorliegenden Schallfelds im reflexionsarmen Raum zu erfassen und dessen modale Parameter zu ermitteln, wurde eine experimentelle Modalanalyse durchgeführt. Dabei wurde ein messtechnisch interessantes Gebiet für die Empfängerpositionen mit zwei unterschiedlichen Senderpositionen außerhalb dieses Gebiets betrachtet. Für die weitestgehende Automatisierung der Übertragungsfunktions-Messungen wurde ein Messaufbau entwickelt, der in Kapitel 3.1 näher erläutert wird. Über den Ablauf der Messungen mit unterschiedlichen Sendern und Positionen wird in Kapitel 3.2 berichtet. Anschließend werden die Ergebnisse aus der Modalanalyse der ortsabhängigen Übertragungsfunktionen in Kapitel 3.3 dargestellt. Ein Vergleich zwischen Raumabmessungen und Wellenlängen der gefundenen Resonanzfrequenzen wird im Hinblick auf das Ausbreitungsverhalten in den Absorberkeilen in Kapitel 3.4 aufgeführt. In Kapitel 3.5 werden die Inhalte und Ergebnisse zusammengefasst.

### 3.1. Messaufbau zur Messung von Übertragungsfunktionen auf einer Kreisfläche

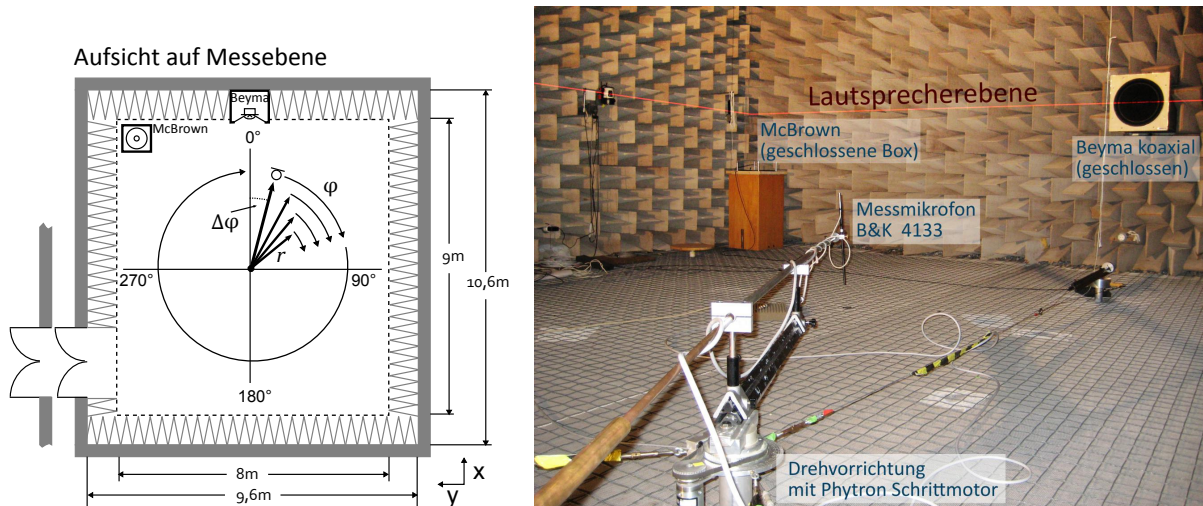
Für den Messaufbau sind neben der Wahl des Equipments (Kapitel 3.1.1) geeignete und interessierende Empfängerpositionen festzulegen, diese exakt in ein Strukturmodell zu übertragen und verwendbare Positionierungsdaten für eine Automation zu erzeugen. Auf die Lösung dieses Problems wird in Kapitel 3.1.2 eingegangen. Über die Verschaltung und Einstellungen der Messgeräte wird in den Kapiteln 3.1.3 und 3.1.4 berichtet. Das Messprogramm zur Steuerung des Messaufbaus wird in Kapitel 3.1.5 beschrieben.

#### 3.1.1. Verwendetes Equipment

Alle Messungen wurden mit einem einzigen Mikrofon durchgeführt (B&K 4133), dadurch waren Kalibrierung und etwaige Phasenkorrekturen nicht nötig. Zur Messung der Übertragungsfunktionen wurde außerdem ein Vierkanal-FFT-Analysator von Ono Sokki, ein Messverstärker von B&K, ein Endverstärker von NAD, ein Filter von Stanford Research Systems, ein PC mit GPIB-Schnittstelle und ein Schrittmotor mit Ansteuerung von Phytron eingesetzt. Als Lautsprecher kamen ein koaxialer Lautsprecher von Beyma, der fest in einer geschlossenen Box im Raum eingebaut war, (**Sender 1**) und ein Tieftonlautsprecher von McBrown, ebenso in einer geschlossenen, aber portablen Lautsprecherbox (**Sender 2**) zum Einsatz. Ein weiterer Lautsprecher von Beyma in einem Bassreflexgehäuse sollte verwendet werden, aber dieser wurde den Anforderungen nicht gerecht. Die Sender waren von den Abmessungen her klein gegenüber den interessierenden Wellenlängen, sodass von Kugelschallquellen ausgegangen werden kann. Die genauen Angaben über die verwendeten Geräte befinden sich in Tabelle A.1.

### 3.1.2. Strukturmodell und resultierender Aufbau im reflexionsarmen Raum

Die Empfängerpositionen sollten sich in einem Gebiet befinden, das neben der Messung im tieffrequenten modalen Feld gleichzeitig eine normgerechte Messung im Freifeld für  $f \geq 95$  Hz erlaubt. Dafür müsste das Mikrofon mehr als eine viertel Wellenlänge von den Keilen entfernt und meistens im Fernfeld der Quelle sein. Dies ist natürlich nur bei höheren Frequenzen möglich. Wesentlich ist aber, dass nicht in der Nähe der Quellen und der Berandungen gemessen werden muss. Aus diesen Gründen und wegen des Ziels, die Messungen effektiv zu automatisieren, ergab sich eine Mikrofonpositionierung mit einem 2.7 m langen Schwenkarm, der durch einen präzisen Schrittmotor im Azimut rotiert wurde. Der Rotationsmittelpunkt befand sich annähernd im Raumzentrum. Durch Veränderung des Radius konnte die gesamte Kreisfläche abgedeckt werden.



**Abb. 3.1.:** **Links:** Aufsicht auf das Koordinatensystem zur Messung von Übertragungsfunktionen auf Kreisbahnen. **Rechts:** Foto des Messaufbaus im reflexionsarmen Raum. Im Vordergrund ist der Schrittmotor und der daran angebrachte Schwenkarm zu sehen. Das Mikrofon ist an einem am Schwenkarm befestigten Stab montiert und kann im Radius manuell verschoben werden. Im Hintergrund sind die unterschiedlichen Lautsprecher und deren Position sichtbar. Die „Lautsprecherebene“ ist auf der Höhe des Beyma-Lautsprechers eingezeichnet und wird in der Arbeit als Bezugspunkt zur vertikalen Positionierung mit Hilfe eines Lasers verwendet.

Um eine ausreichend genaue Abtastung des Schallfelds für den gewünschten Frequenzbereich zu erhalten, sollten über die kürzeste Wellenlänge mindesten sechs gleichmäßig verteilte Messpunkte liegen:

$$d \leq \lambda_{\min}/6. \quad (3.1)$$

Für die Messpunktverteilung auf Kreisbahnen kann das Problem wie folgt gelöst werden: Angenommen die maximale interessierende Frequenz sei  $f_{\max} = 200$  Hz, so gilt

$$\lambda_{\min} = c/f_{\max} \quad (3.2)$$

und daraus folgt für  $c = 343$  m/s, dass

$$d \leq 0.28 \text{ m.}$$

Neben den gleichen Abständen der Radien ( $\Delta r = d$ ) ist es wünschenswert, dass die Messpunkte auf der Kreisbahn immer den gleichen Abstand voneinander haben. Also müssen die Winkelinkremente

mit zunehmendem Radius kleiner werden und ein ganzzahliger Teiler von  $2\pi$  sein. Das vom Radius abhängige Winkelinkrement in Radian lässt sich demnach durch

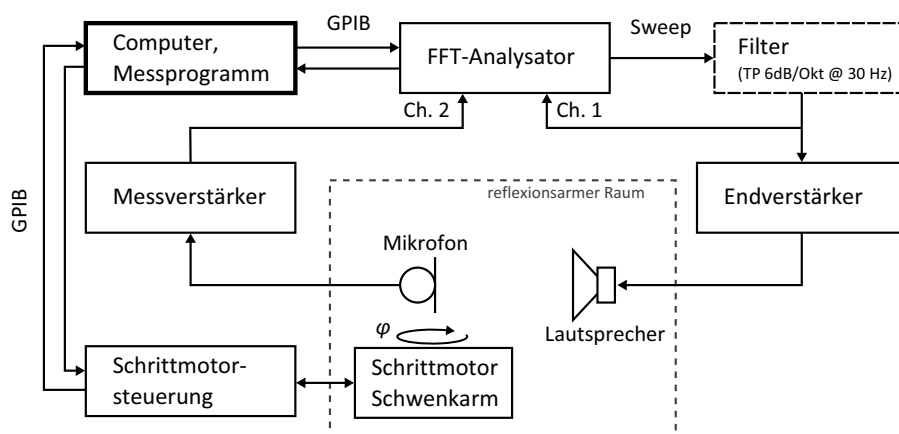
$$\Delta\varphi = 2\pi / [2\pi r / d + 0.5] \quad (3.3)$$

berechnen.

In den Messungen der vorliegenden Arbeit wurde eine Abtaststruktur mit  $d = 0.25\text{ m}$  und  $r = (0.15\text{ m} + kd)$  für  $k = 0 \dots 10$  gewählt. Daraus ergaben sich die in Tabelle A.2 dargestellten Radien, Winkelinkremente und Messpunktanzahlen je Kreisbahn. Diese Tabelle wurde im Messprogramm zur Automatisierung, das in Kapitel 3.1.5 beschrieben wird, verwendet. Die Herleitungen zur Lösung des Problems der Messpunkte mit annähernd gleichen Abständen befindet sich in Kapitel B.1. Die Implementierung in Matlab, die zur Berechnung der Mikrofonpositionen erstellt und verwendet wurde, befindet sich in D.2.1 und enthält die ursprüngliche, etwas umständlichere Lösung über den Kosinussatz, die jedoch fast immer zu den gleichen Ergebnissen führt wie Gl. 3.3.

### 3.1.3. Verschaltung der Messgeräte

Zur Ansteuerung des FFT-Analysators, des Messverstärkers und der Schrittmotoransteuerung wurden diese an einen Computer mit eingebauter GPIB-Karte angeschlossen. Die Steuerung erfolgte mit dem in Kapitel 3.1.5 beschriebenen Messprogramm. Die Schrittmotoransteuerung war mit dem Schrittmotor verbunden. Die Messschleife der Übertragungsfunktion verlief bei den Messungen mit **Sender 1** vom Signalausgang des FFT-Analysators durch den Endverstärker zum Lautsprecher im reflexionsarmen Raum. Der Signalausgang wurde gleichzeitig auf Kanal eins des Analysators abgezweigt, da Kanal eins das Bezugssignal für die Übertragungsfunktion liefert. Bei Messungen mit **Sender 2** wurde ein Tiefpassfilter direkt hinter den Signalausgang des FFT-Analysators eingeschleift, da der McBrown-Lautsprecher sonst zu wenig Schall abstrahlte und die Kohärenz nicht akzeptabel war. Um die Tiefpassfilterung zu kompensieren wurde auf das gefilterte Signal bezogen. Außerdem wurde die Ausgangsamplitude des FFT-Analysators erhöht. Das Mikrofon signal wurde durch den Messverstärker verstärkt. Der AC Output des Messverstärkers war mit dem zweiten Kanal des FFT-Analysators verbunden.



**Abb. 3.2.:** Blockschaltbild des Messaufbaus zur Messung von Übertragungsfunktionen auf Kreisbahnen im reflexionsarmen Raum. Das Tiefpassfilter wurde ausschließlich bei Messungen mit Sender 2 verwendet, bei allen anderen Messungen wurde es aus der Messkette entfernt und die entstehende Lücke geschlossen.

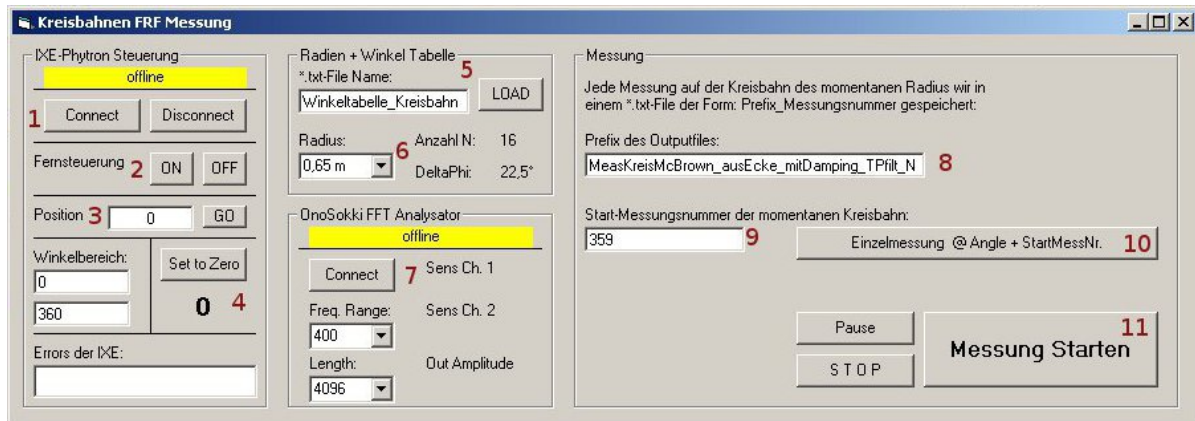
### 3.1.4. Einstellungen der Messgeräte

Der **FFT-Analysator** war so eingestellt, dass als Ausgang lineare Sinussweeps erzeugt wurden. Mit Sinussweeps konnten bessere Ergebnisse als mit periodischem Rauschen erzielt werden, da sich die Ausgangsamplitude erhöhen ließ und Fremdgeräusche weniger Einfluss hatten. Der Frequenzbereich wurde auf 0 Hz bis 400 Hz beschränkt, sodass sich mit einem im FFT-Analysator implementierten Samplingfaktor von 2.56 eine Samplingfrequenz von  $f_s = 1024$  Hz einstellte. Die FFT-Länge wurde auf 4096 Samples festgelegt. Damit ergab sich eine Frequenzauflösung von  $\Delta f = 0.25$  Hz. Es wurde eine so hohe Auflösung gewählt, um die Übertragungsfunktionen des Raumes im unteren Frequenzbereich möglichst genau zu messen. Durch die Messung mit deterministischen Anregungssignalen konnte ein Rechteckfenster verwendet und der FFT-Analysator so eingestellt werden, dass keine Leakage auftrat. Leakage tritt beispielsweise auf, wenn ein Sinussignal mit einem Rechteckfenster nicht an den Nulldurchgängen gefenstert wird. Für jeden einzelnen Messpunkt wurde über zehn mit dem  $H_1$ -Schätzer berechnete Übertragungsfunktionen gemittelt. Der  $H_1$ -Schätzer wurde gewählt, da am Ausgang Störgeräusche (z. B. Fremdgeräusche im Raum), aber am Eingang fast keine zu erwarten waren. Die Ausgangsamplitude und die Sensitivität der Kanäle wurden im FFT-Analysator so eingestellt, dass ein möglichst hoher Signal-Rauschabstand erreicht, aber kein Clipping am Eingang und keine schädlichen Verzerrungen beim Lautsprecher verursacht wurden. Die Einstellungen waren hier abhängig vom Sender, hatten aber letztendlich keinen direkten Einfluss auf die Übertragungsfunktion, da der Ein- und Ausgang nach Gl. 2.15 ins Verhältnis gesetzt wurden. Direkten Einfluss hatten hauptsächlich Änderungen innerhalb der Übertragungsfunktionsschleife, wie beispielsweise der Lautsprecher, das Mikrofon und natürlich dessen Position. Der **Messverstärker** wurde für alle Messungen gleich eingestellt. Der Input-Section-Gain betrug 40 dB, der Output-Section-Gain wurde auf 0 dB gesetzt. Das Hochpassfilter wurde ausgeschaltet, da unter 22.4 Hz gemessen werden musste. Das Tiefpassfilter bei 22.4 kHz blieb aktiviert, da es keinen wesentlichen Einfluss hatte. Der Preamp-Input-Stecker wurde auf „Measure“ gestellt. Die restlichen Einstellungen wurden nicht verwendet und blieben bei jeder Messung gleich. Der **Endverstärker** besaß keine Einstellungsmöglichkeiten und wurde lediglich eingeschaltet. Die **Schrittmotoransteuerung** wurde während den Messungen entsprechend den Mikrofonpositionen eingestellt.

### 3.1.5. Entwicklung eines Messprogramms in Visual Basic 6 zur Automatisierung

Die Kernaufgabe des Messprogramms ist die Ansteuerung des FFT-Analysators, des Messverstärkers, der Schrittmotorsteuerung und die Speicherung der Daten zur automatischen Messung von Übertragungsfunktionen. Das Programm soll dem Benutzer ermöglichen eine Tabelle zu laden, in der die Winkelinkremente, die Radien und die Anzahl der Messpunkte für jede Kreisbahn gespeichert sind. Das Programm verwendet diese Tabelle zur automatischen Positionierung des Mikrofons, indem es entsprechende Befehle an die Schrittmotorsteuerung sendet. Mit der Auswahl des momentan eingestellten Mikrofonradius durch den Benutzer und durch die momentane Schwenkarmposition erfolgte eine eindeutige Dateibenennung der zu speichernden Messdaten. Die Konvention zur Dateibenennung wurde hier auf einen fixen Dateinamen und eine darauf folgende Messpunktnummer (`prefix_n.txt`) festgelegt. Ein erzeugtes Messfile beim Messpunkt 302 hätte beispielsweise folgenden Namen: `MeasKreisfl_302.txt`. Um diese Aufgaben zu bewältigen, mussten die dabei verwendeten Geräte mit der GPIB-Schnittstelle verbunden, für die Messaufgabe eingestellt und angesteuert werden. Dazu wurden bereits vorhandene Bibliotheken verwendet. Die Kommunikation mit der GPIB-Karte erfolgte anhand der Bibliothek `Niglobal.bas`. Die Ansteuerung der IXE- $\alpha$  wurde mit der Klasse `clsIXEcontrol.cls` (von Christoph Kling, AG. 1.63, PTB) umgesetzt. Die Kommunikation mit dem FFT-Analysator erfolgte mit Funktionen aus der Bibliothek `GPTools.bas`, `OnoSokkiCF6400.bas` und mit eigens programmierten Zusatzfunktio-

nen zur Messung und Speicherung der Daten. An den Messverstärker wurde beim Verbinden ein zusammengesetzter String gesendet, der für alle Messungen gleich war. Die Events der Benutzeroberfläche und weitere Ausschnitte aus dem Quellcode sind in Kapitel D.1 aufgeführt.



**Abb. 3.3.:** Screenshot des Messprogramms "Kreisbahnen FRF". Die Benutzeroberfläche ist aufgeteilt in eine Sektion für die Schrittmotorsteuerung (1...4) und die Auswahl einer Winkeltabelle (5,6), die sich im Programmordner befinden muss. Außerdem ist die Sektion zur Einstellung des FFT-Analysators (7) und die Sektion zur Messung (8...11) zu sehen.

Die Funktionen der Bedienelemente lassen sich folgendermaßen beschreiben (Die Zahlen in Klammern korrespondieren mit den Zahlen in Abbildung 3.3):

IXE-Phyton Steuerung (1) Verbinden mit der GPIB-Schnittstelle. (2) Ein- und Ausschalten der Fernsteuerung zur manuellen Positionierung. (3) Winkel in Grad angeben und mit „GO“ auf diese Position drehen. (4) Die momentane Position als 0°-Position definieren.

Radien + Winkel Tabelle (5) Angabe des Dateinamens der Winkeltabelle, mit „LOAD“ werden die Daten aus der Winkeltabelle in das Programm geladen. (6) Auswahl des momentanen Radius des Mikrofons, daneben werden zugehörige Daten angezeigt (Anzahl der Messpunkte auf dieser Kreisbahn und Winkelinkrement, um das der Arm immer weiter gedreht wird).

Ono Sokki FFT-Analysator Durch (7) „Connecten“ werden alle Parameter des Analysators zur Messung von Übertragungsfunktionen gesetzt (Nfft, Frequenzbereich, In- und Out-Sensitivity, Anzahl der Mittelungen (engl. Averages) u. s. w. ). Es wurde ausschließlich der „Connect“-Button verwendet.

Messung (8) Angabe des fixen Dateinamens. Der Dateiname wird automatisch aus der ersten Zeile der Winkeltabelle geladen. (9) Zeigt die Start-Messpunktnummer der momentanen Kreisbahn an. Sie wird automatisch berechnet, kann aber für Spezialfälle geändert werden. (10) Falls einzelne Messungen unzureichend sind, können hier Einzelmessungen vorgenommen werden, indem der Schwenkarm positioniert und das Feld (9) auf die gewünschte Messpunktnummer gestellt wird. (11) Startet die gesamte Messung einer Kreisbahn (Positionierung, Messung, Speicherung ...).

### 3.2. Messablauf der Übertragungsfunktionsmessungen mit unterschiedlichen Quellpositionen

Der generelle Ablauf einer Messung war das Verbinden der Geräte mit dem Messprogramm und das Laden der Winkeltabelle. Nachdem die Anfangsposition und der Radius des Mikrofons eingestellt, der

Klang des Messsignals und die Aussteuerung der Kanäle untersucht waren, konnte nach Schließen des Raumes und kurzem Warten der Messdurchlauf gestartet werden. Die Spektren und die Kohärenz wurden am FFT-Analysator überprüft. Nach einem Messdurchlauf wurde der nächste Radius eingestellt und die Messung konnte von neuem gestartet werden. Die Messungen begannen beim ersten Winkelinkrement, sodass das Mikrofon am Ende der Messungen immer bei  $0^\circ$  Azimut angelangte. Die Messungen wurden mit drei unterschiedlichen Sendern an zwei Positionen durchgeführt. Dabei wurden auch unterschiedliche Mikrofonhöhen gewählt, die sich je nach Informationsbedarf für den jeweiligen Sender unterschieden. Es wurde ferner darauf geachtet, dass bei Messungen über mehrere Tage eine gleichbleibende Temperatur und Luftfeuchte herrschte. Die Absolutwerte sollten im Bereich von normativen Werten zur Kalibrierung liegen. Deshalb lag die Temperatur bei  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  und die relative Luftfeuchtigkeit bei  $50 \pm 5\%$ . Dadurch war gewährleistet, dass sich die Schallgeschwindigkeit in einem tolerierbaren Wertebereich befindet und somit Raumresonanzen bei der gleichen Frequenz bleiben. Der Luftdruck wurde nicht weiter berücksichtigt.

### 3.2.1. Messungen mit Sender 1 in der Mitte einer yz-Wand

Sender 1 ist im reflexionsarmen Raum fest eingebaut und befindet sich in der Mitte einer zur yz-Ebene parallelen Wand. Es handelt sich um einen koaxialen 2-Wege Lautsprecher in einer geschlossenen Box. Eine komplette Kreisfläche wurde auf der horizontalen Ebene in der Höhe des Lautsprechermittelpunktes („Lautsprecherebene“) gemessen. Außerdem wurde jeweils ein Außenkreis 0.75 m unterhalb und 1.15 m oberhalb der Lautsprecherebene gemessen, um Informationen entlang der z-Achse zu erhalten.

### 3.2.2. Messungen mit einem koaxialen Beyma im Bassreflexgehäuse in einer Raumkante

Die zweite Lautsprecherposition befand sich in einer Raumkante etwa 1 m über dem Stahlseilnetz. Hier wurde ebenso ein koaxialer 2-Wege Lautsprecher, der jedoch in einem Bassreflexgehäuse eingebaut war, positioniert. Es ergaben sich erhebliche Probleme, das Schallfeld bei Frequenzen unterhalb 20 Hz anzuregen, sodass die Raumresonanzen in den Übertragungsfunktionen kaum sichtbar wurden. Die Ursache hierfür war die Bassreflex-Bauart, da die abgestrahlte Schallleistung unterhalb der tiefsten Resonanz des Lautsprechers viel schneller abfällt als bei einer geschlossenen Lautsprecherbox. Dementsprechend wurden diese Messungen nicht weiter ausgewertet.

### 3.2.3. Messungen mit Sender 2 in einer Raumkante

Mit Sender 2, einem Tieftonlautsprecher im geschlossenen Gehäuse, wurde ein weiteres Mal die zweite Senderposition gemessen. Da dieser Lautsprecher bei den benötigten tieffrequenten Amplituden die hochfrequenten Anteile verzerrte, wurde ein Tiefpassfilter erster Ordnung mit einer Grenzfrequenz bei 30 Hz zwischengeschaltet. Dadurch konnte die Ausgangsamplitude des FFT-Analysators beträchtlich erhöht werden. Die Höhe des Mikrofons wurde auf 0.75 m unterhalb der Lautsprecherebene eingestellt, da es sich auf der Lautsprecherebene annähernd im Minimum der  $[0\ 0\ 1]$ -Mode befunden hätte. Am Ende der Messungen dieser Kreisfläche wurden Phasen- und Amplitudenunreinheiten in der Nähe der Quelle festgestellt. Die Ursache hierfür war, dass der Mikrofoneingangskanal am FFT-Analysator übersteuerte. Dies ist bis dahin nicht aufgefallen, da die Testmessungen bei  $0^\circ$  Azimut gemacht worden waren, das Mikrofon jedoch bei etwa  $45^\circ$  Azimut den geringsten Abstand zum Sender hatte und die Kohärenz dies bei Sinussweeps nicht direkt bemerken ließ. Die betroffenen Punkte mussten nachgemessen werden. Dafür wurde die Amplitude am Signalausgang des FFT-Analysators abgesenkt. Zur Bestimmung

der z-Mode wurde eine senkrechte Linie in 0.25 m Abständen gemessen. Der Startpunkt war 0.5 m unterhalb und der Endpunkt 1 m über der Lautsprecherebene, sodass vor und hinter der z-Knotenebene Übertragungsfunktionen vorhanden waren.

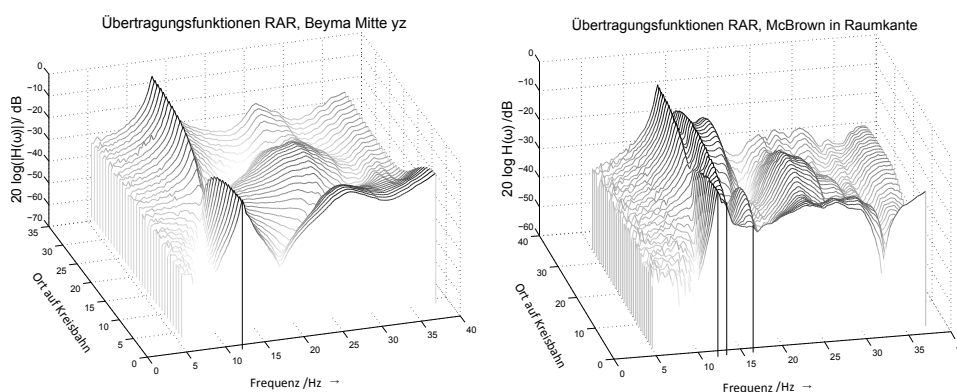
### 3.3. Ergebnisse der Modalanalyse in ME'scope mit unterschiedlichen Quellpositionen im reflexionsarmen Raum

#### 3.3.1. Allgemeines zu den Ergebnissen der Modalanalyse

Die Modalanalyse wurde nach den in Kapitel 2.6 beschriebenen Arbeitsschritten für alle Messungen durchgeführt. Während der Analyse stellte sich heraus, dass die Dämpfung der Keile schon ab etwa 30 Hz so hoch ist, dass nur Moden mit einer Knotenebene parametrisiert werden konnten. Der Unterschied zwischen den Senderpositionen zeigte sich bereits bei Betrachtung der Übertragungsfunktionen (vgl. Abbildung 3.4). Bei Sender 1 führte dessen Position dazu, dass die Moden der y- und z-Achse nicht angeregt wurden, denn der Lautsprecher befand sich genau im Kreuzungspunkt derer Knotenebenen. Diese Messungen gaben in der Modalanalyse also nur Aufschluss über die [100]-Mode, die dafür sehr gut angeregt wurde. Mit Sender 2 wurden auch die anderen Moden angeregt.

#### 3.3.2. Zum Verständnis der grafischen Darstellungsformen der Moden

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Formen der ermittelten Moden dargestellt. Eine der Darstellungsformen sind Pfeile, die mit ihrer Richtung die Phase der einzelnen DOFs und mit ihrer Länge den Betrag des „Schalldrucks“ darstellen. Die Koordinaten der Messpunkte bleiben konstant. Für tangentialen Moden ist es oft besser, die Formen durch bewegte DOFs wie in Abbildung 3.7 (unten) darzustellen, um Unübersichtlichkeit zu vermeiden. Die Darstellungsform kann aber irreführend sein, weil sich die Messpunkte bewegen. Mit der Auslenkung der Messpunkte soll jedoch der Verlauf des Schalldrucks im Raum dargestellt werden.



**Abb. 3.4.:** Wasserfalldiagramm der Übertragungsfunktionen einer halben Kreisbahn. **Links** wurde das Schallfeld mit dem Beyma-Lautsprecher in der Mitte einer zur yz-Ebene parallelen Wand angeregt. **Rechts** erfolgte die Anregung mit dem McBrown-Lautsprecher in einer Raumkante.

### 3.3.3. Darstellung der einzelnen Modenformen

Für die  $[1\ 0\ 0]$ -Mode wurde bei beiden Sendern die gleiche Resonanzfrequenz  $f_{100} = 12.5\text{ Hz}$  gefunden. Die ermittelten Dämpfungen unterscheiden sich mit  $1.86\%$  und  $2.01\%$  um weniger als  $10\%$ . Die Schwingungsformen sind qualitativ gleich, wie in Abbildung 3.5 und 3.6 sichtbar wird. Die Knotenebene befindet sich in der Mitte des Raumes.

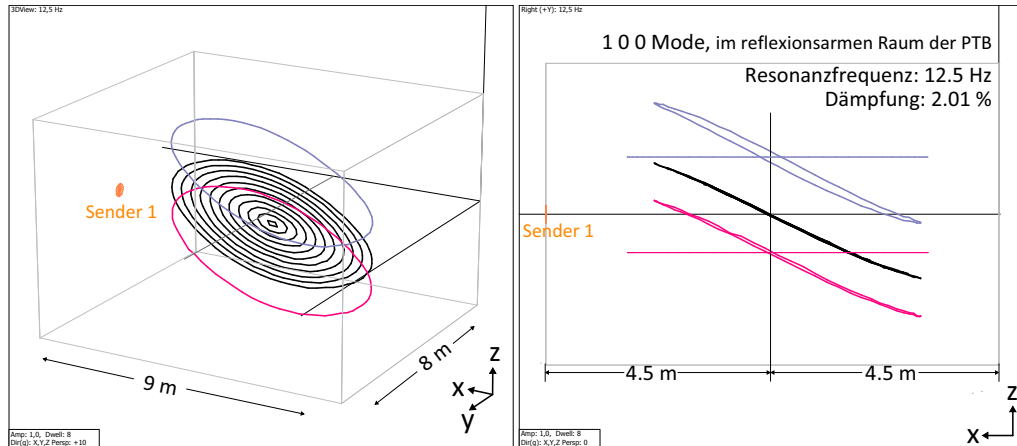


Abb. 3.5.: Schwingungsform der  $[1\ 0\ 0]$ -Mode im reflexionsarmen Raum der PTB. Ergebnisse durch Curvefitting der gemessenen Übertragungsfunktionen mit dem „Polynomial“-Verfahren in ME'scope. Das Schallfeld wurde mit Sender 1 in der Mitte einer zur  $yz$ -Ebene parallelen Wand angeregt.

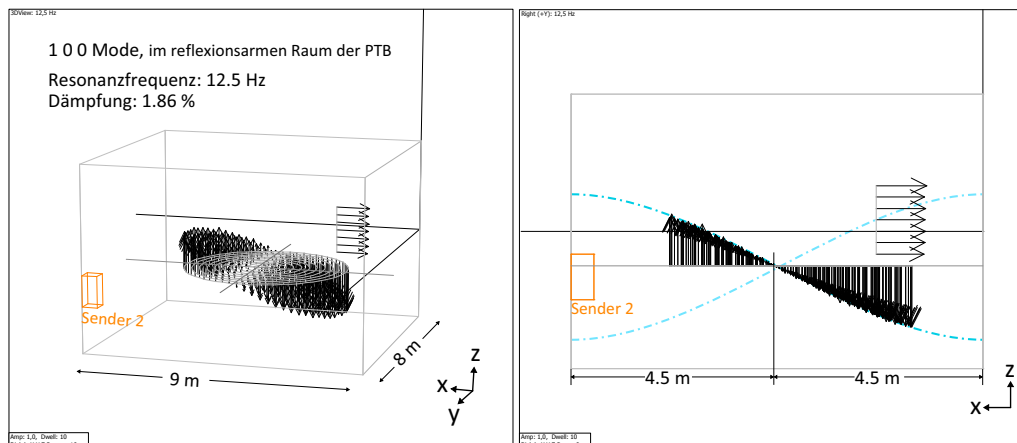
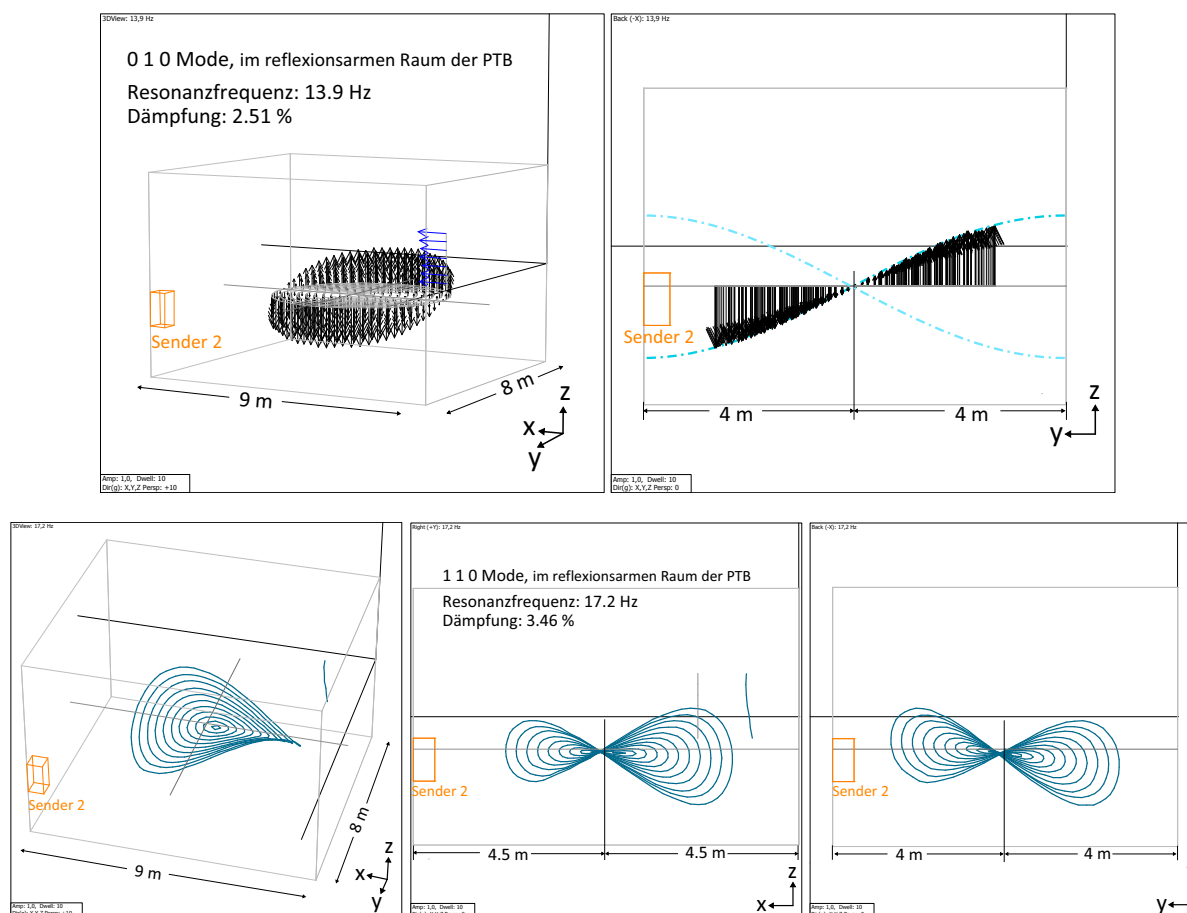


Abb. 3.6.: Schwingungsform der  $[1\ 0\ 0]$ -Mode im reflexionsarmen Raum der PTB. Ergebnisse durch Curvefitting der gemessenen Übertragungsfunktionen mit dem „Polynomial“-Verfahren in ME'scope. Das Schallfeld wurde mit Sender 2 in einer Raumkante angeregt.

Die  $[0\ 1\ 0]$ -Mode mit der Resonanzfrequenz  $f_{010} = 13.9\text{ Hz}$  hat ebenso eine Knotenebene, die genau durch die Raummitte verläuft. Die Dämpfung hat sich mit  $2.51\%$  ein wenig erhöht. Zur  $[1\ 1\ 0]$ -Mode steigt die Dämpfung weiter auf  $3.46\%$ . Die Resonanzfrequenz liegt bei  $f_{110} = 17.2\text{ Hz}$ . Die Schwingungsformen sind in Abbildung 3.7 dargestellt.

Für die  $[0\ 0\ 1]$ -Mode wurde das Fitting auf die Übertragungsfunktionen der senkrecht angeordneten Messpunkte angewendet. Ihre Resonanzfrequenz liegt bei  $f_{001} = 19.9\text{ Hz}$  und die Dämpfung bei  $4.7\%$ . Für alle weiteren Moden war die Dämpfung zu hoch. In den Übertragungsfunktionen wird aber eindeutig sichtbar, dass der Betrag nach wie vor ortsabhängig ist.





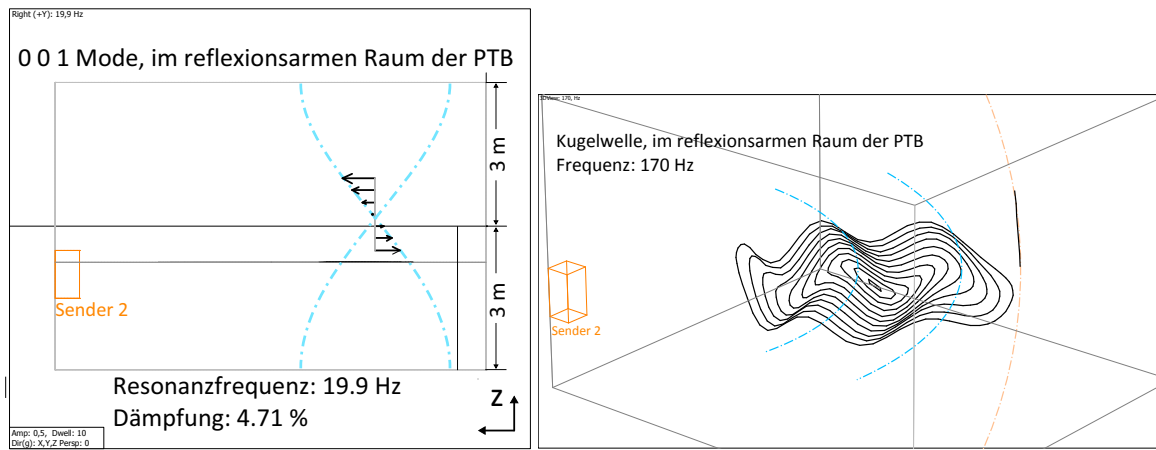
**Abb. 3.7.:** Oben: Schwingungsform der  $[0\ 1\ 0]$ -Mode im reflexionsarmen Raum der PTB. Das Schallfeld wurde mit Sender 2 in einer Raumkante angeregt. Unten: Schwingungsform der  $[1\ 1\ 0]$ -Mode im reflexionsarmen Raum der PTB. Das Schallfeld wurde mit Sender 2 in einer Raumkante angeregt.

Oberhalb der Grenzfrequenz für das Freifeld breiten sich die Wellen ungehindert aus. In Abbildung 3.8 ist eine Kugelwelle mit 170 Hz von Sender 2 dargestellt. Die Resonanzkurven aus der Modalanalyse der Übertragungsfunktionen mit Sender 2 werden in Abbildung 3.9 visualisiert.

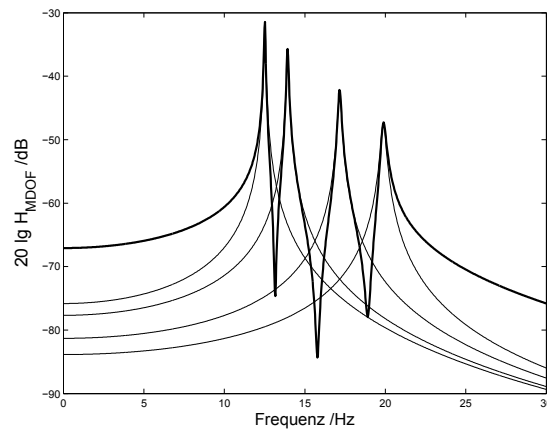
### 3.4. Vergleich der Wellenlängen der Resonanzen mit den Raumabmessungen und Einfluss der Keile auf die Schallausbreitung

Beim Vergleich der Raumabmessungen mit den halben Wellenlängen der experimentell bestimmten Resonanzfrequenzen fällt auf, dass die Längen nicht übereinstimmen. Als Raummaße wurden dabei die Längen von Wand zu Wand verwendet. Die Schallgeschwindigkeit beträgt bei einer Temperatur von 23 °C etwa  $c = 345$  m/s. In Tabelle 3.1 sind die halben Wellenlängen der Resonanzen den Raummaßen gegenübergestellt.

Effektiv ist der Raum akustisch größer als seine Abmessungen. Die Längendifferenz zwischen halber Wellenlänge und Raumlänge muss mit der Schallausbreitung in den Keilen zusammenhängen. Möglicherweise legt der Schall einen längeren Weg zurück, oder die Schallgeschwindigkeit nimmt in den Keilen ab. In [CM82, S. 139] wird die Schallgeschwindigkeit für hohe Frequenzen im porösen Absorber



**Abb. 3.8.:** Links: Schwingungsform der [0 0 1]-Mode im reflexionsarmen Raum der PTB. Die Anregung des Schallfeldes erfolgte mit Sender 2 in einer Raumkante. Rechts: Darstellung einer Kugelwelle, die sich im Raum frei ausbreitet. Ihre Frequenz ist 170 Hz. Auch hier erfolgte die Anregung mit Sender 2.



**Abb. 3.9.:** Darstellung der Resonanzkurven (Summe der modalen Eigenwerte ist die fette Linie). Ergebnisse aus der Modalanalyse der Übertragungsfunktionen mit Sender 2.

durch

$$c = c_0 / \sqrt{\chi} \quad (3.4)$$

beschrieben. Der Hintergrund ist die Annahme, dass im Kanalsystem des porösen Materials Umwege durch Verschlüsse entstehen, sog. „blinde Kanäle“, die durch den Strukturfaktor  $\chi$  berücksichtigt werden. Der Strukturfaktor ist bei Mineralfaserkeilen größer eins. Ein konkreter Wert war in der Literatur nicht auffindbar, es gibt jedoch einen Schätzwert für Mineralfasern mit  $\chi \approx 1.3$ , er wird in [Mec95] erwähnt. Die letzte Spalte in Tabelle 3.1 zeigt das Verhältnis von halber Wellenlänge zur entsprechenden Raumlänge. Das Verhältnis ist nicht bei allen Raumkoordinaten gleich. Für die x- und y-Koordinate ist ein Wert von 1.3 annehmbar, doch für die z-Koordinate weicht der Wert mit 1.1 deutlich ab. Mögliche Ursachen könnten andere Absorptionseigenschaften der Keile am Boden und an der Decke sein, da über viele Jahre Fasern herunterrieseln konnten. Außerdem waren sie der Schwerkraft anders ausgesetzt als die querliegenden Keile.

Eine andere Hypothese ist die Schichtung der Luft mit einem Temperaturgradienten entlang der z-Achse, da der Raum von unten beheizt wird und die Klimaanlage während der Messungen abgeschaltet ist, sodass die Luft nicht umgewälzt werden kann.

Koordinate	$\lambda_n/2/m$	Raumlänge $l/m$	$\Delta l/m$	$\lambda_n/2l$
x	13.8	10.6	3.2	1.3
y	12.4	9.6	2.8	1.28
z	8.7	7.6	1.1	1.14

**Tab. 3.1.:** Vergleich der halben Wellenlängen der experimentell ermittelten Resonanzfrequenzen mit den Raummaßen. Ausschließlich axiale Moden wurden ausgewertet.

Für theoretische Berechnungen des tieffrequenten Schallfeldes in reflexionsarmen Räumen könnte die Verwendung einer anderen Schallgeschwindigkeit hilfreich sein. In einem FEM-Modell kann ein zweites Gebiet mit einer niedrigeren Schallgeschwindigkeit für die Keile definiert werden. Denn die Randbedingungen sind bei Eigenwertberechnungen in einem FEM-Programm wie z. B. Comsol nur schallhart oder schallweich einstellbar.

### 3.5. Zusammenfassung

Im reflexionsarmen Raum wurden Übertragungsfunktionen mit einem eigens entwickelten Messaufbau gemessen. Die Übertragungsfunktionen konnten für tiefe Frequenzen modal parametrisiert werden. Mit Sender 1 wurde fast ausschließlich die [1 0 0]-Mode angeregt. Mit Sender 2 wurden alle Moden relativ stark angeregt. Es konnten alle axialen Moden mit einer Knotenebene und die tangentielle [1 1 0]-Mode durch einen globalen Polynom-Curvefit modal parametrisiert werden. Die Knotenebenen der Moden verlaufen genau durch die Raummitte. Hier wird tieffrequenter Schall kaum verstärkt. Deshalb eignet sich das Raumzentrum zur Bestimmung des frequenzunbewerteten Mikrofoneigenrauschens.

## 4. Fremdgeräuschemessungen im reflexionsarmen Raum mit einem Mehrkanal-Audiointerface

Um Aufschluss über die örtlichen, spektralen und statistischen Eigenschaften der Fremdgeräusche zu bekommen, wurden simultan Aufnahmen an mehreren Orten des im Ruhezustand befindlichen Raums durchgeführt. Da Langzeitmessungen über mehrere Stunden einen Datenüberschuss erzeugt hätten, wurden mehrere kürzere Messungen zu unterschiedlichen Tageszeiten durchgeführt. Der Messaufbau dafür wird in Kapitel 4.1 beschrieben. Über den Ablauf wird in Kapitel 4.2 berichtet. Die zur Auswertung verwendeten Verfahren werden in Kapitel 4.3 vorgestellt. In Kapitel 4.4 werden die Ergebnisse der Analysen der Fremdgeräuschemessungen aufgeführt und erläutert. Die Ergebnisse werden in Kapitel 4.5 kurz zusammengefasst.

### 4.1. Messaufbau zur mehrkanaligen Fremdgeräuschemessung an gewählten Orten im Raum

#### 4.1.1. Verwendetes Equipment

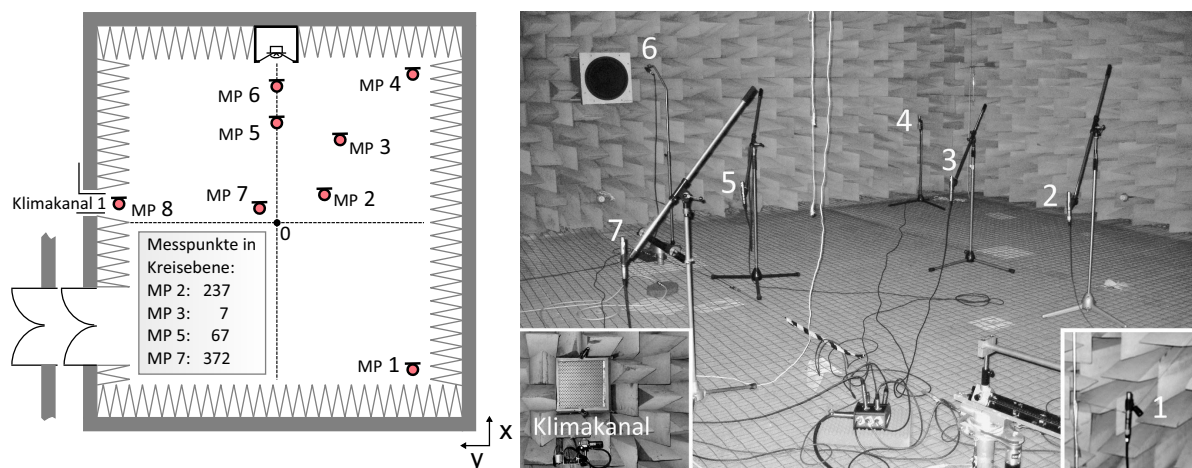
Es kam ein Mehrkanal-Audiointerface von RME (Fireface 800) mit Mikrofonvorverstärker (Octamic II) zum Einsatz. Als Mikrofone wurden acht Behringer B-5 Studio-Kondensatormikrofone mit Druckempfängerkapsel verwendet. Zur Aufnahme wurde das Programm Samplitude eingesetzt. Da die Signalwege über die Mikrofone kalibriert werden mussten, war es nötig einen Adapter für den verwendeten B&K Mikrofonkalibrator Typ 4231 zu erstellen.

Die Mikrofone und die Messkette wurden auf Eigenrauschen untersucht, dabei ergab sich ein mittlerer Ersatzgeräuschpegel von  $L_{Z,ers} = 29$  dB. Außerdem war der Frequenzgang des Studio-Equipments bei tiefen Frequenzen interessant. Der Frequenzgang der RME-Geräte wurde gemessen, die Empfindlichkeit der Mikrofone konnte für tiefe Frequenzen nicht ermittelt werden, da sich keine Möglichkeit zur Messung ergab. Die Empfindlichkeit der Mikrofone wird sich bei tiefen Frequenzen wahrscheinlich von der Empfindlichkeit im Frequenzbereich des Kalibriersignals unterscheiden. Das bedeutet, dass trotz Kalibrierung eine unbekannt systematische Messunsicherheit die Ergebnisse der Auswertung beeinflusst. Die Ergebnisse aus den Equipmentmessungen befinden sich in Kapitel A.5. Der Einsatz von mehreren Ein-Zoll-Mikrofonen und Messverstärkern wäre bevorzugt worden, wenn diese zur Verfügung gestanden hätten.

#### 4.1.2. Positionierung der Mikrofone

Die Mikrofone waren mit Studio-Mikrofonstativen auf dem Stahlseilnetz aufgestellt. Die Positionen befanden sich einerseits auf Punkten der in der Modalanalyse untersuchten Kreisfläche und andererseits in der Nähe der Knotenebenen, zwischen Knoten und Maxima und in Raumkanten. Teilweise wurden zwei ähnliche Punkte symmetrisch im Raum gewählt, um Sicherheit über die Korrelation (räumlich, spektral

und statistisch) der Geräusche zu erlangen. Die Mikrofone zeigten mit den Membranen senkrecht nach oben. Für die tiefen Frequenzen war die Ausrichtung jedoch kaum von Bedeutung, da die Mikrofone hier eine Kugelcharakteristik aufweisen. In Abbildung 4.1 werden die letztendlich gewählten Mikrofonpositionen dargestellt, wobei die Position von Mikrofon acht (MP 8) wechselte. Teilweise wurde es im Klimakanal aufgehängt und teilweise im Vorraum bzw. außerhalb des Raumes positioniert. Die Position im Klimakanal wurde gewählt um herauszufinden, ob es sich hier etwa um eine Fremdgeräuschquelle handeln könnte. Die Position außerhalb sollte Informationen über etwaige Korrelationen zu Geräuschen innerhalb des Raumes liefern. Die Mikrofone MP 2, 3, 5 und 7 befanden sich auf Messpunkten aus der Modalanalyse der Kreisfläche 0.75 m unterhalb der Lautsprecherebene. MP 1 und MP 4 befanden sich in zwei Raumkanten auf annähernd gleicher Höhe. Die genauen kartesischen Koordinaten der Mikrofonpositionen sind in Tabelle A.4 aufgeführt.



**Abb. 4.1.:** Links: Mikrofonpositionen der Studio-Kondensatormikrofone zur Fremdgeräuschmessung im reflexionsarmen Raum. Rechts: Foto des Messaufbaus im reflexionsarmen Raum mit Sicht in Richtung des ersten Quadranten.

#### 4.1.3. Verschaltung der Messkette und vorgenommene Einstellungen

Das Audiointerface stand über Firewire mit dem PC und Samplitude in Verbindung. Ein symmetrisches achtkanaliges XLR Multicore-Verlängerungskabel stellte die Verbindung zwischen den Mikrofonverstärkerkanälen außerhalb des Raumes und den Mikrofonen im Raum her. Der Gain der Mikrofonverstärkerkanäle war so hoch wie möglich eingestellt, doch das Eigenrauschen der Vorverstärker (Octamic II) und Einstreuungen von Radiosendern setzten dem ein Limit. Die Aufnahmen wurden mit einer Quantisierung von 24 Bit und einer Abtastrate von 44.1 kHz durchgeführt. Da nur sehr tiefe Frequenzen interessieren, hätte auch eine niedrigere Abtastrate ausgereicht, die mindestens zweifach über dem Kalibrierton ( $f = 1$  kHz) liegen müsste. Diese Option gab es im Aufnahmeprogramm leider nicht. Die Mikrofonglieder wurden auf einen glatten Frequenzgang ohne Dämpfung eingestellt.

## 4.2. Ablauf der Fremdgeräuschmessungen zu unterschiedlichen Tageszeiten

Für alle Messungen wurde ein Achtkanal-Projekt mit den in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Einstellungen erstellt. Das Routing der Kanäle erfolgte so, dass die Kanalnummern mit der Nummerierung der

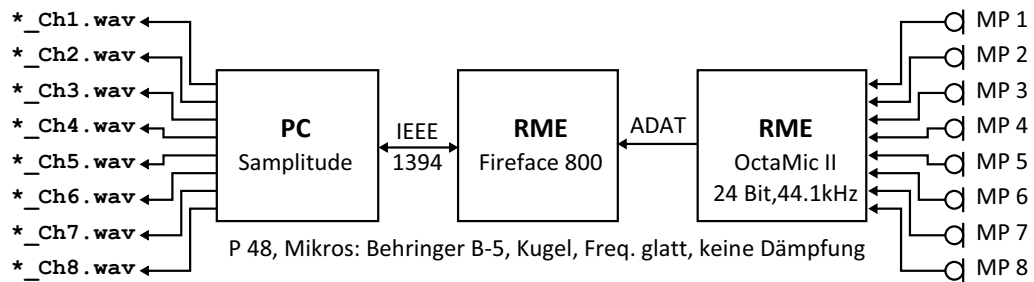


Abb. 4.2.: Blockdiagramm des Messaufbaus für die Fremdgeräuschmessungen im reflexionsarmen Raum.

Mikrofonpositionen übereinstimmte. Nach Prüfung der Kanäle auf hörbare Störgeräusche konnte die Aufnahme zur Kalibrierung der Kanäle starten. Der Kalibrator wurde auf jedes Mikrofon aufgesteckt und über zehn Sekunden ohne Berührung und unnötige Geräusche zu erzeugen wurde der Kalibrierton mit 94 dB SPL bei 1 kHz für alle Mikrofonkanäle aufgenommen. Der Raum wurde daraufhin geschlossen und nach kurzer Wartezeit konnte die Messung beginnen. Der Kalibriervorgang wurde für jede Messung trotz gleich eingestelltem Interface wiederholt. So sollte eine höhere Messsicherheit gewährleistet werden. Es wurden insgesamt drei Messungen jeweils über einen Zeitraum von etwa einer halben Stunde zu unterschiedlichen Tageszeiten durchgeführt. Die Besonderheiten der einzelnen Messungen waren folgendermaßen:

Messung 1, nachmittags um 15:40 Uhr, am 15.11.2010 Am Anfang der Messung befand sich MP8 im Vorraum, in dem auch gesprochen wurde. Später wurde es in den Klimakanal gehängt (dieser Teil wurde jedoch nicht analysiert, da keine gewinnbringende Information zu erwarten war).

Messung 2, mittags um 13:25 Uhr, am 16.11.2010 MP 8 hing im Klimakanal.

Messung 3, abends um 20:00 Uhr, am 22.11.2010 MP 8 wurde außen vor dem Fenster des Vorraums überdacht positioniert, es regnete.

### 4.3. Verwendete Analyseverfahren und deren Einstellungen zur Überprüfung und zur Erzeugung von Metadaten der Fremdgeräuschmessungen

#### 4.3.1. Erzeugung von Spektrogrammen in Artemis

Artemis ist eine Analysesoftware von Head-Acoustics und bietet mehrere Verfahren zur Analyse von Audiosignalen, wie z. B. die Berechnung von Spektrogrammen. Es wurde dieses Programm gewählt, da die anfallende Datenmenge hier zeiteffizient verarbeitet werden konnte. Die Spektrogramme wurden ausschließlich für eine qualitative Untersuchung der Daten verwendet. Die FFT-Länge betrug 1048576 Punkte bei einer Samplingfrequenz von 44.1 kHz, da hier eine angemessene Relation zwischen Frequenzauflösung und Amplitudenmodulation der tieffrequenten Bänder angenommen wurde. Die mit einem Hann-Fenster bewerteten Blöcke wurden zu 50 % überlappt.

#### 4.3.2. Kalibrierte Autoleistungsdichtespektren und statistische Eigenschaften unter Annahme annähernd gaussverteilter Spektralbänder

Zur Berechnung von Leistungsdichtespektren in Matlab erforderte die entstandene Datenmenge eine Blockverarbeitung der \*.Wav-Files. Um zusätzlich die Menge der Samples zu reduzieren und damit

weniger FFT-Punkte für eine gute Frequenzauflösung zu benötigen, wurden alle Messungen mit der `resample()`-Funktion in Matlab auf ein Zehntel der Samplingfrequenz herunter getaktet ( $f_{s,\text{resamp}} = 4.41$  kHz). Es wurde eine so hohe Samplingfrequenz gewählt, da der Kalibrierton von der Nyquistfrequenz ausreichend entfernt sein sollte, um energetisch möglichst genau diskret abgebildet zu sein. Die Leistungsdichtespektren wurden mit dem Welch-Verfahren nach [Wel67] berechnet. Das Verfahren und der vorgenommene Kalibriervorgang sind in Kapitel B.2 kurz erläutert. Von den einzelnen Wav-Blöcken wurden Leistungsdichtespektren mit Hann-gefensterten Blöcken einer viertel Länge der Wav-Blöcke und einem Überlapp von 50 % geschätzt. Über alle Leistungsdichtespektren wurden die Varianz und der Mittelwert für jeden FFT-Punkt berechnet. Von den Ergebnissen sollten die so geschätzten Schalldruckpegel über der Frequenz dargestellt werden.

#### 4.3.3. Berechnung der Schalldruckpegel-Häufigkeitsverteilung des $L_{Z,S}$ in Matlab

Zur Beantwortung der Frage, welche maximalen frequenzunbewerteten Schalldruckpegel der Fremdgeräusche zu erwarten sind, wurden Schalldruckpegel-Häufigkeitsverteilungen der unterschiedlichen Messungen und Mikrofonpositionen berechnet. Dies wurde durch Blockverarbeitung der Messfiles und durch einen Algorithmus zur Berechnung der Schalldruckpegel und der Häufigkeitsverteilungen in Matlab bewerkstelligt. Der Quellcode befindet sich in Kapitel D.2.3.

### 4.4. Ergebnisse der Fremdgeräuschmessungen in spektraler, räumlicher und statistischer Hinsicht

Die Fremdgeräuschaufnahmen wurden mit den in Kapitel 4.3 vorgestellten Verfahren ausgewertet. Außerdem wurden die Aufnahmen in zehnfacher Geschwindigkeit angehört. Bei Messung 1 und 2 war ein deutliches „Rumpeln“ zu hören. Während der Analysen stellte sich heraus, dass die Messungen von Kanal 6 nicht brauchbar sind. Bis dahin war dies bei der Überprüfung der Kanäle nicht aufgefallen, da das Kalibriersignal bei jeder Messung auf Kanal 6 fehlerfrei aufgezeichnet wurde. Der Kanal wird in den Analysen ausgelassen, aber teilweise der Vollständigkeit wegen dargestellt.

#### 4.4.1. Qualitative Beobachtungen aus den Spektrogrammen und Korrelationskoeffizienten der Messpunkte

Die Spektrogramme der Messungen 1 und 2 zeigen eine hohe Aktivität im Band von 12 Hz bis etwa 15 Hz (Abbildung 4.3 und 4.4). Hinzu kommt, dass die Pegel der Geräusche mit der Verstärkung der Moden an der Mikrofonposition korreliert sind. Die Messpunkte eins und vier sind am stärksten ausgeprägt, da sie sich in den Raumkanten im Bereich höchsten Schalldrucks befinden. Die Moden  $[1\ 0\ 0]$  und  $[0\ 1\ 0]$  mit den Resonanzfrequenzen bei 12.5 Hz und 13.9 Hz scheinen den größten Einfluss auf die eintretenden Geräusche im Raum zu nehmen. Die Verstärkung im Band bei 9 Hz ist durch die Modalanalyse nicht geklärt. Da dieses Band an jedem Ort annähernd gleich stark ausgeprägt ist, weist das auf eine Helmholtzresonanz hin, die im Raum fast den gleichen Schalldruck an allen Orten erzeugt. Denn bei dieser Frequenz kann sich keine richtige Welle im Raum ausbreiten. Der zeitliche Verlauf zeigt bei Messung 1 und 2, dass von einer instationären Anregung ausgegangen werden kann. Bei Messung 3 sind die Geräusche viel schwächer ausgeprägt und scheinen weniger im Pegel zu schwanken (Abbildung 4.5). Zur abendlichen Messzeit sind offensichtlich weniger Geräusche erzeugt worden. Die Resonanz bei 9 Hz wurde zudem kaum angeregt.

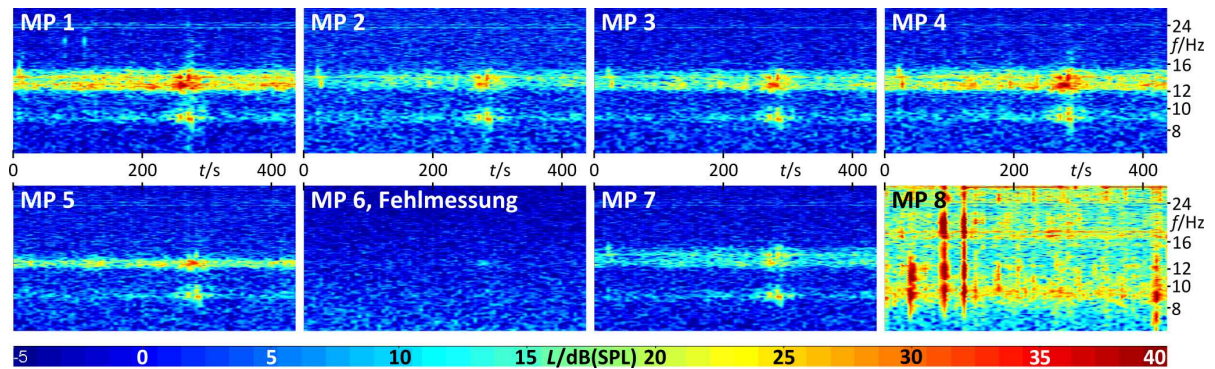


Abb. 4.3.: Spektrogramm-Ausschnitte der Messung 1 (nachmittags). Die Pegel an den einzelnen Mikrofonpositionen folgen annähernd dem räumlichen Schalldruckverlauf der Raummoden. Der Zeitliche Verlauf zeigt, dass die Fremdgeräusche nicht stationär sind. MP 8 befand sich außerhalb des reflexionsarmen Raums.

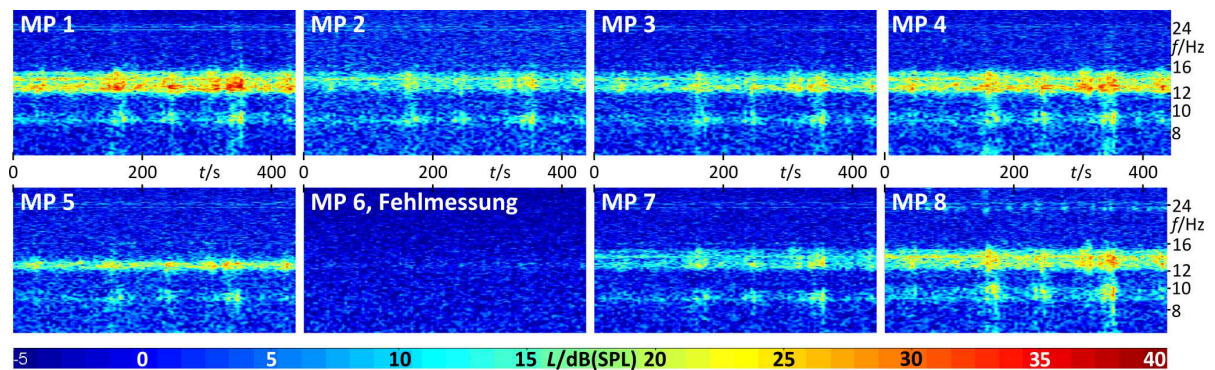


Abb. 4.4.: Spektrogramm-Ausschnitte der Messung 2 (mittags). Auch hier sind die Pegel abhängig von der Mikrofonposition im modalen Schallfeld. Wie bei Messung 1 sind die Fremdgeräusche zeitvariant im Pegel. MP 8 hing im Klimakanal.

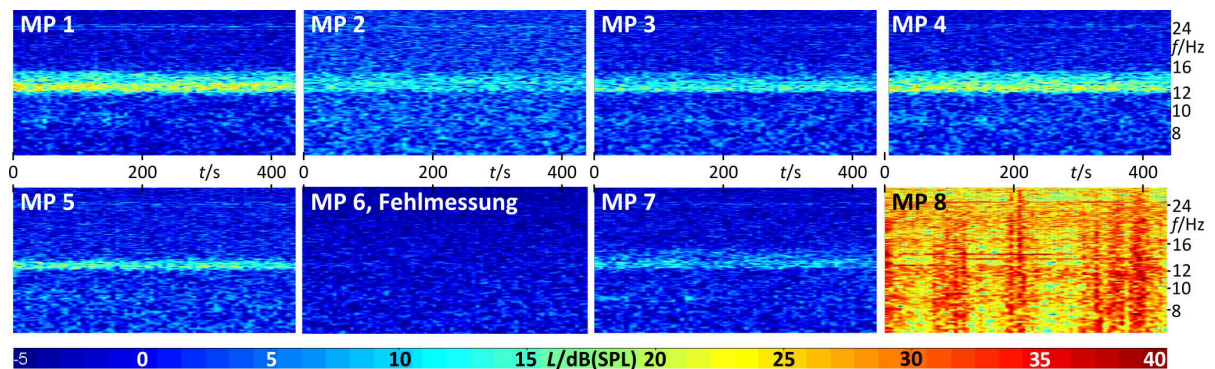
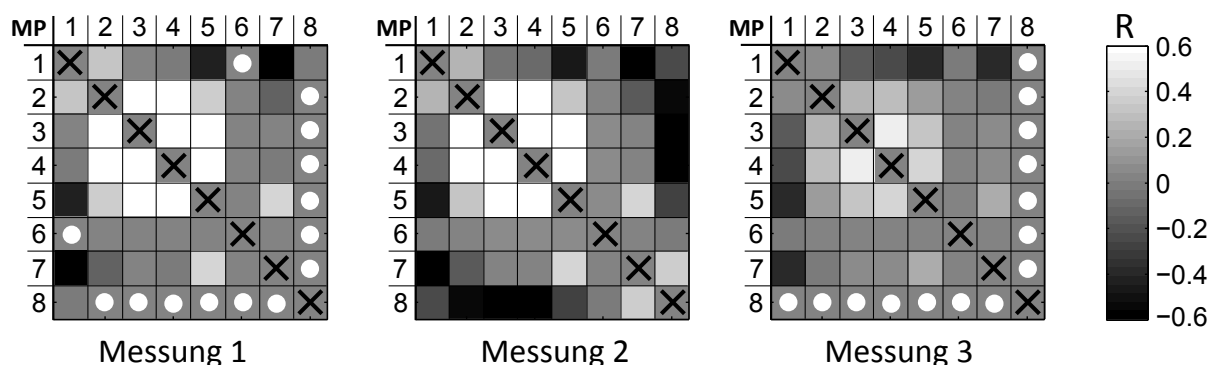


Abb. 4.5.: Spektrogramm-Ausschnitte der Messung 3 (abends). Die Fremdgeräusche sind schwächer als tagsüber. Dennoch werden die übrigen Geräusche durch die Raummoden verstärkt. Die zeitliche Varianz der Fremdgeräuschpegel ist viel geringer als bei den Messungen zur Tageszeit. MP 8 befand sich außen vor einer Hauswand.





**Abb. 4.6.:** Korrelationskoeffizientenmatrizen der Fremdgeräuschmessungen. Die Berechnung wurde über den Zeitraum 0...11 min in Matlab mit `corrcoef()` für alle Messungen und Kanäle durchgeführt. Helle und dunkle Werte deuten auf eine hohe positive oder inverse Korrelation hin, graue Felder sind eher unkorreliert. Die mit weißen Punkten markierten Felder sind unkorreliert. Für die Felder der Autokorrelationskoeffizienten werden hier keine Werte gegeben. Sie sind mit einem schwarzen Kreuz versehen.

Ob die Messpunkte innerhalb der Messungen untereinander korreliert sind, wird schon teilweise im zeitlichen Verlauf der Spektrogramme sichtbar. Es stellt sich jedoch die Frage, wie stark die Korrelation ist und ob sie invers ist, wenn ein Mikrofonsignal auf der einen Seite der Knotenebene mit einem auf der anderen Seite korreliert wird. In Abbildung 4.6 werden die Korrelationskoeffizientenmatrizen aller Messungen gezeigt. Sie wurden mit der `[R,P]=corrcoef()`-Funktion in Matlab berechnet.  $R(i, j)$  ist die Matrix der Korrelationskoeffizienten und die Matrix  $P(i, j)$  gibt die Wahrscheinlichkeit für Unkorreliertheit an. Als Kriterium für signifikante Korrelation in  $R(i, j)$  wurde  $P(i, j) < 5\%$  festgelegt. Die Messpunkte MP 2, 3, 4 und 5 sind positiv korreliert. Der Grund dafür ist deren Position im gleichen Quadranten, da hier die Verstärkung durch die Raummoden gleichphasig ist. Die Positionen MP 3, 4, 5 und 7 sind mit MP 1 negativ korreliert, was wahrscheinlich mit der Gegenphasigkeit der  $[1\ 0\ 0]$ -Mode und teilweise mit der  $[0\ 1\ 0]$ -Mode zusammenhängt. Die als Fehlmessung deklarierten Daten von MP6 sind bei jeder Messung sehr schwach bis gar nicht korreliert. Bei Messung 2 steht die negative Korrelation von MP 8 mit MP 2, 3, 4 und 5 mit der Gegenphasigkeit der  $[0\ 1\ 0]$ -Mode in Verbindung. Bei Messung 3 sind insgesamt niedrigere Korrelationskoeffizienten zu beobachten. Bei den Messungen 1 und 3 liegen für MP 8 so gut wie keine signifikanten Korrelationen vor. Für Messung 1 scheint das nachvollziehbar, denn das Mikrophon befand sich in einem anderen Raum mit Resonanzen bei anderen Frequenzen und Sprachsignal auf den Aufnahmen. Bei Messung 3 befand sich MP 8 jedoch im Freien, direkt vor einer Wand. Wenn es sich um *Luftschall* handelt, der in den Raum gelangt, müsste hier theoretisch eine signifikante Korrelation vorliegen. Nach [BP71, S. 63] sind unkorrelierte Zufallsvariablen nicht zwingend unabhängig. Der Transferpfad über die Luft kann deshalb nicht ausgeschlossen werden.

#### 4.4.2. Autoleistungsdichtespektren

In den kalibrierten Leistungsdichtespektren werden die Schalldruckpegel „pro Frequenz“ über der Frequenz sichtbar gemacht. In den Abbildungen 4.7 und 4.8 werden jeweils im oberen Plot die mittleren Schalldruckpegel und im unteren die Standardabweichungen als Korrekturpegel aufgetragen. Der positive „Standardabweichungskorrekturpegel“ berechnet sich durch

$$\delta L_{+Std\{S_{pp}\}} = 10 \lg \left( \frac{10^{L_{\overline{S_{pp}}}/10} + 10^{L_{Std\{S_{pp}\}}/10}}{10^{L_{\overline{S_{pp}}}/10}} \right) \text{ dB} \quad (4.1)$$

und der entsprechende negative Pegel wird wie folgt berechnet:

$$\delta L_{\text{-STD}(S_{pp})} = 10 \lg \left( \frac{10^{L_{\overline{S_{pp}}}/10} - 10^{L_{\text{Std}\{S_{pp}\}}/10}}{10^{L_{\overline{S_{pp}}}/10}} \right) \text{ dB.} \quad (4.2)$$

Die Schalldruckpegel, die während der Messung auftraten, liegen zu 68.3% in dem Intervall

$$L_{68.3\%} = \begin{cases} L_{\overline{S_{pp}}} + \delta L_{\text{+Std}\{S_{pp}\}} \text{ dB} & \text{obere Grenze} \\ L_{\overline{S_{pp}}} - \delta L_{\text{-Std}\{S_{pp}\}} \text{ dB} & \text{untere Grenze} \end{cases}, \quad (4.3)$$

alle Schalldruckpegel sind Frequenzabhängig.

Bei der Analyse wurde nur der positive Standardabweichungskorrekturpegel berechnet und dargestellt, da nach einem Maximalpegel gesucht war. Bei der Berechnung der Pegel wurden alle Spektren mit dem Kalibriersignal kalibriert. Bei den Messungen nachmittags und mittags in Abbildung 4.7 zeigt der positive Standardabweichungskorrekturpegel, dass die Schalldruckpegel hier recht stark variieren können. Für Messungen bei diesen Frequenzen bedeutet das, dass die Messunsicherheiten größer werden. Der Ursprung der leichten Anhebung bei 24 Hz ist nicht sicher. Der Vergleich mit den Übertragungsfunktionen der Modalanalyse in Abbildung 3.4 (rechts) deutet darauf hin, dass ein Fremdgeräuschanteil durch eine Raumresonanz bei 24 Hz leicht verstärkt wird. Die Spektren der Messung 3 in Abbildung 4.8 weisen einen konstanteren mittleren Schalldruckpegel auf. Solche Messbedingungen wären zu bevorzugen. Das Eigenrauschen der Messkette ist bei den dargestellten Spektren als der durchgehend leicht gekrümmte Anteil bei 10 dB zu erkennen. Bei Weiterverwendung der Daten wäre eine Korrektur sinnvoll. Der spektrale Verlauf der Eigengeräusche ist in Abbildung A.3 dargestellt.

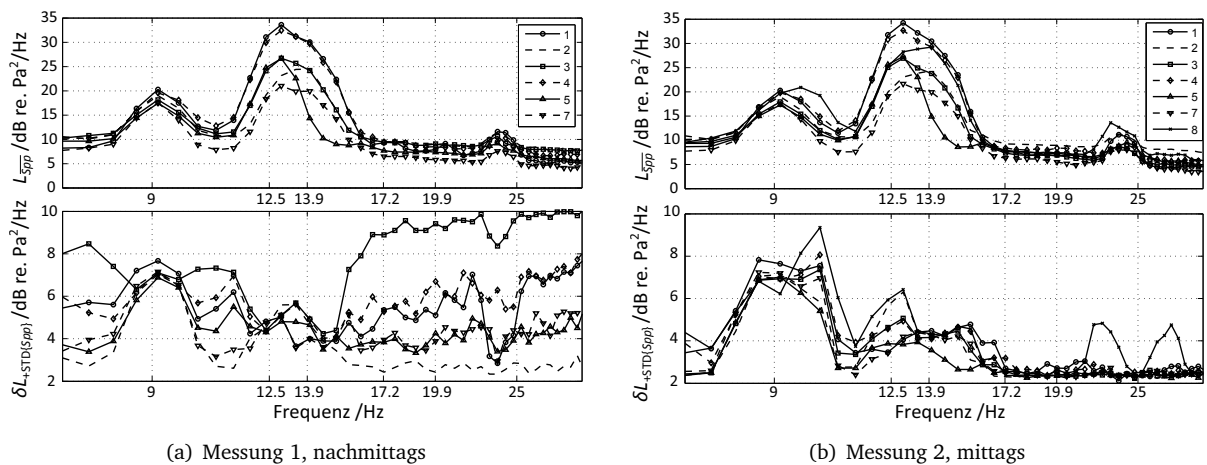


Abb. 4.7.: Kalibrierte Leistungsdichtespektren der Fremdgeräuschmessungen.

#### 4.4.3. Schalldruckpegel-Häufigkeitsverteilung der einzelnen Messpunkte und Vergleich zwischen den Messungen

Die Schalldruckpegel-Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 4.9 zeigen die Häufigkeit der Schalldruckpegel, die während der Messung auftraten. Bei MP 1 und 4 können Spitzen-Schalldruckpegel von über 40 dB(Z) auftreten. Bei MP 7 treten die niedrigsten Schalldruckpegel um 30 dB(Z) auf. Sie sind sehr nah am Eigenrauschen der Messkette. Die leichte Rechtsschiefe der Häufigkeitsverteilungen deutet auf

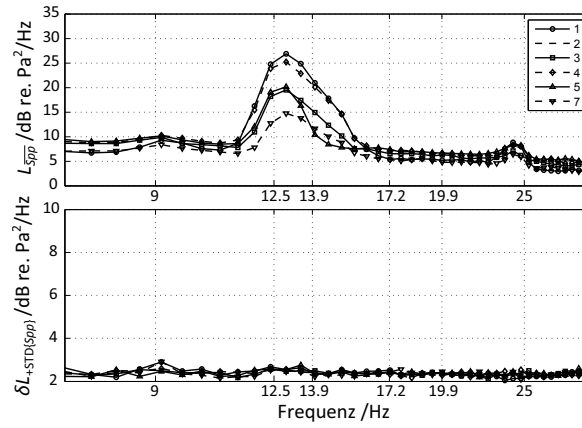


Abb. 4.8.: Kalibriertes Leistungsdichtespektrum der Messung 3, abends.

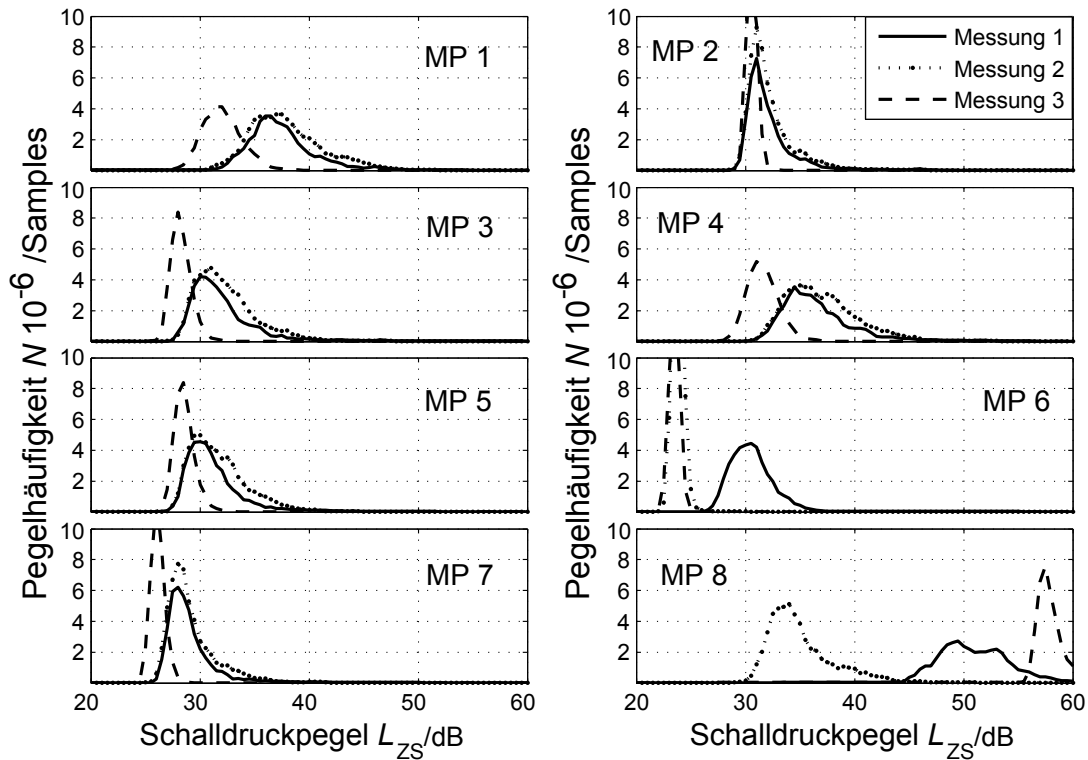
die  $\chi^2$ -Verteilung des Prozesses hin. Diese Verteilung entsteht bei Superposition mehrerer gaussverteilter Zufallsvariablen. In diesem Fall wird angenommen, dass die einzelnen Frequenzbänder annähernd gaussverteilt und additiv überlagert sind.

#### 4.4.4. Ergebnisse der Suche nach Fremdgeräusch-Eintrittsorten

Zur Ermittlung der Fremdgeräusch-Eintrittsorte reicht es nicht aus zu untersuchen, welche Mode stärker angeregt wird. Dadurch könnte lediglich eine grobe Richtung geschätzt werden. Die Ortung über Intensitätsunterschiede in den Kanälen ist durch das modale Schallfeld unmöglich, da der Einfluss der Eigenfunktionen zu groß ist. Außerdem wird die Phase durch die Moden verfälscht und die Reflexionen führen zu Spiegelquellen. Hinzu kommt, dass die Wellenlängen im betroffenen Frequenzbereich über 20 Meter lang sind.

Die Betrachtung der Fremdgeräusch-Leistungsdichtespektren führte zu keiner sicheren Aussage über einen Eintrittsort. Deshalb musste ein anderer Ansatz zur Analyse gefunden werden: Nach der Theorie befindet sich das Schallfeld in einem stationären Schwingungszustand. Die Messungen der Fremdgeräusche ergaben andererseits, dass die Anregung zumindest zeitlich instationär ist. Die Änderung der Anregung erzeugt für kurze Zeit eine sich erkennbar ausbreitende Welle, bis sich durch die Reflexionen wieder das stationäre Feld einstellt. Die Idee ist, in den Zeitintervallen der Einschwingvorgänge eine Analyse der Fremdgeräusche durchzuführen. Als Analysewerkzeug wurde eine sog. Migrationsanalyse nach [Hor10] angewendet. Dieses Verfahren stammt aus dem Bereich der Geophysik und wurde für tieffrequente seismische Signale erfolgreich zur Quellortung angewendet. Der Hintergrund des Verfahrens ist die Berechnung von geglätteten und normierten Hilbert-Einhüllenden  $E_{R_{e_i e_j}}$  der Kreuzkorrelationsfunktionen der Empfängersignale. Für hypothetische Quellpositionen im betrachteten Gebiet wird diejenige Zeitdifferenz  $\Delta t$  zwischen den kombinierten Empfängern berechnet, in der eine Welle mit Schallgeschwindigkeit  $c$  bei den Empfängern nacheinander ankommen müsste. Die geglättete Einhüllende der momentan kombinierten Empfänger liefert bei dieser Zeitdifferenz einen hohen Wert bei starker Korrelation und einen niedrigen bei schwacher Korrelation. Die Summe dieser verzögerten Werte aus den auf eins normierten, geglätteten Einhüllenden aller Empfängerkombinationen heißt Semblance. Die Semblance für einen Quellort mit dem Index  $r_q$  berechnet sich durch die Summe der Semblance-Werte aller Empfängerkombinationen

$$\text{Semblance}(r_q) = \sum E_{R_{e_i e_j}}(\Delta t(r_q)) \quad (4.4)$$



**Abb. 4.9.:** Schalldruckpegel-Häufigkeitsverteilung der Fremdgeräuschmessungen. Die Messdaten wurden mit einem Tiefpassfilter ( $f_g = 100$  Hz) gefiltert, um den Einfluss des Eigenrauschens möglichst gering zu halten.

Die Anzahl der Kombinationen für  $N_e$  Empfänger berechnet sich durch

$$N_{komb} = \frac{1}{2}(N_e^2 - N_e) \quad (4.5)$$

Die maximale Semblance hängt von der Anzahl der Empfänger ab und kann wegen der normierten Einhüllenden maximal den Wert  $Semblance_{MAX} = N_{komb}$  annehmen.

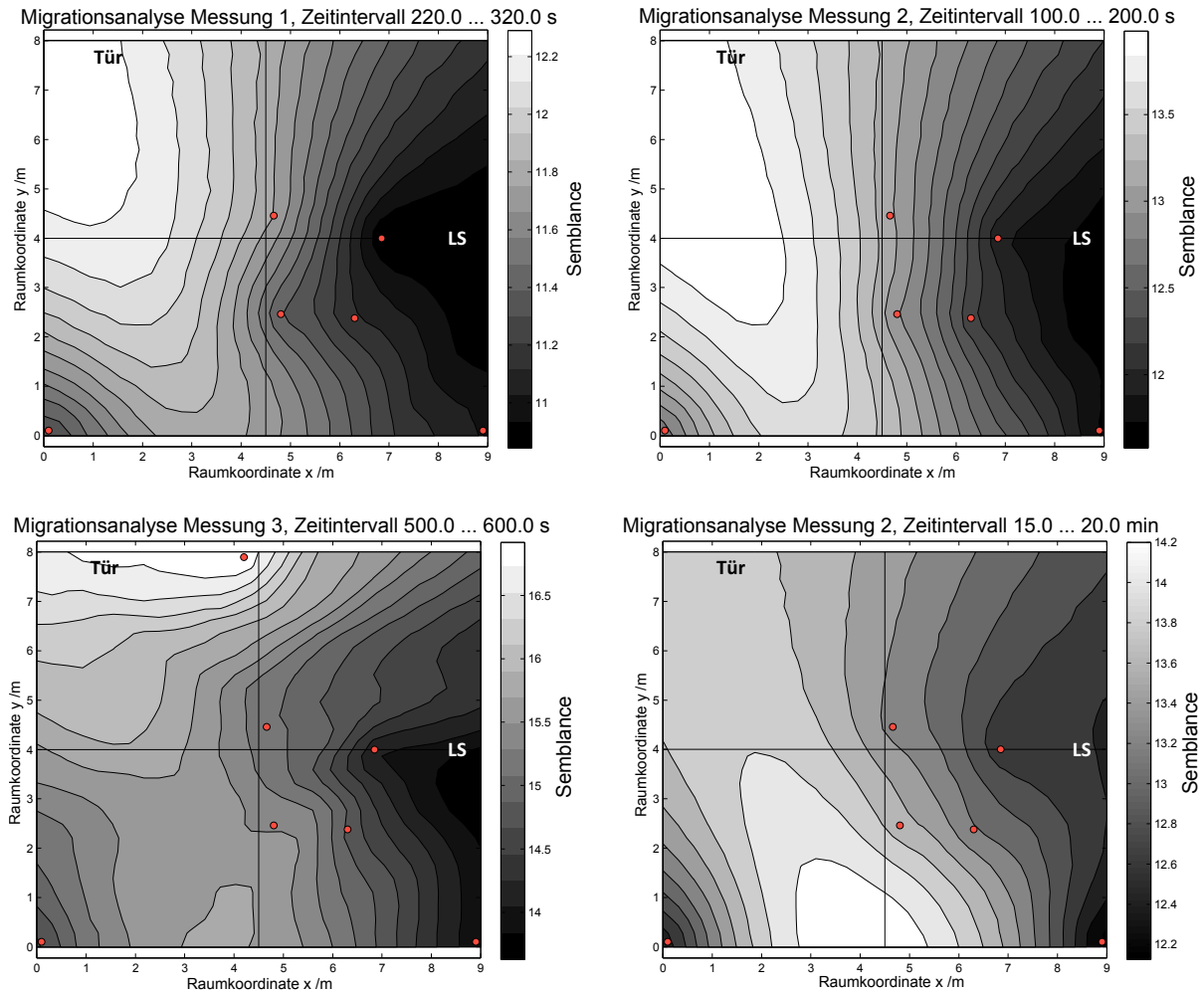
Die Implementierung des Algorithmus nach [Hor10] befindet sich in Kapitel D.2.5.

Die Ergebnisse der Migrationsanalyse von Einschwingvorgängen in den Fremdgeräuschaufnahmen deuteten einheitlich auf die Türe des Raumes hin. Zufällig gewählte Analysezeitpunkte zeigten bei ganz unterschiedlichen Orten eine hohe Semblance. Oft nahm auch ein Gebiet zwischen Türe und gegenüberliegender Wand höhere Werte an. In Abbildung 4.10 sind Ergebnisse der Migrationsanalyse dargestellt. Die Dynamik der Semblance innerhalb einer Grafik ist relativ klein gegenüber der maximal möglichen Semblance. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit einer lokalisierbaren Quelle verringert. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse kann deshalb nicht beurteilt werden. Dazu müsste das Verfahren mit bekannten Quellen, Positionen und Anregung überprüft werden. Die Empfängerpositionen wären für weitere Messungen und Ortungsversuche zu überdenken.

## 4.5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Fremdgeräusche, die in den Raum gelangen, werden durch das modale Schallfeld gefiltert und ortsabhängig gemäß der Schalldruckverteilung der Moden verstärkt. Die betroffenen Frequenzbereiche

befinden sich bei 9 Hz und 11 bis 16 Hz. Die Verstärkung durch höhere Moden konnte mit dem verwendeten Equipment wegen Eigenrauschens nicht erfasst werden. Das zeitliche Verhalten der Anregung ist unvorhersehbar. Die Störsignale sind im Pegel zeitvariant und können zu Zeiten mit weniger Fremdgeräuschanregung in Varianz und Pegel abnehmen. Die Anzahl der durchgeführten Messungen reicht nicht aus, um vorhersagbare Regelmäßigkeiten in den Störungen zu erkennen. Dies könnte durch regelmäßige Messungen untersucht werden. Für den Messalltag ist es wichtig, bei Messungen im Frequenzbereich oberhalb der Fremdgeräusche ein Hochpassfilter einzusetzen, das die Fremdgeräusche nahezu entfernt. Dadurch wird die Dynamik der Messungen weniger beeinträchtigt.



**Abb. 4.10.:** Räumliche Semblance aus den Ergebnissen der Migrationsanalyse. **Oben links:** Messung 1 in einem Zeitintervall mit Einschwingvorgang. **Oben rechts:** Messung 2 in einem Zeitintervall mit Einschwingvorgang. **Unten links:** Messung 3 bei Einschwingvorgang. **Unten rechts:** für Messung 2 bei in einem willkürlich gewählten Zeitintervall.

Die Skalierung ist nicht einheitlich, weil die unterschiedliche Anzahl an Messpunkten (Punkte in den Grafiken) zu unterschiedlichen maximalen Semblance-Werten führt. Durch einheitliche Skalierung ginge der Kontrast verloren. Die Ergebnisse können eine Tendenz für einen möglichen Eintrittsort geben. Für sichere Aussagen müsste das Verfahren genauer untersucht werden.

## 5. Schlussfolgerungen für Messungen im reflexionsarmen Raum

Solange Messungen oberhalb der Grenzfrequenz im Freifeld stattfinden, können diese als Freifeldmessungen deklariert werden. Um die Dynamik der Messgeräte ausnutzen zu können, empfiehlt sich das Hochpassfilter im Messverstärker einzusetzen, das die Fremdgeräusche herausfiltert. Sobald unterhalb der Grenzfrequenz Messungen durchgeführt werden, müssen weitere Faktoren Beachtung finden, die in den Kapiteln 5.1 und 5.2 näher erläutert werden. Im Frequenzbereich der Fremdgeräusche ist der Signal-Rauschabstand bei Messungen zu beachten, hierzu mehr in Kapitel 5.3.

### 5.1. Messungen bei Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenz des reflexionsarmen Raumes

Messungen unterhalb der Grenzfrequenz sind keine Freifeldmessungen, da die Freifeldbedingung hier nicht mehr erfüllt ist. Durch die Substitutionsmethode können dennoch genaue Messungen erfolgen. Bei der Substitutionsmethode wird das Messobjekt mit einem Prüfnormtal verglichen. Eine Voraussetzung ist die gleiche Positionierung der Messobjekte, da die Übertragungsfunktionen ortsabhängig sind. Das Hochpassfilter sollte auch möglichst bei Messungen unterhalb der Grenzfrequenz zum Einsatz kommen. Im Frequenzbereich der Fremdgeräuscheinwirkung sind Positionen zu wählen, an denen der Signal-Rauschabstand möglichst hoch ist. Die Messungen sollten nach Möglichkeit zu einem Zeitpunkt mit schwacher Fremdgeräuscheinwirkung stattfinden. Außerdem müsste ein Messunsicherheitsbudget nach [DIN99] aufgestellt werden, in das auch Messunsicherheiten einfließen, die z. B. durch Fremdgeräusche und Abweichungen bei der Positionierung verursacht werden. Ein kurzer Einblick hierzu wird in Kapitel C gegeben.

Eine alternative Idee für Messungen bei tiefen Frequenzen ist die Messung in einem kleineren abgeschlossenen Hohlraum, der in der Mitte des reflexionsarmen Raums positioniert ist. Dadurch würde das Übertragungsproblem gelöst und die Fremdgeräuscheinwirkung vermindert. Denn der reflexionsarme Raum bietet mehr Schalldämmung als die anderen zur Verfügung stehenden Messräume. Ist die Durchführung einer Druckkammerkalibrierung möglich, so kann auch diese für tiefe Frequenzen eine Alternative sein.

### 5.2. Ruhegeräuschemessungen und Ermittlung der Ersatzgeräuschpegel von Mikrofonen

Für Ruhegeräuschemessungen und zur Ermittlung der Ersatzgeräuschpegel von Mikrofonen ist der ideale Messort im Raumzentrum, da hier die Fremdgeräuscheinwirkung am geringsten ist. Zusätzlich ist die

Anbringung einer luftdicht abschließenden Abdeckkappe auf der Mikrofonkapsel empfehlenswert (siehe Abbildung A.1). Dadurch gelangen noch weniger Störgeräusche zur Membran.

### 5.3. Entwicklung eines Algorithmus zur Kartierung des SNR für einen gewählten Frequenzbereich unter Verwendung der Ergebnisse aus den Fremdgeräuschmessungen und des Modalmodells

Ziel ist es, für einen gewählten Frequenzbereich diejenigen Messorte zu markieren, die bei allen Frequenzen einen Signal-Rauschabstand über einem Mindest-Signal-Rauschabstand aufweisen.

#### 5.3.1. Systemtheoretische Überlegungen

Zur Bestimmung des frequenz- und ortsabhängigen Signal-Rauschverhältnisses werden die Leistungsdichtespektren der Nutzenregung  $S_{yy}$  und die der Fremdgeräusche  $S_{y,\text{FremdGer}}$  aufeinander bezogen.

$$S_{SNR} = \frac{S_{yy}}{S_{y,\text{FremdGer}}} \quad (5.1)$$

Die Eigenfunktionen der Sender-Empfänger Kombinationen und die Eigenwerte aus der Modalanalyse können für die Nutzenregung verwendet werden. Nach der ersten Wiener-Lee-Beziehung im Frequenzbereich gilt:

$$S_{yy} = S_{xx} |H(j\omega)|^2 \quad (5.2)$$

Die Übertragungsfunktion  $H(j\omega)$  wird aus dem modalen Modell mit

$$H(j\omega, r) = \sum_n \frac{\Psi_{n,\text{ME'scope}}(r)}{\omega^2 - \omega_n^2 - 2j\omega\delta_n} \quad (5.3)$$

berechnet. Dabei ist  $r$  der Index des Empfänger-Ortes im Raum (Index, weil es ME'scope Eigenfunktionen sind).  $S_{xx}$  ist das Leistungsdichtespektrum der Nutzenregung und  $S_{yy}$  das resultierende Leistungsdichtespektrum im Raum an der Stelle  $r$ .

Die Sender-Eigenfunktionen der Fremdgeräusche sind unbekannt. Für gewählte Orte im Raum gibt es die Leistungsdichtespektren der Fremdgeräuschmessungen, die in Abbildung 4.7 und 4.8 dargestellt sind. Aus diesen kann man die Stärke der Anregung der Moden schätzen und ein virtuelles modales Modell der Fremdgeräuschregung erstellen. So können auch hier die Übertragungsfunktionen berechnet werden. Über die erste Wiener-Lee-Beziehung gilt für die Fremdgeräusche im Raum

$$S_{y,\text{FremdGer}} = S_{x,\text{FremdGer}} |H_{\text{FremdGer}}(j\omega)|^2 \quad (5.4)$$

Für  $S_{x,\text{FremdGer}}$  wird eine bandbegrenzte weiße Anregung angenommen, da der betroffene Frequenzbereich nicht größer als eine Oktave ist und die Frequenzabhängigkeit in die Übertragungsfunktionen durch die Schätzung aus den Leistungsdichtespektren der Fremdgeräuschmessungen eingegangen ist. Außerdem wird angenommen, dass nur die ersten beiden Resonanzen bei 12.5 Hz und 13.9 Hz durch die Fremdgeräusche angeregt werden. Die Anregung bei 9 Hz wird nicht berücksichtigt, da sie durch das Modalmodell nicht gegeben ist und weil die Übertragungsfunktionen vom FFT-Analysator bei dieser Frequenz im Rauschen untergingen.



### 5.3.2. Umsetzung des Algorithmus in Matlab

Das gesamte Programm besteht aus mehreren Matlab-Skripten, die in Kapitel D.2.4 aufgeführt sind. Zum Lesen der modalen Parameter aus einer von ME'scope exportierten „Shapetable“ (\*.shs-File) dient die Funktion `readSHS()`. Die Positionsdaten der Empfängerpunkte aus der Modalanalyse, sowie die gemittelten Leistungsdichten der Fremdgeräusche sind in \*.mat-Files als Matlab-Variablen gespeichert und können dadurch mit wenig Rechenaufwand geladen werden.

Die Berechnung des SNR erfolgt in `init_SNR_modalmodell_RAR.m`: Nachdem die modalen Parameter, alle Positionsdaten und die gemittelten Leistungsdichtespektren geladen sind, werden die Übertragungsfunktionen für die Nutzenregung nach dem Modalmodell berechnet.

Die Erstellung des virtuellen modalen Modells für die Fremdgeräuschanregung stellt eine besondere Herausforderung dar, weil die Fremdgeräusche nur an vier Messpunkten auf der Kreisfläche bekannt sind, aber die Übertragungsfunktionen zur Rauschanregung für jeden Messpunkt geschätzt werden sollen. Der Ansatz zur Lösung des Problems ist die Berechnung der Pegeldifferenz zwischen der ersten und zweiten Resonanzfrequenz. Die Pegeldifferenz zwischen den ersten beiden Resonanzen wird für die Leistungsdichtespektren der Fremdgeräusche und für die Eigenfunktionen der zwei Moden an den korrespondierenden Orten berechnet. Anschließend wird die Differenz zwischen den Pegeldifferenzen gebildet. Statt der Anwendung der Eigenfunktionen wurde auch die Nutzung der Pegeldifferenzen der Resonanzen von den Übertragungsfunktionen aus dem Modalmodell erprobt. Daraus resultierten jedoch keine schlüssigen Ergebnisse. Nach der Theorie müsste die Differenz aus den Pegeldifferenzen der Resonanzen von Fremdgeräusch und Modalmodell für jeden Ort gleich sein, weil die Fremdgeräusche durch die Moden gefiltert werden. Anders ausgedrückt regt die Fremdgeräuschquelle die Moden unterschiedlich stark an, aber im räumlichen Verlauf sind die Eigenfunktionen theoretisch proportional. Bei den Berechnungen im Algorithmus konnten nur Annäherungen erreicht werden. Das bedeutet, dass die Differenz der Pegeldifferenzen von den Resonanzen nicht an jedem Ort gleich war. Mögliche Gründe hierfür können z. B. die Überlagerung der Moden in den Fremdgeräuschmessungen oder die für tiefe Frequenzen niedrige Frequenzauflösung der Leistungsdichtespektren der Fremdgeräusche sein. Ein anderer Grund könnte die Anregung durch mehrere Fremdgeräuschquellen an unterschiedlichen Orten sein. Aus der Differenz der Pegeldifferenzen der Resonanzen werden Faktoren für die unterschiedlichen Orte berechnet und die Eigenfunktion der zweiten Mode wird mit dem Mittelwert der Faktoren gewichtet. Die neuen Eigenfunktionen werden dann zur Berechnung der „Übertragungsfunktionen“ der Fremdgeräusche verwendet. Daraufhin kann die Leistungsdichte  $S_{y,\text{FremdGer}}$  und der Signal-Rauschabstand berechnet werden. Die Genauigkeit der Schätzung wurde nicht weiter untersucht. Die Ergebnisse sind vermutlich keine exakte Nachbildung der Sender-Eigenfunktionen der Fremdgeräusche. Der berechnete Signal-Rauschabstand gibt deshalb eher eine Tendenz an. In Anbetracht der zeitvarianten Fremdgeräusche wird es ohnehin nötig sein, den Signal-Rauschabstand vor und nach einer Messung zu bestimmen.

In dem Skript `plot_SNR_frequencyrange.m` werden Messpunkte gefunden, die für einen angegebenen Frequenzbereich in allen betroffenen Frequenzen einen Signal-Rauschabstand größer 10 dB haben. Anschließend werden die Ergebnisse in einer Grafik dargestellt.

Mit dem Algorithmus ergeben sich für die Nutzenregung mit Sender 2 die in den Abbildungen 5.1, 5.2 und 5.3 dargestellten Messpunkte. Für Sender 1 sind die SNR-Werte niedriger (siehe Abbildung 5.4). Eine dreidimensionale Darstellung des geschätzten Signal-Rauschabstandes für Sender 2 wird in Abbildung 5.5 dargestellt.

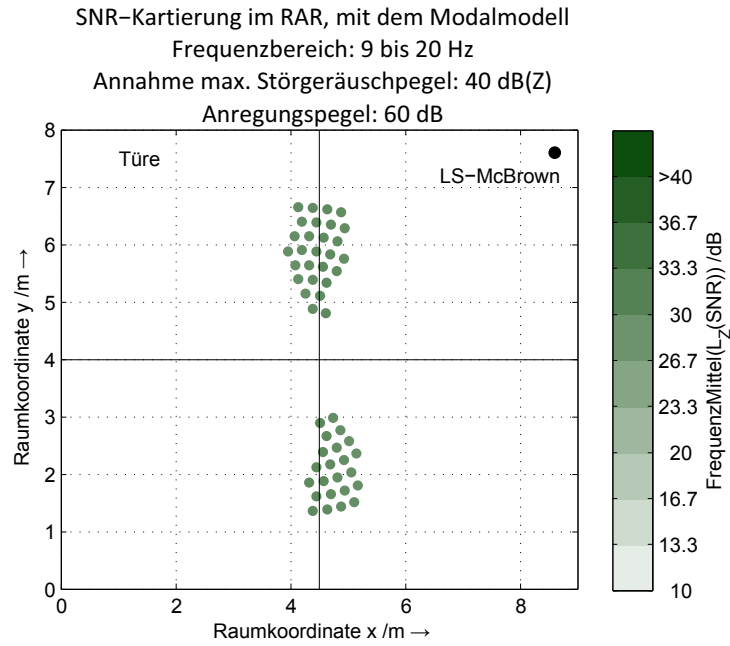


Abb. 5.1.: Kartierung für Messpunkte mit einem Signal-Rauschabstand höher als 10 dB für den Frequenzbereich 9 bis 20 Hz. Anregung des Schallfeldes durch Sender 2.

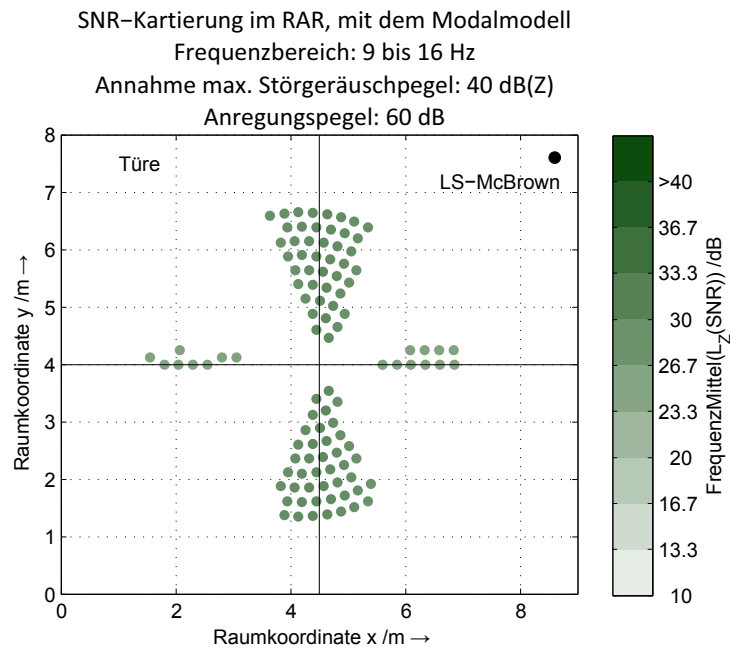


Abb. 5.2.: Kartierung für Messpunkte mit einem Signal-Rauschabstand höher als 10 dB für den Frequenzbereich 9 bis 16 Hz. Anregung des Schallfeldes durch Sender 2.

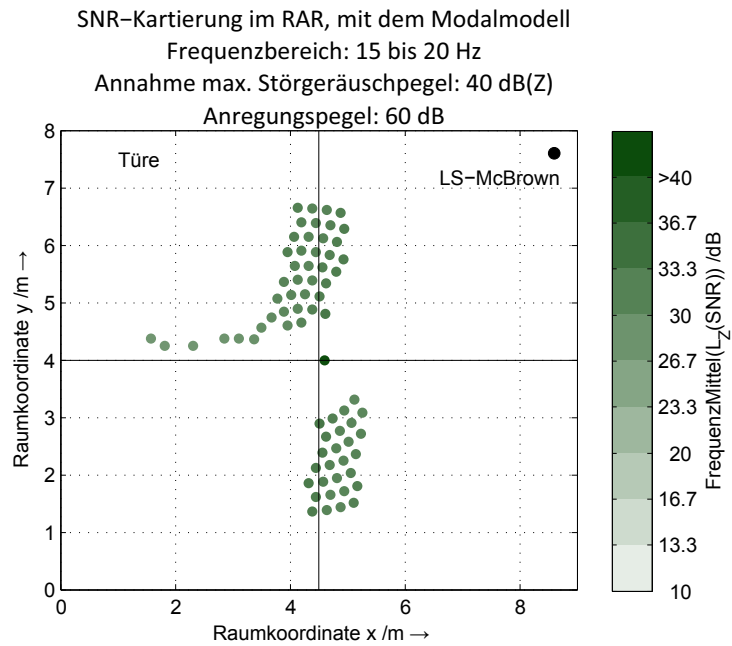


Abb. 5.3.: Kartierung für Messpunkte mit einem Signal-Rauschabstand höher als 10 dB für den Frequenzbereich 15 bis 20 Hz. Anregung des Schallfeldes durch Sender 2.

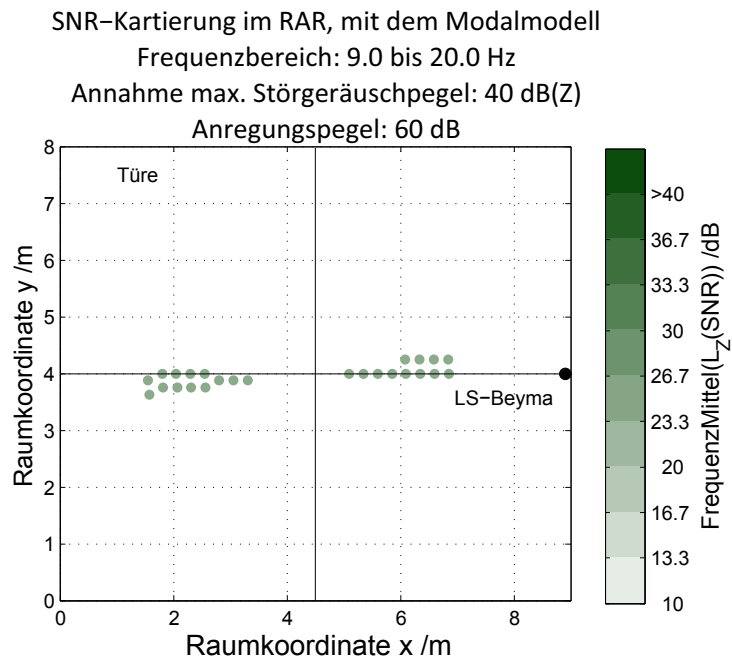
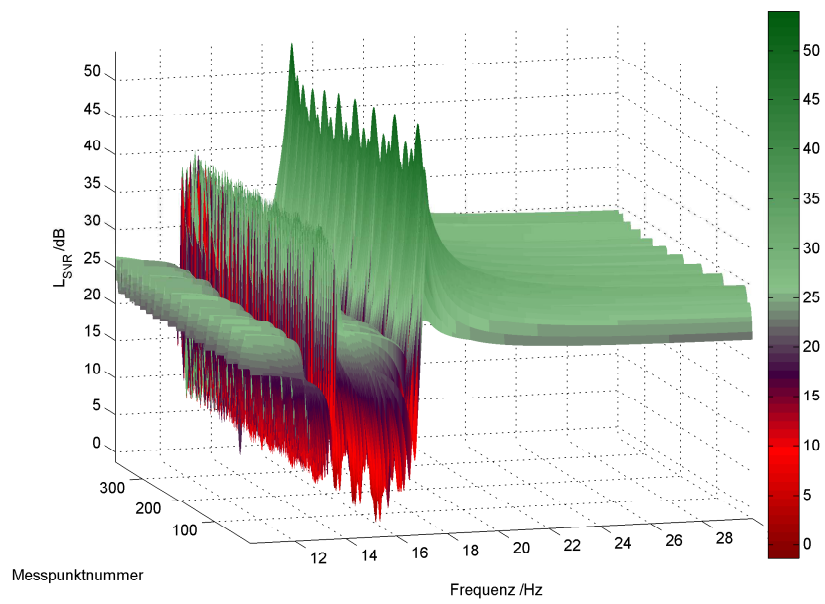


Abb. 5.4.: Kartierung für Messpunkte mit einem Signal-Rauschabstand höher als 10 dB für den Frequenzbereich 9 bis 20 Hz. Anregung des Schallfeldes durch Sender 1.



**Abb. 5.5.:** Mit dem Modalmodell und den Ergebnissen der Fremdgeräuschmessungen geschätzter Signal-Rauschabstand über der Frequenz und dem Messort-Index dargestellt. die Schätzung erfolgte für Sender 2.

# A. Gerätelisten, Datentabellen und große Abbildungen

## A.1. Geräteliste zur Modalanalyse in Kapitel 3

**Tab. A.1.:** Geräte zur Messung der Übertragungsfunktionen im reflexionsarmen Raum

Typ	Bezeichnung	Zweck
FFT-Analysator	Ono Sokki CF 6400	Übertragungsfunktionen ermitteln
Messverstärker	B&K Typ 2636	Mikrofonsignal verstärken
Endverstärker	NAD 214	Messsignal verstärken
Filter	SRS SR 560	Tiefpassfilterung des Sweepsignals
Schrittmotoransteuerung	Phytron IXE- $\alpha$ -C-T	Schrittmotor über GPIB ansteuern
Schrittmotor	Phytron	Schwenkarm + Mikrofon drehen
Mikrofon	B&K Typ 4133	Empfänger
Lautsprecher	Beyma 15 XA 38 ND	Sender 1
Lautsprecher	McBrown GT 38/80	Sender 2
Computer	PC + GPIB-Karte + VB6.	Messprogramm ausführen

## A.2. Verwendete Winkeltabelle zur Positionierung des Mikrofons auf Kreisbahnen

**Tab. A.2.:** Die Winkeltabelle wird in dem Messprogramm „Kreisbahnen FRF“ zur Positionierung des Mikrofons verwendet.

Radius/m	Winkel /°	Anzahl
2.65	5.37	67
2.4	6	60
2.15	6.66	54
1.9	7.5	48
1.65	8.56	42
1.4	10.29	35
1.15	12.41	29
0.9	15.64	23
0.65	22.5	16
0.4	36	10
0.15	90	4

### A.3. Geräteliste zur Fremdgeräuschmessung im reflexionsarmen Raum

**Tab. A.3.:** Verwendete Geräte zur Messung der Fremdgeräusche im reflexionsarmen Raum

Typ	Bezeichnung	Zweck
Interface	RME Fireface 800	AD-Wandlung
Mikrofonvorverstärker	RME OctaMic II	Mikrofonsignal verstärken
Kondensatormikrofone (8x)	Behringer B-5, Kugel	Druckempfänger
Multicore-Kabel		
Kalibrator	B&K Typ 4231	Kalibrieren der Mikrofone
Adapter	Sonderanfertigung	zwischen Kalibrator und Mikrofon
Software	Samplitude	DAW

### A.4. Kartesische Koordinaten der Mikrofonpositionen für die Fremdgeräuschmessungen

**Tab. A.4.:** Kartesische Koordinaten der Mikrofone für die Fremdgeräuschmessungen. Die Struktur-Punkt Nr. ist der Punktindex in der Kreisfläche aus der Modalanalyse. Alle Werte beziehen sich auf den Rotationsmittelpunkt.

MP	Struktur-Punkt Nr.	x/m	y/m	z/m (0 m= LS-Ebene)
MP1	–			-0.6
MP2	237	0.603	1.54	-0.75
MP3	7	2.1	1.62	-0.75
MP4	–			-0.6
MP5	67	2.65	0	-0.75
MP6	–	1 m vor LS		0
MP7	372	0.46	-0.46	-0.75
MP8	–	–	–	–

### A.5. Ergebnisse der Eigengeräuschmessungen der Messkette für die Fremdgeräuschmessungen und Frequenzgang der RME-Geräte

Zur Eigengeräuschmessung hing das Mikrofon mit aufgesetzter Kappe im Raumzentrum des reflexionsarmen Raums.



Abb. A.1.: Behringermikrofon mit aufgesetzter Kappe, die zur Eigengeräuschmessung die Membran luftdicht abschließt.

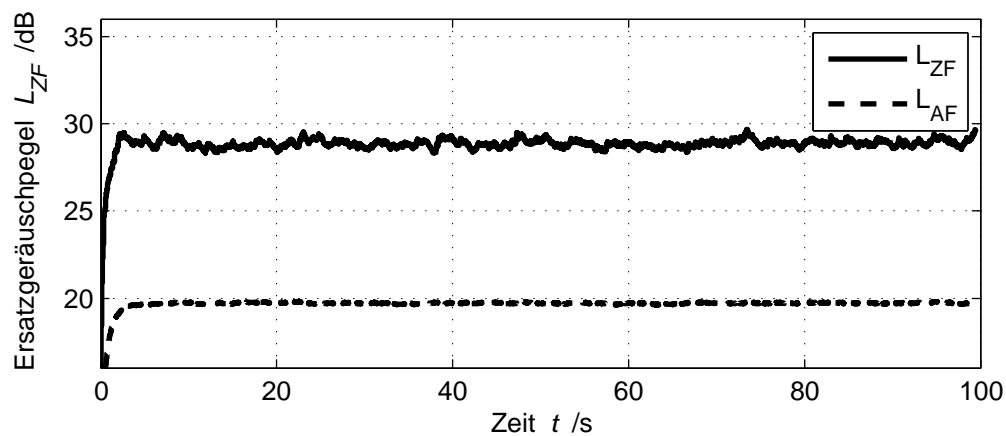


Abb. A.2.: Äquivalenter „Schalldruck“-Pegolverlauf der Eigengeräuschmessung über der Zeit. Im arithmetischen Mittelwert über den Zeitraum von 4 s...99.5 s beträgt der  $\bar{L}_{ZF} = 28.9$  dB, die Standardabweichung  $SD\{L_{ZF}\} = 0.21$  dB. Daraus kann letztendlich geschlossen werden, dass der frequenzunbewertete Ersatzgeräuschpegel dieser Mikrofone in  $L_{Zers} \approx 29$  dB und der A-bewertete der Vollständigkeit halber  $L_{Aers} \approx 20$  dB beträgt.

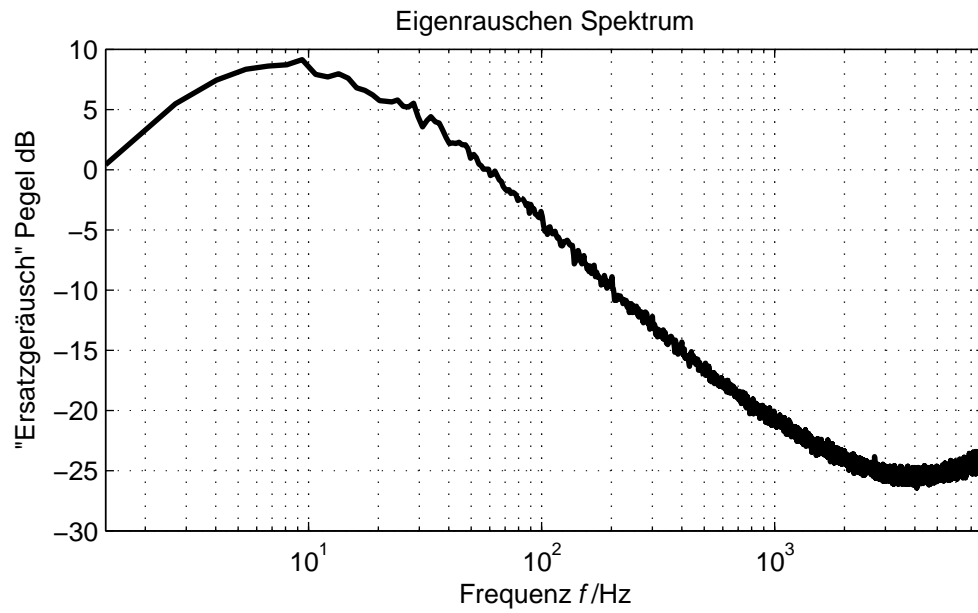


Abb. A.3.: Leistungsdichtespektrum des Eigenrauschens eines Behringer B-5 Mikrofons und der restlichen Messkette (wie ein Kanal in Abbildung 4.2).

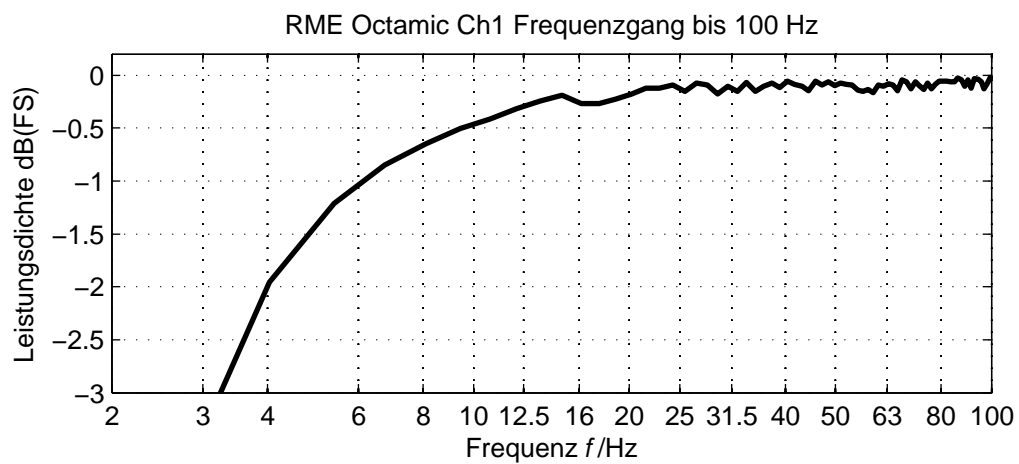


Abb. A.4.: Frequenzgang eines RME OctaMic II-Kanals. Gemessen mit pseudo-randomisiertem periodischem Rauschen, das vom Signalausgang des Ono Sokki CF-6400 in den Eingang des Interfaces asymmetrisch eingespeist und mit Samplitude aufgenommen wurde.



## B. Mathematische Herleitungen und Verfahren

### B.1. Mikrofonpositionsberechnung für gleiche Abstände auf einer Kreisfläche, hergeleitet über den Kosinussatz und eine simple Methode

Durch den Kosinussatz

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos(\alpha) \quad (\text{B.1})$$

kann bei einer vorgegebenen Strecke  $d$  in einem gleichschenkligen Dreieck der Winkel berechnet werden, mit dem die Strecke  $d$  zwischen Start und Endpunkt bei einem Radius  $r$  zurückgelegt wird. Sei  $a = d$ ,  $r = b = c$  und  $\alpha = \varphi$ , so gilt:

$$\begin{aligned} d^2 &= 2r^2 - 2r^2 \cos(\varphi) \\ \varphi &= \cos^{-1}(1 - d^2/2r^2). \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

Mit B.2 wird zwar der genaue Winkel für  $d$  beschrieben, aber möchte man mit diesem Winkel die Punkte auf einem Kreis definieren, so wird nur im Fall, dass  $2\pi/\varphi$  einer ganzen Zahl entspricht, eine gleichmäßige Abdeckung möglich. In allen anderen Fällen ist der Abstand zwischen dem letzten und dem ersten Punkt ungleich zu  $d$ . Aus diesem Grund wurde das Verhältnis von  $2\pi/\varphi$  gerundet und danach der Winkel erneut berechnet, sodass der letzte Abstand zu allen anderen gleich ist.

Die simple Methode ist, den Winkel über den Kreisumfang  $U$  zu berechnen, denn mit

$$U = 2\pi r \quad (\text{B.3})$$

und

$$Q = U/d \quad (\text{B.4})$$

kann durch Runden die Anzahl der Messpunkte mit

$$N = \lfloor Q + 0,5 \rfloor$$

bestimmt werden. Das Winkelinkrement in Radian lässt sich durch

$$\Delta\varphi = 2\pi/N \quad (\text{B.5})$$

berechnen.

## B.2. Leistungsdichtespektren nach Welch und deren Kalibrierung

Die Schätzung von Leistungsdichtespektren nach dem in [Wel67] beschriebenen Verfahren geschieht über die Mittelung modifizierter Periodogramme.

Mit der Fouriertransformierten der gefensterter Blöcke

$$X_{N,r}(k) = \mathcal{F}\mathcal{F}\mathcal{T} \{x_{N,r}(n)w_N(n)\} \quad (\text{B.6})$$

und der Energie der Fensterfunktion

$$NU_N = \sum_{n=1}^N w_N^2(n) \quad (\text{B.7})$$

kann das Autoleistungsdichtespektrum mit dem Mittelwert aus  $R$  durch die Fensterenergie geteilten Periodogramme der Länge  $N$  folgendermaßen geschätzt werden:

$$\hat{S}_{xx}(k) = \frac{1}{R} \frac{1}{NU_N} \sum_{r=1}^R X_{N,r}^*(k) X_{N,r}(k) \quad (\text{B.8})$$

Dabei ist  $N$  die Länge der Blöcke,  $k$  der Frequenzindex,  $R$  die Anzahl der Blöcke,  $r$  der Blockindex,  $f = kf_s/N$  der Frequenzvektor und  $f_s$  die Samplingfrequenz.

Ein Autokorrelationspektrum ist die Fouriertransformierte der Autokorrelationsfunktion. Da die Autokorrelation im Zeitbereich über eine Faltung des zueinander zeitverkehrten Signals berechnet wird, benötigt dies mehr Rechenleistung. Im Frequenzbereich ist lediglich die Erzeugung des konjugiert-komplexen Spektrums und eine komponentenweise Multiplikation nötig.

Bei dem Schätzverfahren nach Welch handelt es sich um einen erwartungstreuen Schätzer, was bedeutet, dass mit zunehmender Anzahl  $R$  der gemittelten Periodogramme die Varianz des Schätzers abnimmt. Bei einem Overlap um 50 % nimmt die Varianz durch die erhöhte Anzahl  $R$  der Blöcke mit

$$\text{Var}\{\hat{S}_{xx}\} \approx \frac{11}{9R} S_{xx}^2 \quad (\text{B.9})$$

niedrigere Werte an.

Die Kalibrierung der geschätzten Leistungsdichten kann folgendermaßen vorgenommen werden: Durch die Diskretisierung des Signals unterscheiden sich die geschätzten diskreten von den kontinuierlichen Leistungsdichten. Der Energiegehalt eines Frequenzbins hängt von dessen Bandbreite, also von der FFT-Länge und Samplingfrequenz ab.

Im Analogen ist Zusammenhang im Zeit- und Bildbereich

$$\tilde{x}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \Gamma_{xx}(f) df, \quad (\text{B.10})$$

im Diskreten ist der Zusammenhang folgendermaßen:

$$\frac{1}{N} \sum x^2(n/f_s) = \frac{f_s/N}{f_s} \sum S_{xx}(k) \quad (\text{B.11})$$

wobei  $S_{xx} = f_s \Gamma_{xx}$ .

Praktisch bedeutet das, dass die Leistung des Leistungsdichtespektrums des Kalibriersignals durch  $\tilde{x}_{cal}^2 = \frac{1}{N} \sum S_{xx,cal}$  und der Differenzpegel zum bekannten Kalibriersignalpegel  $L_{cal}$  folgendermaßen berechnet wird:

$$dL_{cal} = L_{cal} - 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum S_{xx,cal} \right). \quad (\text{B.12})$$

In Gl. B.12 ist zu beachten, dass bei einseitigen Leistungsdichten 3 dB subtrahiert werden müssen, da nur ein zweiseitiges Spektrum die gesamte Leistung des Signals enthält. Die kalibrierten Pegel des Leistungsdichtespektrums berechnen sich mit

$$L_{S_{xx}}(f) = 10 \log(S_{xx}(f)/f_s) + dL_{cal} . \quad (\text{B.13})$$

Diese Kalibriermethode wurde nach [Bla09] und nach einem vom gleichen Autor erstellten Scilab-Skript in dieser Arbeit angewendet.

## C. Messunsicherheiten

Messunsicherheiten werden nach dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) berechnet. Eine deutsche vorläufige Fassung ist die DIN ENV 13005 [DIN99].

Messwerte weichen von dem sog. wahren Wert mit einer bestimmten Messunsicherheit ab. Das bedeutet, dass sich bei wiederholter Messung unter gleichen Messbedingungen unterschiedliche Messwerte ergeben. Je nach Ausmaß der Messunsicherheit streuen die Messwerte in einem bestimmten Intervall um einen mittleren Wert. Deshalb werden Messwerte oft in der Form

$$(\text{Messmittelwert} \pm \text{Messunsicherheit})\text{Einheit}$$

angegeben.

### C.1. Empirischer-Mittelwert und Stichproben-Standardabweichung

Der Mittelwert aus mehreren Messergebnissen unter gleichen Bedingungen wird Empirischer-Mittelwert genannt und berechnet sich nach

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i . \quad (\text{C.1})$$

Die Stichproben-Standardabweichung  $\text{Std}\{x\}$  liefert einen Wert der Streuung. Ein Messwert liegt mit 68.3% Wahrscheinlichkeit im Intervall  $\bar{x} \pm \text{Std}\{x\}$ . Die Stichproben-Standardabweichung berechnet sich über

$$\text{Std}\{x\} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} , \quad (\text{C.2})$$

dabei wird eine Gauss-Normalverteilung angenommen.

### C.2. Berechnung der Messunsicherheit

Eine Messunsicherheit setzt sich aus systematischer und zufälliger Messunsicherheit zusammen.

$$u = u_s + u_z \quad (\text{C.3})$$

Die zufällige Komponente wird durch Mittelung mehrerer Stichproben zunehmend „herausgemittelt“, wohingegen die systematische Komponente unbeeinflusst bleibt und in den empirischen-Mittelwert eingeht.

$k$	Wahrscheinlichkeit
1	68.3 %
2	95.5 %
3	99.7 %

Tab. C.1.: Faktor für Vertrauensbereich einer erweiterten Messunsicherheit

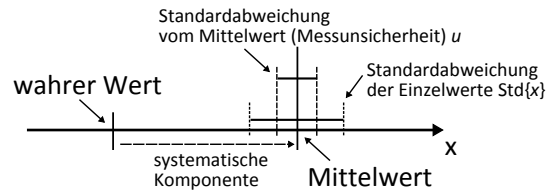


Abb. C.1.: Prinzipielle Darstellung von Messwert und wahren Wert. Der Messwert unterliegt systematischen und zufälligen Messunsicherheiten.

Die Messunsicherheit ist nicht die Stichproben-Standardabweichung, wie irrtümlich angenommen werden könnte. Sondern die Messunsicherheit  $u$  ergibt sich aus der Standardabweichung des Mittelwerts mit

$$u = \frac{1}{\sqrt{N}} \text{Std}\{x\} \quad . \quad (\text{C.4})$$

Für die Messwerte können unterschiedliche Verteilungen angenommen werden, sodass die Messunsicherheit gewichtet werden muss. Bei einer Gaussverteilung ist die Gewichtung 1 und bei einer Rechteckverteilung wird mit 1/3 gewichtet.

### C.3. Kombinierte Messunsicherheit

Die kombinierte Messunsicherheit besteht aus mehreren Unsicherheiten, die durch mehrere Eingangsgrößen  $X_i$  entstehen. Die einzelnen Messunsicherheiten jeder Eingangsgröße werden mit einem Sensitivitätskoeffizient bewertet und quadriert aufsummiert. Damit berechnet sich die kombinierte Messunsicherheit durch

$$u_c^2(Y) = c_1^2 u^2(X_1) + c_2^2 u^2(X_2) + \dots + c_N^2 u^2(X_N) \quad . \quad (\text{C.5})$$

Die Sensitivitätskoeffizienten berechnen sich aus der Ableitung der Modellgleichung nach der betroffenen Eingangsgröße.

$$c_i = \frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_N)}{\partial X_i} \quad (\text{C.6})$$

### C.4. Erweiterte Messunsicherheit

Die erweiterte Messunsicherheit gibt eine größere Wahrscheinlichkeit für das Intervall, in dem sich die Messwerte aufhalten. Dabei wird die Messunsicherheit mit einem Faktor  $k$  bewertet. Mit ansteigendem  $k$  erhöht sich der sogenannte Vertrauensbereich (Tabelle C.1), wobei die Messunsicherheit um den Faktor  $k$  größer wird.

$$U = k u_c \quad (\text{C.7})$$

## C.5. Ansätze für ein Messunsicherheitsbudget im Frequenzbereich der Fremdgeräuscheinwirkung

Für eine Messkette zur Messung bei tiefen Frequenzen ergeben sich mehrere Eingangsgrößen, die zu einer kombinierten Messunsicherheit führen. Die Eingangsgrößen werden durch  $\delta$ -Kenngrößen dargestellt. Ihnen sind Messunsicherheit, Sensitivitätskoeffizient und Wahrscheinlichkeitsverteilung zuzuordnen. Die Ermittlung der Kenngrößen teilt sich in zwei Methoden auf: Methode A, Ermittlung durch Messung und Analyse der Unsicherheiten und Methode B, Schätzung durch Erfahrungswerte.

Auf die allgemeinen Eingangsgrößen wie beispielsweise Unsicherheiten von Messgeräten oder Klimaeinflüsse wird nicht weiter eingegangen, sie werden hier zusammengefasst als  $\delta_{\text{Allg}}$  zur Kenntnis genommen. Zu den allgemeinen Eingangsgrößen kommen speziell die Einflüsse der Fremdgeräuscheinwirkung  $\delta_{\text{FremdGer}}$ , das Mikrofonrauschen  $\delta_{\text{MicNoise}}$  und die Positionierungsunsicherheit  $\delta_{\text{Pos}}$ . Die Eingangsgrößen sind in diesem Fall frequenzabhängig. Für jede betrachtete Frequenz ergibt sich eine eigene Messunsicherheit. Der Ansatz zur Berechnung eines Schalldruckpegels bei einer Frequenz im Bereich der Fremdgeräuscheinwirkung lässt sich folgendermaßen ausdrücken:

$$L(f) = \overline{L_{\text{Mess}}}(f) + \delta_{\text{Allg}} + \delta_{\text{FremdGer}}(f) + \delta_{\text{MicNoise}}(f) + \delta_{\text{Pos}} \quad . \quad (\text{C.8})$$

In Tabelle C.2 wird ein Beispiel für ein Messunsicherheitsbudget einer Pegelmessung im Frequenzbereich der Fremdgeräusche aufgeführt.

Kenngröße	Schätzwert /dB	Messunsicherheit $u_i$ /dB	Verteilung	Sensitivitäts- koeffizient $c_i$	Beitrag zur kombinierten Unsicherheit $c_i u_i$ /dB
Messmittelwert	$\overline{L_{\text{Mess}}}$		Normal	1	
$\delta_{\text{Allg}}$	0	0.06	Normal	1	0.06
$\delta_{\text{FremdGer}}$	$\overline{L_{\text{SppFremdGer}}}$	1.5	Normal	1	1.5
$\delta_{\text{MicNoise}}$	$\overline{L_{\text{Z,ers}}}$	0.03	Normal	1	0.03
$\delta_{\text{Pos}}$	0	0.033	Rechteck	1	0.033

**Tab. C.2.:** Beispiel für eine Tabelle eines Messunsicherheitsbudgets für Schalldruckmessungen im Frequenzbereich der Fremdgeräusche. Alle Werte sind frequenzabhängig. Die  $\delta$ -Kenngrößen mit einem Schätzwert  $\neq 0$  dB, haben eine systematische Komponente, die im Ergebnis je nach Abstand zum Messmittelwert korrigiert werden muss. Die systematischen Komponenten sind außerdem vom SNR abhängig. Die in die Tabelle eingesetzten Werte sind an dieser Stelle grobe Richtwerte, die eine Größenordnung angeben. Zusätzlich müsste die Betrachtung für jede Frequenz einzeln stattfinden und an die Einflüsse der verwendeten Geräte angepasst werden.

## D. Quellcode

Im Folgenden werden Teile des Quellcodes aufgeführt, der in Eigenarbeit entstanden ist. Teile, die nicht in Eigenarbeit entstanden sind, werden entweder kenntlich markiert oder nicht aufgeführt. Hier sollen nur die wichtigsten Programme dargestellt werden.

### D.1. Ausschnitte aus dem Messprogramm „KreisbahnenFRF“

```
Public WithEvents IXE As clsIXEcontrol      'Instanz der IXE-Steuerungsklasse.
Attribute IXE.VB_VarHelpID = -1
'%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
' Messprogramm für Messungen von Übertragungsfunktionen auf Kreisbahnen
' mit Hardware: - OnoSokki cf6400 4-Kanal FFT-Analysator
' - IXE-Phytron-Schrittmotoransteuerung
' - B&K Messverstärker
' Die Geräte werden über GPIB-Schnittstelle angesteuert
' Programm benötigt mehrere Bibliotheken und die Klasse für
' die IXE von Christoph Kling
' Author: Siegfried Gündert , Date: 9.2010
'%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
'Deklarationen:

    Dim Radian() As Double
    Dim CurrentRadius As Double

    Dim DeltaPhi() As Double
    Dim CurrentDeltaPhi As Double

    Dim Anzahl() As Double
    Dim CurrentAnzahl As Double

    Dim OnoIsInitialized As Boolean
    Dim pause1 As Boolean
    Dim stop1 As Boolean
'%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
' IXE-Phytron Frame:

'IXE verbinden und erstmal grundlegend einrichten:
Private Sub btnConnect_Click(Index As Integer)
    IXE.connect 0, 6, 0, TIM03s
    IXE.AngleLimitation = switchOFF
    IXE.AngleLimitMinimum = -90
    IXE.AngleLimitMaximum = 90
    IXE.ControlType = auto
End Sub

'IXE provisorisch disconnecten, ixе muss dann bei wiederverwendung
'resettet werden...
Private Sub btnDisconnect_Click(Index As Integer)
    IXE.disconnect
```

```

End Sub

' Gehe zu angegebener Position:
Private Sub btnGoToPosition_Click()
    Dim Value As Double
    Value = Val(txtGoto.Text)
    txtGoto.Text = Format(Value, "0.00") & "°"
    IXE.moveTo Value
End Sub

'Manuelle Schrittmotorsteuerung:
Private Sub btnManualControlOFF_Click()
    btnManualControlON.Enabled = True
    btnManualControlOFF.Enabled = False
    IXE.ControlType = auto
End Sub

Private Sub btnManualControlON_Click()
    btnManualControlON.Enabled = False
    btnManualControlOFF.Enabled = True
    IXE.ControlType = manual
End Sub

Private Sub btnPause_Click()

    pause1 = True
End Sub

'Setze momentanen Winkel zu Null
Private Sub btnSetZero_Click()
    IXE.setZero
End Sub

'Ende von IXE Phytron Frame

'%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
' Radien und Winkelliste:
'%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Public Sub btnLoadTable_Click()

    Dim FilePath As String
    Dim PrefixName As String

    FilePath = App.Path & "\" & txtTableFilename.Text & ".txt"

    readRadiusUndWinkelTabelle FilePath, Radien, DeltaPhi, Anzahl, PrefixName

    'popup füllen:
    Dim kk As Integer

    popRadius.Clear

    For kk = 1 To UBound(Radien)
        popRadius.AddItem "Idx" & kk
        popRadius.List(kk - 1) = Radien(kk) & " m"
    Next kk

    popRadius.ListIndex = 0 'wähle das erste Radiusfeld aus
    txtOutfileName.Text = PrefixName
    If popRadius.ListIndex = 0 Then
        txtStartNummer.Text = popRadius.ListIndex + 1
    End If
End Sub

```



```

Else
    Dim hlpAnzahl As Integer
    Dim pp As Integer
    For pp = LBound(Anzahl) To popRadius.ListIndex
        hlpAnzahl = hlpAnzahl + Anzahl(pp)
    Next pp

    txtStartNummer.Text = hlpAnzahl + 1
End If

'lstRadienUndWinkel.AddItem Format(Radien(kk), "0.00 m") & " , " &
    Format(DeltaPhi(kk), "0.00°") & vbCrLf, kk - 1
End Sub

Private Sub btnStopp_Click()
    stop1 = True
End Sub

Private Sub popRadius_Click()

    CurrentRadius = Radien(popRadius.ListIndex + 1)
    CurrentDeltaPhi = DeltaPhi(popRadius.ListIndex + 1)
    CurrentAnzahl = Anzahl(popRadius.ListIndex + 1)

    lblDeltaPhi.Caption = CurrentDeltaPhi & "°"

    lblAnzahlN.Caption = CurrentAnzahl

    If popRadius.ListIndex = 0 Then
        txtStartNummer.Text = popRadius.ListIndex + 1
    Else
        Dim hlpAnzahl As Integer
        Dim pp As Integer
        For pp = LBound(Anzahl) To popRadius.ListIndex
            hlpAnzahl = hlpAnzahl + Anzahl(pp)
        Next pp

        txtStartNummer.Text = hlpAnzahl + 1
    End If

End Sub

'%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
' Onosokki Panel:

Private Sub btnOnoConnect_Click()

    InitOnosokki6400 OnoIsInitialized

    If OnoIsInitialized Then

        lblOnoStatus.Caption = "online"
        lblOnoStatus.BackColor = vbGreen

    Else

        lblOnoStatus.Caption = "offline"
        lblOnoStatus.BackColor = vbYellow

    End If

```

```

'%%%%%%%%
'B&K 2636: Mikrofon Vorverstärker:
  Dim stHelp As String
  stHelp = "A1B1CODOE1F8G2H1I2J5K2LOM1N0O5P4QOROS1TOUOV1" 'Starteinstellung
  Call Send(0, 4, stHelp, NLen)
End Sub

Public Sub MakeOnoSettings()
  Dim FreqRanges() As Integer
  Dim kk As Integer

  popRadius.Clear

  For kk = 1 To UBound(Radien)
    popRadius.AddItem "Idx" & kk
    popRadius.List(kk - 1) = Radien(kk) & " m"
  Next kk

  popOnoFreqRange.AddItem

End Sub

'%%%%%%%%
'MessungPanel:

' Einzelmessung durchführen:
Private Sub btnEinzelmessung_Click()
  Dim OutFilePath As String
  OutFilePath = App.Path & "\ " & "Measurements\"
  Dim CurrentOutFilePath As String
  Dim MessDaten As MeasData

  CurrentOutFilePath = OutFilePath & txtOutfileName.Text & "_" &
    Format(txtStartNummer.Text, "###") & ".txt"
  lblOnoStatus.BackColor = vbRed
  lblOnoStatus.Caption = "measuring"

  MessDaten.Radius = CurrentRadius
  MessDaten.Winkel = IXE.ActualAngle
  MessDaten.Nummer = txtStartNummer.Text
  '!!!VORSICHT HARDCODE:
  MessDaten.SamplingFaktor = 2.56 'OnoSokkis Samplingfaktor
  MessDaten.fs = 400 * MessDaten.SamplingFaktor
  MessDaten.FFTlength = 4096

  ReDim MessDaten.Frequezen(0 To 2048)

  Dim nf As Integer

  For nf = 0 To UBound(MessDaten.Frequezen)
    MessDaten.Frequezen(nf) = nf * MessDaten.fs / MessDaten.FFTlength
  Next nf

  MessenUndSpeichernOno6400 CurrentOutFilePath, MessDaten

  lblOnoStatus.BackColor = vbGreen
  lblOnoStatus.Caption = "online"
End Sub

```

```

' Messugn für gesamte Kreisbahn starten:
Private Sub btnMessungStarten_Click()
    Dim OutFilePath As String
    OutFilePath = App.Path & "\" & "Measurements\"

    Dim CurrentOutFilePath As String

    Dim MessDaten As MeasData
    Dim MovePhi As Double
    Dim kk As Integer
    stop1 = False

    For kk = 1 To CurrentAnzahl

        If stop1 Then Exit Sub
        If pause1 Then
            pause1 = False
            MsgBox "Messung fortsetzen."
        End If

        MovePhi = kk * CurrentDeltaPhi
        IXE.moveTo (MovePhi)

        pause (10)

        CurrentOutFilePath = OutFilePath & txtOutfileName.Text & "_" &
            Format(txtStartNummer.Text - 1 + kk, "###") & ".txt"

        lblOnoStatus.BackColor = vbRed
        lblOnoStatus.Caption = "measuring"

        MessDaten.Radius = CurrentRadius
        MessDaten.Winkel = MovePhi
        MessDaten.Nummer = txtStartNummer.Text - 1 + kk
        '!!!VORSICHT HARDCODE: könnte allgemeiner gehalten werden,
        'so aber weniger zeitaufwand:
        MessDaten.SamplingFaktor = 2.56
        MessDaten.fs = 400 * MessDaten.SamplingFaktor
        MessDaten.FFTlength = 4096

        ReDim MessDaten.Frequezen(0 To 2048)

        Dim nf As Integer
        For nf = 0 To UBound(MessDaten.Frequezen)
            MessDaten.Frequezen(nf) = nf * MessDaten.fs / MessDaten.FFTlength
        Next nf

        MessenUndSpeichernOno6400 CurrentOutFilePath, MessDaten

        lblOnoStatus.BackColor = vbGreen
        lblOnoStatus.Caption = "online"
    Next kk
End Sub

'%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
' Allgemeines:

Private Sub Form_Load()
    'Objektinstanz laden.
    Set IXE = New clsIXEcontrol

```

```

RefreshAllIXEdisplays
lblOnoStatus.BackColor = vbYellow
End Sub

' IXE Events:
Private Sub IXE_AngleChanged(ByVal newAngle As Double)
    'lblActualAngle.Caption = Format(newAngle, "0.00") & "°"
    lblAktuellerWinkel.Caption = Format(IXE.ActualAngle, "0.00") & "°"
End Sub
Private Sub IXE_IXEerror(ByVal Description As String)
    txtIXEerror.Text = "---" & Description & vbCrLf & txtIXEerror.Text
End Sub
Private Sub IXE_StatusChanged(ByVal NewStatus As IXE_Status)
    Select Case NewStatus
    Case unknown
        lblIxeStatus.Caption = "unknown"
        lblIxeStatus.BackColor = vbGrayText
    Case offline
        lblIxeStatus.Caption = "offline"
        lblIxeStatus.BackColor = vbYellow
        lblAktuellerWinkel.Caption = Format(IXE.ActualAngle, "0.00") & "°"
    Case Online
        lblIxeStatus.Caption = "online"
        lblIxeStatus.BackColor = vbGreen
        lblAktuellerWinkel.Caption = Format(IXE.ActualAngle, "0.00") & "°"
        lblAktuellerWinkel.Caption = Format(IXE.ActualAngle, "0.00") & "°"
    Case moving
        lblIxeStatus.Caption = "moving"
        lblIxeStatus.BackColor = vbRed
        lblAktuellerWinkel.Caption = Format(IXE.ActualAngle, "0.00") & "°"

    Case Else
        lblIxeStatus.Caption = "???"
        lblIxeStatus.BackColor = vbGrayText
    End Select
End Sub

Private Sub RefreshAllIXEdisplays()
'Aktualisiert alle Anzeigen bezüglich der IXE.
    txtIXEerror.Text = ""
    Select Case IXE.Status
    Case unknown
        lblIxeStatus.Caption = "unknown"
        lblIxeStatus.BackColor = vbGrayText
    Case offline
        lblIxeStatus.Caption = "offline"
        lblIxeStatus.BackColor = vbYellow
    Case Online
        lblIxeStatus.Caption = "online"
        lblIxeStatus.BackColor = vbGreen
        lblAktuellerWinkel.Caption = Format(IXE.ActualAngle, "0.00") & "°"
    Case moving
        lblIxeStatus.Caption = "moving"
        lblIxeStatus.BackColor = vbRed
        lblAktuellerWinkel.Caption = Format(IXE.ActualAngle, "0.00") & "°"
    Case Else
        lblIxeStatus.Caption = "???"
        lblIxeStatus.BackColor = vbGrayText
    End Select
End Sub

```

End Select

End Sub

KreisbahnFRF Events Ausschnitt

## D.2. Matlab-Skripte

### D.2.1. Skripte für Strukturmodelle, speziell für Kreisbahn-Structures und allgemein für ME'scope

```
function [r,dphi,N] = EqualDistantCircleArea( radius , dist )
% Usage:      [r,dphi,N] = EqualDistantCircleArea( radius , dist )
% Compute equal-distant Samplepoints over a circle-area
% Input Arguments:
% dist...    distance of the points in the circle of current radius
% radius...  maximal radius of the circle area
% Output Arguments:
% r...       vector provides all radius values with distances of dist
% dphi...    Angle increments dphi(r)
% N...       Number of dphi steps for each radius
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Author: Siegfried Gündert
% Date: 17.09.2010
% Version: 0.1...17.09.2010
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% erstelle Radien mit dist Abstand:
%r = ( radius : -dist : mod(radius,dist)+dist );
if length(radius)>1
    r = ( radius : -dist : mod(radius,dist) );
    idx = find(r>radius(end));
    r = r(idx);
else
    r=radius;
end
% winkel für genau "dist" entsprechende Abstände
phi = imag( acos( ( (dist*dist) ./ ( 2*r.*r ) ) + 1 ) );
% phi würde meistens nicht mit ganzzahligen Vielfachen in einen Kreisumfang
% passen...es sollen aber diskrete Messpunkte über den gesamten Kreisumfang
% in gleichen Abständen erstellt werden. Deshalb:
% Anpassung an gesamten Kreisumfang:
nn = 2*pi./phi;
N = round(nn);
dphi = 2*pi./(N); % in Radians
figure;
for kk = 1:length(dphi)

    ph = (1:N) .*dphi(kk);

    plot(r(kk).*exp(j.*ph), 'k. ');
    hold on;
end
axis equal
% Write AngleTable for Measurement automation:
ddphi = 360./N; % in Grad
M=[r(:),ddphi(:),N(:)];
dlmwrite('AngleTable.txt', M, 'delimiter', '\t', 'precision', 6);
```

EqualDistantCircleArea.m

---

```

% Dieses Skript erstellt eine Kreisflächenstructure für MEScope:
% Die Besonderheit ist, dass die Messpunkte möglichst equidistant sind!
% in MEScope gibt es dafür keine Funktion.
% Siegfried Gündert, sept. 2010
clear
close all;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
StructureFileName = 'TestStructureCirclepoints_mitLinien_265_oben.sts';
Radius = [2.65,0.15]; % meter
%Radius(2)= 0.1;
Abstand=0.25; % meter, 25 centimeter
Zposition= 0; % position auf z-koordinate
StartIndex=1;
DrawLines=0;
% die Structure-Punkte werden automatisch Nummeriert
% die Nummerierung stimmt mit dem Massaufbau/Ablauf des Programms "Kreisbahnen-FRF
% überein.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Erstelle Koordinaten: %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Kreiskoordinaten
[r,dphi,N]=EqualDistantCircleArea(Radius,Abstand);
P=zeros(sum(N),3); % Matrix mit Punktkoordinaten allokiieren
PointCount=1;
close all
for kk = 1:length(r) % für alle radien
    ph = (1:N(kk)) .*dphi(kk);
    % verwende Kreiskoordinaten zur Erstellung einer Komplexen Zahl
    ZZ = r(kk).*exp(-j.*ph);
    idx = PointCount:PointCount+ N(kk)-1;
    % Berechne Karthesische Punktkoordinaten:
    P(idx,1) = real(ZZ(1:N(kk))); %x
    P(idx,2) = imag(ZZ(1:N(kk))); %y
    P(idx,3) = Zposition; %z
    PointCount = PointCount+N(kk);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Erstelle Struct für die Funktion writeCircleAreaMEScopeStructure():
    stData.FilePath = StructureFileName;
    stData.P = P;
    stData.N = N;
    stData.StartIndex=StartIndex;
    stData.DrawLines=DrawLines;
% Schreibe Structure Spreadsheet (*.STS-File):
writeCircleAreaMEScopeStructure(stData);

```

ErstelleKresflaechenStructure.m

---

```

function writeCircleAreaMEScopeStructure(stData)
% erstellt ein structure spreadsheet der karthesischen daten in
% stData.P(n,3).
% Dieses Skript ist auf Kreisflächen Structures optimiert, kann jedoch
% leicht für nutzerspezifische zwecke verändert werden.
% Siegfried Gündert 2010
FilePath=stData.FilePath;
P=stData.P;
N=stData.N;
StartIDX=stData.StartIndex-1;
% erstellt aus Points(x(:),y(:),z(:)) ein structurefile
fid=fopen(FilePath,'w');
% sollte im Header stehen:

```

```

fprintf(fid,'ME''scope Spreadsheet Structure\n');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Schreibe Punkte, die in P(n,3) mit Karthesischen Koordinaten gespeichert sind:
fprintf(fid,...
    'Point Name \t Label \t X Coord. \t Y Coord. \t Z Coord. \t Center Pt. \t Color \t Bold\n');
for kk=1:length(P)
    fprintf(fid,'Point#%d \t %d \t %f \t %f \t %f \t 0 \t 0 \t No\n',...
        kk, kk+StartIDX, P(kk,1), P(kk,2), P(kk,3));
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Definiere Linien:
% dieser Abschnitt ist auf Kreise Optimiert, die Information, wo der nächste
% Kreis anfängt liegt in stData.N (dieses Structelement ist auch nur
% Kreisflächenspezifisch)
if stData.DrawLines
fprintf(fid, 'Line Name \t Point Name A \t Point Name B \t Color \t Bold\n');
% Kreispunkte durch Linien verbinden
N=[0;N(:)]; % Anzahl der Messpunkte in den Kreisbahnen
for rr = 1 : length(N)-1
    idx = [sum(N(1:rr))+1 : sum(N(1:rr+1)), sum(N(1:rr))+1];
    for kk = 1:length(idx)-1
        % Kreisförmige Linien:
        fprintf(fid, 'Line#%d \t Point#%d \t Point#%d \t 16711680 \t No\n',...
            sum(N(1:rr))+kk , idx(kk) , idx(kk+1));
        % Radiale Linien: nicht so optimal, da die Punkteanzahl in den
        % Kreisbahnen abnimmt und deshalb auf diese Art zu viele Linien entstehen ....
        % if rr<length(N)-1 && kk<length(idx)-1
        %     fprintf(fid, 'Line#%d \t Point#%d \t Point#%d \t
16711680 \t No\n',...
            %         sum(N)+sum(N(1:rr))+kk , idx(kk) , N(rr+1)+idx(kk));
        %     end
    end
end
end
fclose(fid);

```

writeCircleAreaMEscopeStructure.m

```

function writeMEscopeStructure(FilePath,P)
% erstellt aus Points(x(:),y(:),z(:)) ein strcturefile
% Siegfried Gündert 2010
fid=fopen(FilePath,'w');
fprintf(fid,'ME''scope Spreadsheet Structure\n');
%Schreibe Punkte:
fprintf(fid, 'Point Name \t Label \t X Coord. \t Y Coord. \t Z Coord.
\t Center Pt. \t Color \t Bold\n');
for kk=1:length(P)
    fprintf(fid, 'Point#%d \t %d \t %f \t %f \t %f
\t 0 \t 0 \t No\n',...
        kk, kk, P(kk,1), P(kk,2), P(kk,3));
end
%DefiniereLinien:
% "Line Name" "Point Name A" "Point Name B" "Color" "Bold"
% Line#1 Point#1 Point#2 16711680 No
fprintf(fid, 'Line Name \t Point Name A \t Point Name B \t Color
\t Bold\n');
for kk=1:length(P)-1
    fprintf(fid, 'Line#%d \t Point#%d \t Point#%d \t 16711680
\t No\n',...
        kk, kk, kk+1);
end

```

```
fclose(fid);
% write header:
```

writeMEscopeStructure.m

## D.2.2. Skripte zur Umwandlung von Messdaten für ME'scope

```
function write_bls( blsFilenamePath,magnitude,phase,Labels,DOF,f)
% Usage:    write *.bls
% Input:    blsFilename ... Name of the Outputfile (is string)
%           wmbFilePrefix... Prefix
%           Dateibenennung Konvention: 'Prefix_n.wmb'
%           the part behind the prefix (n) will be used as poin label
%           n= 1,2,...,N ;
%% Wandelt gemessene Übertragungsfunktionen
%% in ein *.bls-File um.
%% Das *.bls file kann in ME'scope eingelesen werden.
%% Author:  Siegfried Gündert
%% Date:    04.08.2010
%% Write bls-file:
fname = blsFilenamePath;
nmin = 1;
%%
nmax = length(magnitude(:,1));%%
%df = fs/length(magnitude(:,1));
%f=(0:length(magnitude)-1).*fs/(2*(length(magnitude)-1));
N=length(magnitude(1,:));
fid = fopen(fname,'w');

% Write Header for bls file
fprintf(fid,'%s\n',      'ME'scope Spreadsheet Data Block'   );
fprintf(fid,'%s \t %s\n', 'Measurement Type',      'FRF'           );
fprintf(fid,'%s \t %s\n', 'Label',                  'Freq Resp'    );
fprintf(fid,'%s \t %s\n', 'X-Axis Spacing',         'Uniform'      );
fprintf(fid,'%s \t %s\n', 'X-Axis Units',           'Hz'           );
fprintf(fid,'%s \t %s\n', 'Measurement Labels',     '1Y.DAT'       );
fprintf(fid,'%s \t',     'Y Axis DOFS'              );

% Write column numbers and directions
for nb=1:N
    fprintf(fid,'%s \t \t %s',[Labels{nb} DOF]);
end
    fprintf(fid,'\n');

fprintf(fid,'%s \t','Y Axis Units');
for nb=1:N
    fprintf(fid,'%s \t \t %s', 'Gs');
end
    fprintf(fid,'\n');

fprintf(fid,'%s\n','Z Axis');

% Column labels:

fprintf(fid,'%s ','Frequency');

for nb=1:N
    fprintf(fid,'\t %s \t %s','Magnitude','Phase');
end
```



```

fprintf(fid,'\n');

for nf = nmin:nmax %for each frequency
    fprintf(fid,'%10.3f \t',f(nf)); % frequency column

    for nn=1:N % in current frequency line and for all measurements
        fprintf(fid,'%10.2e \t',magnitude(nf,nn),phase(nf,nn)*180/pi);
    end

    fprintf(fid,'\n');
end
fclose(fid);
%eof

```

write\_bls.m

```

function stOut = read_frf_kreisbahn_txt(FilePath)
%% liest files des programms Kreisbahnen FRF
% FilePath='MeasKreis1_2.txt';
%by Siegfried Guendert Aug. 2010

stOut.info={};
stOut.data=[];

fid=fopen(FilePath,'r'); % fid...file identifier.
kk=1; pp=1; % counter
while 1
    tline = fgetl(fid); % lese nächste Zeile von fid
    % wenn es Buchstabe ist, dann ist ende des filese erreicht
    if ~ischar(tline), break, end
    % Lese Infotext im Fileheader
    if kk<11, % es sind 19 zeilen infotext in den txt-files.
        stOut.info{kk,1}=tline;
        kk = kk + 1;
    % Lese Daten aus File
    else
        idx=strfind(tline,',');
        tline(idx)='.';
        hlp=str2num(tline);
        stOut.data(pp,1:length(hlp))=hlp;
        pp = pp + 1;
    end
end
fclose(fid);
%eof

```

read\_frf\_kreisbahn\_txt.m

```

% Lädt Messungen des Kreisbahnen FRF-Programms
% und erstellt ein BLS-file für MScope
% Die Messungen sind in *.txt-files Gespeichert und Enthalten
% Übertragungsfunktionen.
% am Ende des Filenames steht der Messpunkt index
% by Siegfried Guendert Aug. 2010
clc;
clear;
close all;
%addpath(genpath(pwd));
%addpath('\.')

LabelStartIndex=1; % PunkteLabels in MScope

```

```

idx_start = 400; %erster Messpunkt (endzahl des Filenamens)
% alle dazwischen :-P
idx_end = 406; % letzter Messpunkt

IDX=(idx_start:idx_end); % Indexvektor, der noch spezifizierteren
                        % Zugriff auf Dateiindizes erlauben soll
%IDX=[(58:65),(119:125),(174:177)]; %Nachmessungen Index für MESSungen mit
%McBrown
N=length(IDX); % Anzahl der Messfiles
% Namenskonvention der Messdatenfiles: prefix_index.txt
% pfad der files und prefix:
prefix=[pwd,...
        '\Messungen\MeasKreisMcBrown'];
%Anzahl der Frequenzbins (es soll bis zu dem Nfft-ten Datenpunkt
% ausgelesen werden):
Nfft=1550;

% BLS-Filename:
bls_name='Kreisbahn_McBrown_ausEcke_DampingUndTPFilt_Nachmessung';
pathname=pwd;

% Pfeilrichtung:
DOF='Z:1Z';

% Speicher allok
    magnitude = zeros(Nfft,N);
    phi = zeros(Nfft,N);
    Labels = cell(N,1);

for kk=1:N % für alle Messfiles:
    fname = [prefix,'_',num2str(IDX(kk)),'.txt'];
    st0 = read_frf_kreisbahn_txt(fname);

    ReH = st0.data(:,3); % Realteil
    ImH = st0.data(:,4); % Imaginärteil
    H=(ReH + j.*ImH); % Übertragungsfunktion H(jw)
    % Coh =st0.data(:,5); % Cohärenz (Hier noch nicht verwendet) wurde
    % aber von hand überprüft

    magnitude(1:Nfft,kk) = abs(H(1:Nfft));
    phi(1:Nfft,kk) = angle(H(1:Nfft));
    Labels{kk}=num2str(IDX(kk)+LabelStartIndex-1);
end
    f = st0.data(:,2); % Frequenzvektor

% Schreibe Übertragungsfunktionen und Punktlables in ein BLS-file
write_bls([pathname,'/', bls_name '.bls'],magnitude,phi,Labels,DOF,f);

load_and_write_frf_kreisbahn_txt_to_BLS.m

```

### D.2.3. Skripte zur Auswertung der Fremdgeräuschmessungen mit Pegelstatistik und Leistungsdichtespektren

```

function [L , p_eff_sq , zf] = spm_states(p,p_calib,fs,Bewertung,Filterbank,FastSlow,zi)
% VORSICH nur für L_ZF verwenden, andere filterstates werden nicht
% zurückgegeben.
% -----
%
% Author : Siegfried Gündert <siegfried.guendert AT student.fh-ooe.de>

```

```

% Date   : 17.11.2010
% Updated: <24.11 ... plus filterstates>
% SPM ablauf:
% Nach FDIS 61672:
%
%           -----
%           |          |          |          |          |
% p_in  --> | A/C/Z weight | --> |  $\sim 2$  | --> | mean (TP1.Ordnung) |
%           |-----|          |-----|          |-----|
%
%           -----
%           |          |          |          |
%           --> |  $\sim 1/2$  --> | --> |  $L = 20\log(p/p_0)$  |
%           |-----|          |-----|
%
%% Bewertung: A,C,Z
if strcmp(lower(Bewertung),'a')
    [b,a] = adsgn(fs); % externe Funktion
    p = filter(b,a,p);
    p_calib = filter(b,a,p_calib);
elseif strcmp(lower(Bewertung),'c')
    [b,a] = cdsgn(fs);
    p = filter(b,a,p);
    p_calib = filter(b,a,p_calib);
elseif ~strcmp(lower(Bewertung),'z')
    error('Unbekannte Frequenzbewertung. ');
end

%
%% Filterbank:
if strcmp(lower(Filterbank),'terz')
    mode=0;
    [p_fb,H_Terz,MidFreq_vek,BandEdgeFreq_vek] = Terzbank(p,fs,mode);
    % [p_fb,MidFreq_vek] = filtbank(p,fs,[])
    N_bands = length(MidFreq_vek);
% elseif strcmp(lower(Filterbank),'oktav')
%     [p_fb,H_Okt,MidFreq_vek,BandEdgeFreq_vek] = Oktavbank(p,fs,mode)
%     N_bands = length(MidFreq_vek);
else
    p_fb = p(:);
    N_bands = 1;
end
for kk=1:N_bands
% Momentanes Band:
    p = p_fb(:,kk);
%% Quadrieren:
    p = p.*p ;
    p_calib = p_calib.*p_calib;
%% Mittelwertbildung mit TP 1. Ordnung
    if strcmp(lower(FastSlow),'fast'),
        tau=0.125;
    else
        tau=1;
    end
    % Filterkoeffizienten:
    alpha = exp(-1/(tau*fs));
    b=[1-alpha];
    a=[1 -alpha];
    % "Zeitbewertung" durchführen:
    [p zf] = filter(b,a,p,zi);
    p_0 = mean(p_calib);
    p_eff_sq =p./p_0;
% Alternative mit Margarine:

```

```

% [b,a] = butter(1,2*f_gr/fs,'low');
% b=[1+a(2)]%
%% Wurzel ziehen:
    p = sqrt(p);
    p_0 = sqrt(p_0);
%% Logarithmieren:
    idx=find(p==0);
    p(idx)=eps;
    L(:,kk) = 20*log10(p./p_0);
end

```

spm\_states.m

```

% Berechnung der Pegelhäufigkeitsverteilung
% Author : Siegfried Gündert <siegfried.guendert AT student.fh-ooe.de>
% Date : 22.11.2010
% Updated: <>
clear
close all;
addpath(genpath(pwd));

% Kennschalldruckpegel des Mikrofonkalibrators
L_Calibrator=94;

% Blockverarbeitung Einstellungen:
Blocklen=8*4096; % samples
Nmessungen=3; %
Nchannels=8; %
zf=0; % initiale Filterstates für Zeitbewertung in spm_states()
% Pegelberechnungseinstellungen: sollten bei Blockverarbeitung so bleiben!
Bewertung='z';
Filterbank='none';
FastSlow='slow';

%Statistische Größen:
L_mean_sum=0; % summe der Means der Blöcke
L_var_sum=zeros(Blocklen,1); % summe der Varianzen
% Histogramm Einstellungen:
% X_hist = [(20:0.5:50)];
X_L_hist = [(0:0.5:75)];
X_peffsq_hist = linspace(0,5*10^-5,1000);

% Tiefpassfilter, das auf Messdaten angewendet werden soll:
fs=44100;% muss bekannt sein
    Wp = 2* 120/fs; Ws = 2*200/fs;
    Rp = 3; Rs = 60;
    [n,Wn] = cheb2ord(Wp,Ws,Rp,Rs);
    [bTP,aTP] = cheby2(n,Rs,Wn);
    zfTP=zeros(n,1);

h = waitbar(0,'Please wait...');

for mm = 1:Nmessungen

    for kk = 1:Nchannels

        % Name des zu bearbeitenden Files:
        fname = sprintf('Messung%d_Ch%d',mm,kk);

        % Calibratorfile öffnen
        [p_calib,fs] = wavread([fname , '_Cal194dB.wav']);

```

```

% Schauen wie groß das Messfile ist und
% Anzahl der Blöcke festlegen:
siz = wavread([fname , '.wav'],'size');
Nblocks = floor(siz(1)/Blocklen);

N_L_hist_currentCh = zeros(1,length(X_L_hist));
N_peffsq_hist_currentCh = zeros(1,length(X_peffsq_hist));
for gg = 1:Nblocks % Blockverarbeitung:

    % Samplebereich der aus Wav-File gelesen werden soll:
    N1N2 = [(gg-1)*Blocklen + 1 , gg*Blocklen];

    % Messfile-Block einlesen:
    [p,fs] = wavread([fname , '.wav'],N1N2);

    % Tiefpassfilter anwenden

    [p,zfTP]=filter(bTP,aTP,p,zfTP);

    %freqz(b,a,[],fs)
    % [n,Wn] = buttord(Wp,Ws,0.1,80)
    % [b,a]=butter(n,Wn);
    % Schalldruckpegelverlauf berechnen (werden als dBFS
    % ausgegeben)
    [L , p_eff_sq , zf]= spm_states(p,p_calib,fs,Bewertung,Filterbank,FastSlow,zf);

    % Schalldruckpegel berechnen:
    % SPL des momentantn Block im momentanen Kanal der momentanen
    % Messung:
    %SPL(N1N2(1):N1N2(2)) = L + L_Calibrator;
    SPL = L + L_Calibrator;

    % An diese Stelle könnte man statistisch den
    % Mittelwert und die Varianz schätzen
    % und später mit dem Kurvenfit vergleichen:
    L_mean_sum = L_mean_sum + mean(SPL);
    % L_var_sum = L_var_sum + (SPL-mean(SPL)).^2; %noch falsch!

    % Histogramm berechnen und aufsummieren:
    % Pegel-Histogramm des momentanen Kanals und der momentanen Messung
    N_L_hist_currentCh = N_L_hist_currentCh + hist(SPL,X_L_hist);
    % p_eff_sq histogramm "" :
    N_peffsq_hist_currentCh = N_peffsq_hist_currentCh + hist(p_eff_sq,X_peffsq_hist);

    waitbar(mm*kk*gg./(Nmessungen(1)*Nchannels(1)*Nblocks(1)))
end
L_mean{mm,kk}=L_mean_sum/Nblocks;
% L_var{mm,kk}=sum(L_var_sum)/(Nblocks(1)*Blocklen); % noch FALSCH!
N_L_hist{mm,kk}=N_L_hist_currentCh;
N_peffsq_hist{mm,kk}=N_peffsq_hist_currentCh;
end
end
% save HistogrammeFremdgerMessungen_1_3_Kanaele_1_8_TPbutter_100Hz N_hist X_hist
save HistogrammeFremdgerMessungen_1_Kanaele_1_TPbutter_100Hz N_L_hist
X_L_hist N_peffsq_hist X_peffsq_hist

```

Pegelverteilung\_Lz.m

```

%% Auswertung der Pegelverteilungen und Plot
% Author : Siegfried Gündert <siegfried.guendert AT student.fh-oow.de>
% Date : 25.11.2010
% Updated: <>
% Das mit dem Gauss-Fit ist keine so gute idee, da p Chi^2 verteilt ist,
% aber die einzelnen Frequenzbänder Normalverteilt. Chi^2 -Verteilung ist
% die Superposition mehrerer Stochastischer Prozesse.
load HistogrammeFremdgerMessungen_1_Kanaele_1_TPbutter_100Hz
%HistogrammeFremdgerMessungen_1_3_Kanaele_1_8
close all
[m,n]=size(N_L_hist);
szLegend={};
szMark={'-k','.:k','--k'};
for mm=1:m
    szFigName=sprintf('Messung Nr.%d',mm);
%figure('NumberTitle','off','Name',szFigName);
    subplot(4,2,1); hold on;
    %title(sprintf('L_{Z} Pegelhäufigkeitsverteilung Messung: %d, Länge:
%d min.',mm,round(sum(N_L_hist{mm,1})/44100/60) ))
    for kk=1:n
        set(gca,'XTickLabel',{})
        subplot(4,2,kk,'align')
        hold on;
        plot(X_L_hist,N_L_hist{mm,kk},szMark{mm},...
            'Linewidth',1.4,'MarkerSize',7); box on;
        xlim([20 60])
        %szLegend={szLegend; sprintf('M%d MP %d',mm,kk)};
        %legend(szLegend)
        ylim([1 1e7])
        title(sprintf('MP %d',kk));
        grid on;
    end
    xlabel('Schalldruckpegel L_{ZS}/dB')
    ylabel('Pegelhäufigkeit N')
    %set(gcf,'Position',[4+(mm-1)*500, 35 500 944],...
    %'PaperPosition',[1,1,18,25])
    subplot(4,2,7);
    xlabel('Schalldruckpegel L_{ZS}/dB')
    ylabel('Pegelhäufigkeit N')
    subplot(4,2,2); legend('Messung 1', 'Messung 2', 'Messung 3',0)
%szEpsName=sprintf('PegelverteilungenMessung_Nr%d',mm);
%print('-depsc','-r300',szEpsName)
end

```

## Auswertung\_Pegelverteilung.m

```

%% Berechnung der Leistungsdichtespektren und Kalibrierung
% Verwendet die resampled Messungen
%
% Author : Siegfried Gündert <siegfried.guendert AT student.fh-oow.de>
% Date : 21.12.2010
% Updated: <>
% Licence: at the end of file
clear; close all;
addpath(genpath(pwd));
% Kennschalldruckpegel des Mikrofonkalibrators
L_calib = 94;
% Blockverarbeitung Einstellungen:
Nfft = 2*4096; % Länge der fft
w = hann(Nfft); % von Hann -Fenster
Noverlap = Nfft/2; % Overlap bei Welch-LDS

```

```

WavBlocklen = 2*Nfft; % Anzahl Samples, die aus Wav-file gelesen werden
Nmessungen = 3;
Vchannels=[1,2,3,4,5,7];Nchannels = length(Vchannels);
szLegend={'1','2','3','4','5','7','8'};
Spp_mean = cell(Nmessungen,Nchannels);
Spp_std = cell(Nmessungen,Nchannels);
mksiz=4;
MarkLin={ 'o-' , 'Color',0.*[1 1 1], 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',mksiz;...
          '--' , 'Color',0.*[1 1 1], 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',mksiz;...
          's-' , 'Color',0.*[1 1 1], 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',mksiz;...
          'd--' , 'Color',0.*[1 1 1], 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',mksiz;...
          '~-' , 'Color',0.*[1 1 1], 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',mksiz;...
          'v--' , 'Color',0.*[1 1 1], 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',mksiz;...
          'x-' , 'Color',0.*[1 1 1], 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',mksiz;...
          'p-' , 'Color',0.*[1 1 1], 'LineWidth',1.2, 'MarkerSize',mksiz};

hwb = waitbar(0, 'Please wait...');
for mm = 1:Nmessungen
    figure(mm);
    for kk = 1:Nchannels
        % Name des zu bearbeitenden Files:
        fname = sprintf('Messung%d_Ch%d',mm,Vchannels(kk));
        % Calibratorfile öffnen
        [p_calib,fs] = wavread([fname , '_Cal94dB_resample.wav']);
        % Kalibrierspektrum und -Pegel berechnen:
        [Spp_calib,f]= LDSWelch(p_calib,fs,w,Nfft,Noverlap);
        peffsq_calib = sum(Spp_calib)/Nfft;
        dL_calib = L_calib - (10*log10(peffsq_calib)+3);
        % Schauen, wie groß das Messfile ist und
        % Anzahl der Blöcke festlegen:
        siz = wavread([fname , '_resample.wav'],'size');
        N_WavBlocks = 1 + floor((siz(1)-WavBlocklen)/(WavBlocklen-Noverlap));
        Spp=zeros(N_WavBlocks,Nfft/2+1);

        for gg = 1:N_WavBlocks % Blockverarbeitung:

            % Samplebereich, der aus dem Wav-File gelesen werden soll:
            N1N2 = [(gg-1)*(WavBlocklen-Noverlap) + 1 , gg*(WavBlocklen-Noverlap)];
            % Messfile-Block einlesen:
            [p,fs] = wavread([fname , '_resample.wav'],N1N2);
            % LDS-Welch berechnen:
            [Spp(gg,:),f,R]=LDSWelch(p,fs,w,Nfft,Noverlap);

            waitbar((gg*mm*kk)/(Nchannels*Nmessungen*N_WavBlocks))
        end
        % Mittleres Spektrum:
        Spp_mean{mm,kk} = mean(Spp);
        L_Spp_mean = 10*log10(Spp_mean{mm,kk}/fs)+dL_calib;
        L_Srr_mean{mm,kk}=L_Spp_mean;
        % Standardabweichung
        Spp_std{mm,kk} = std(Spp);
        L_Spp_std = 10*log10(Spp_std{mm,kk}/fs)+dL_calib;
        LK = 10*log10( (10.^(L_Spp_mean./10)+10.^(L_Spp_std./10))./...
                    10.^(L_Spp_mean./10) );
        LKminus = 10*log10( (10.^(L_Spp_mean./10)-10.^(L_Spp_std./10))./...
                    10.^(L_Spp_mean./10) );
        R=R*N_WavBlocks % Anzahl der Mittelungen
        subplot(2,1,1);
        semilogx(f,L_Spp_mean,MarkLin{kk,:});%'Color',clor
        hold on;
        subplot(2,1,2);

```

```

        semilogx(f,LK,MarkLin{kk,:});
        hold on;
        semilogx(f,LKminus,MarkLin{kk,:});
        size(LK)
        size(L_Spp_mean)
    end
    subplot(2,1,1); grid on;
    legend(szLegend);
    ylabel('10lg(S_{pp}/fs)+dL_{calib} / dB/Hz')
    xlim([7,30]);
    set(gca,'XTick',[9 12.5 13.9 17.2 19.9 25],...
        'XTickLabel',{'9','12.5','13.9','17.2','19.9','25'});
    title(...)
    sprintf('Fremdgeräusch-Messung %d \nMittlerer Schalldruckpegel L_{MEAN(Spp)}',mm)
    subplot(2,1,2); xlim([7,30]); grid on;
    set(gca,'XTick',[9 12.5 13.9 17.2 19.9 25],...
        'XTickLabel',{'9','12.5','13.9','17.2','19.9','25'});
    %text(9,6,'10lg(\Delta L_{STD(Spp)}=(10^{-0.1L_{MEAN(Spp)}} + 10^{-0.1L_{STD(Spp)}}) / 10^{-0.1L_{MEAN(Spp)}})
    ylabel('\delta L_{STD(Spp)} / dB/Hz')
    xlabel('Frequenz /Hz')
    title('Pegeldifferenz der Standardabweichung \delta L_{STD(Spp)}')
end
close(hwb)
f_fremdger=f;
save LDSfremdger L_Srr_mean f_fremdger

```

LeistungsdichteStatFremdgerMessungen.m

#### D.2.4. Skripte zur Schätzung des ortsabhängigen SNR im Frequenzbereich, der durch das Modalmodell abgedeckt wird

```

%% SNR schätzen für gewählten Frequenzberiech, den das Modalmodell zulässt
% Initialisierungsskript
% Darstellung mit Skript: "plot_SNR_frequencyrange.m"
% Author : Siegfried Gündert <siegfried.guendert AT student.fh-ooow.de>
% Date : 26.01.2011
% Updated: <>
% Licence: at the end of file
% clear; close all;
%% P A R A M E T E R:
% Mindest SNR:
SNR_dBmin = 10; % Signal-Rauschabstand, der mindestens vorliegen muss,
                % damit der betroffene Messpunkt zugelassen wird
L_Noise = 40; % dB(Z) maximale Fremdgeräusch-Anregung
L_Anregung = 60; % dB(Z) maximale Nutzschaall-Anregung
%% Lade Positionsdaten
load RarPositionData;
    % Folgende Variablen werden dadurch geladen, sie beziehen sich
    % auf den Rotationsmittelpunkt, müssen also noch umgerechnet werden:
    % EposKreisebene ..... Empfängerpositionen der Modalanalyse
    % (x,y)/m
    % PosMikrosReMittelpunkt ... Mikrofonpositionen der
    % Fremdgeräuschmessungen (x,y)/m (wird
    % hier nicht gebraucht)
    % PosRotationsMittelpunkt .. Position des Rotationsmittelpunktes im
    % reflexionsarmen Raum
    % Lx,Ly,Lz ..... Raummaße (Lx und Ly wird gebraucht)
TuerePos=[1,8]; %ca. x,y werte der Türposition zur Beschriftung
LS_Pos =[8.6,7.6]; % Lautsprecherposition, Hängt von SHS-Datensatz ab,
                % muss also bei bedarf geändert werden!

```



```

% [8.6,7.6].. für Mc-Brown
% [9,4].. für Beyma, fest eingebaut in Box
% Ergebnisse für beyma waren nicht so gut
IDX_MikPosFremdger_Kreisfl = ...
    [237, 7, 67, 372;...% PositionsIndex in Kreisebene
     2, 3, 5, 7]; % Index der Fremdger. Messungen MPx .
Nkreispos=length(EposKreisebene(:,1));
% Modale Parameter laden:
stModes = readSHS('ShapeTable_RAR_McBrown.SHS');
% der Strukt enthält folgende Felder:
% 1xN struct array with fields:
% Label
% DOF
% Frequency
% Damping
% Magnitude
% Phase
Nmodes = length(stModes); % Anzahl der Moden
% Frequenzvektor erstellen:
f_min=0; f_max=30;
Nfbins=1024;
omega = linspace(2*pi*f_min,2*pi*f_max,Nfbins);
f = omega./(2*pi);
% Erzeugen der - Resonanzkurven aller Moden (Eigenwerte)
% - Schwingungsformen (Eigenvektoren)
Lambda_n = zeros( length(omega) , Nmodes);
Psi_n = zeros( length(stModes(1).Magnitude) , Nmodes);
H = zeros(length(stModes(1).Magnitude),length(omega));
% Für alle Moden, die durch das modale Modell gegeben sind:
for nn=1:Nmodes
    % Eigenfrequenz
    f_n = stModes(nn).Frequency;
    % Kreis-Eigenfrequenz
    omega_n = 2*pi.*f_n;
    % Halbwertsbreite der Resonanzen berechnen
    D_n = stModes(nn).Damping;
    d_n = D_n./100 ; % in ME'scope in Prozent angegeben
    delta_n = d_n * f_n;
    % Resonanzkurven jder einzelnen Mode erstellen:
    Lambda_n(:,nn) = 1./(omega.^2 - omega_n^2 - sqrt(-1)*2.*omega.*delta_n);
    % Betrag der Eigenvektoren
    Psi_n(:,nn) = stModes(nn).Magnitude;
    % Moden aufsummieren:
    H = H + Psi_n(:,nn)*Lambda_n(:,nn)';
end
% Normierung und Quadrierung Übertragungsfunktion:
H = abs(H)./max(max(abs(H))); % Betrag auf Maximum aller ÜF,
% sodass Relativ alles stimmt.
H_sq = H.^2;
%
% Übertragungsfunktionen Beyma (die Eigenfunktion ist annähernd gleich wie
% die Eigenfunktion der ersten Mode des McBrown lautsprechers):
% es wird ausschließlich die 100-Mode angeregt:
H_Beyma = Psi_n(:,1)*Lambda_n(:,1)';
% Normierung und Quadrierung Übertragungsfunktion:
H_Beyma = abs(H_Beyma)./max(max(abs(H_Beyma)));
H_Beyma_sq = H_Beyma.^2;
%% Nutzenregung:
% 1. Wiener-Lee Beziehung im Frequenzbereich:  $S_{yy} = S_{xx} |H(w)|^2$ 
Syy_Anregung = 10^(L_Anregung/10).*H_sq;

```

```

% Teilen durch Nfbins kann erspart
% werden, wenn das bei Fremdgeräuschanregung gleichermaßen gemacht wird.
% Wenn Anregung durch Beyma in der Mitte einer yz-Wand: (einkommentieren)
% Syy_Anregung = 10^(L_Anregung/10).* H_Beyma_sq;
%% Fremdgeräuschanregung
% Leistungsdichtespektren der Fremdgeräuschemessungen laden:
load LDSfremdger % wird in "LeistungsdichteStatFremdgerMessungen.m" erzeugt
% geladene Variablen:
% L_Srr_mean(f)...mittlere Pegel der Fremgeräusche /dB re. Pa^2/Hz
% zugehörige Kanäle der Spaltenelemente {1,2,3,4,5,7}
% f_fremdger.....Frequenzvektor der Fremdgeräuschspektren /Hz
% Mittenfrequenzen der Moden im Frequenzvektor der FremdGer-Messungen:
% idf1..neares Index at 12.5 Hz and idf2..neares Index at 13.9 Hz
dfh = 0.5*(f_fremdger(2)-f_fremdger(1)); % halbe Frequenzauflösung
idf1 = find( f_fremdger < 12.5+dfh & f_fremdger > 12.5-dfh );
idf2 = find( f_fremdger < 13.9+dfh & f_fremdger > 13.9-dfh );
% Anzahl der Moden die durch Fremdger angeregt werden (die Überhöhung bei
% 9Hz ist hier nicht eibezogen, weil die Messungen der
% Übertragungsfunktionen eh im Rauschen verschwunden sind)
N_FremdGerModes = 2;
idMessung = 1; %Verwende Ergebnisse aus Messung 1
% Indizes der Messpunkte die auf Kreisebene für LDSfremdger:
idx_MPkreis=[2,3,5,6]; % 6, weil in 6 MP7 gespeichert ist.
N_MessPosi= length(idx_MPkreis); % anzahl der Messpositionen
% Allokieren:
L_f1=zeros(1,N_MessPosi); L_f2=L_f1; DeltaLf=L_f1;
% Index der Resonanzfrequenzen im Frequenzvektor für modales Modell:
dfh=(f(2)-f(1))*0.5;
idf1=find( f < 12.5+dfh & f > 12.5-dfh );
idf2=find( f < 13.9+dfh & f > 13.9-dfh );
% Eigenfunktionen der Fremdgeräusche berechnen:
% erstmal die 2 Moden vom McBrown nehmen dann die Verhältnisse der
% Eigenfunktionen in den Punkten der FremdgerMessungen abchecken:
Psi_nFremdGer = Psi_n(:,1:2);
% Für alle Messpositionen, die in der Kreisbahn liegen:
for nn=1:N_MessPosi
% Pegel der Fremdgeräuschemessung bei Resonanz 1
L_f1(nn) = L_Srr_mean{1,idx_MPkreis(nn)}(idf1);
% Pegel der Fremdgeräuschemessung bei Resonanz 2
L_f2(nn) = L_Srr_mean{1,idx_MPkreis(nn)}(idf2);
% Der Unterschied im Pegel bei der Resonanzfrequenz der Mode1 zur Mode2
DeltaLf(nn) = L_f1(nn)-L_f2(nn); % ist wie p_f1/p_f2
% Dieser Unterschied muss auch in den ÜF aus dem "virtuellen modalen
% Modell" annähernd erscheinen.
% Deshalb hier durch ausprobieren Vergleichen mit den folgenden DeltaL:
DeltaLpsi(nn) = Psi_nFremdGer(IDX_MikPosFremdger_Kreisfl(1,nn),1)/...
Psi_nFremdGer(IDX_MikPosFremdger_Kreisfl(1,nn),2);
DeltaLpsi(nn) = 20*log10(DeltaLpsi(nn));
% Übertragungsfunktion des Modalmodells wurde versucht zu nehmen, aber
% ergab keine guten Ergebnisse.
DeltaLH_sq(nn)= H_sq(IDX_MikPosFremdger_Kreisfl(1,nn),idf1)/...
H_sq(IDX_MikPosFremdger_Kreisfl(1,nn),idf2);
DeltaLH_sq(nn)= 10*log10(DeltaLH_sq(nn));
end
% Differenz der Pegeldifferenzen der Resonanzenfrequenzen 1 und 2 von den
% Fremdgeräuschen und den Eigenvektoren:
DL = DeltaLf-DeltaLpsi;%
% berechne einen Faktor, der eigentlich in jedem Element gleich sein
% müsste, wenn die Fremdgeräuschemessungen proportional zu den
% Eigenfunktionen sind. Ist aber leider nicht so (wegen:ungenauer Pegel aus

```

```

% den Fremdgeräuschmessungen durch niedriges df und Beachtung nur jeweils
% eines Frequenzbins der dort aber überlappenden Moden):
Faktor = 10.^(DL./20); % durch 20, dann muss man keine Wurzel mehr ziehen
Faktor= mean(Faktor); % hier ist die Krux, im Idealfall sollten alle
% Faktoren gleich sein.
% Eigenfunktion der Mode zwei mit dem Faktor bewerten, das Verhältnis
% der Moden wird dem der Fremdgeräusch Anregung ANGEPASST:
Psi_nFremdGer(:,2)= Psi_nFremdGer(:,2)./(Faktor);
% Stichproben;
%   VH = Psi_nFremdGer(IDX_MikPosFremdger_Kreisfl(1,:),1)./...
%       Psi_nFremdGer(IDX_MikPosFremdger_Kreisfl(1,:),2);
%   10*log10(VH')
%   DeltaLf
% die Eigenwerte sind nach der Theorie unabhängig vom Ort, deshalb
% werden sie einfach so übernommen.
H_FremdGer=zeros(size(H_sq));
for nn=1:N_FremdGerModes
    H_FremdGer = H_FremdGer + Psi_nFremdGer(:,nn)*Lambda_n(:,nn)'./max(abs(Lambda_n(:,nn)));
end
H_FremdGer=abs(H_FremdGer);
% hier wurde überprüft ob die pegel von 10*log10(VH)=Delta Lf
% DeltaLf
%   VH = H_FremdGer(IDX_MikPosFremdger_Kreisfl(1,:),427)./...
%       H_FremdGer(IDX_MikPosFremdger_Kreisfl(1,:),475);
%   10*log10(VH')
% Sie sind nicht exakt gleich! Aber angenähert. Es handelt sich um eine
% Schätzung.
H_FremdGer = H_FremdGer./max(max(H_FremdGer));
H_FremdGer_sq = H_FremdGer.*H_FremdGer;
% Nun die Fremdgeräusch Anregung:
Syy_Noise = 10^(L_Noise/10).*H_FremdGer_sq;
% hier auch das Teilen durch Nfbins erspart
% Das SNR berechnen:
SNR = Syy_Anregung./Syy_Noise;
% Signal-Rauschverhältnis in Signal-Rauschabstand umrechnen:
SNRdB = 10.*log10(SNR); % Signal Rauschabstand /dB
idx_SNR = cell(1,length(f));
    for kf = 1:length(f)
        idx_SNR{kf} = find(SNRdB(1:Nkreispos,kf)>=SNR_dBmin);
    end
%% Nachbemerkung:
% Die Ergebnisse sind nur ein HINWEIS auf Orte mit gutem SNR.
% Für Messungen sollte er direkt zum Messzeitpunkt bestimmt werden.
% Bei Vergleich der Modelle mit den gemessenen Übertragungsfunktionen und
% gemessenen Fremdgeräuschen fällt auf, das diese teilweise sehr
% unterschiedlich sind.
% Dieser Algorithmus ist nur für tiefe Frequenzen bis maximal 30 Hz
% anwendbar (besser nur bis 20 Hz, da hier die Moden vom Modell aufhören.
% Besonders interessant ist der Bereich, bei dem die Fremdgeräusche
% Einfluss haben!
%%

```

init\_SNR\_modalmodell\_RAR.m

```

%% Plot des SNR >10 dB für einen gewählten Frequenzbereich
% Author : Siegfried Gündert <siegfried.guendert AT student.fh-oow.de>
% Date : 26.01.2011
% Updated: <>
% Licence: at the end of file
%
%% Finde Punkte mit gutem snr für frequenzbereich

```

```

% Einstellungen kommentieren, falls externe Verwendung dieses Skripts:
% close all
% figure;
% fb=[10,13];
% n_val=10;
%
%% Für gewählten Frequenzbereich alle Messpunkte finden, die gemeinsam im
%% Signal-Rauschabstand bei allen Frequenzen im Frequenzbereich
%% über dem Minimalpegel liegen:
idx_f=find( f>=fb(1) & f<=fb(2) ); % Frequenzindizes im
% gewählten Frequenzbereich
idmp_common = idx_SNR{idx_f(1)}; % index der Messpunkte im ersten
% Frequenzbin, die einen SNR über dem
% Grenzwert (standard 10dB) haben.
% (Grenzwert: siehe im init_skript)

% für alle weiteren Frequenzen durchrechnen:
for kf=2:length(idx_f)
    idmp = idx_SNR{idx_f(kf)}; % Messpunkteindex des nächsten Bins
    idmp_common = intersect(idmp,idmp_common); % Schnittmenge bilden
    % idmp_common... ist jetzt der Messpunkteindex der Messpunkte, die
    % im gewählten Frequenzbereich für alle Frequenzen (idx_f)
    % einen SNRdB > 10dB haben
end
if isempty(idmp_common) % Wenns keine Messpunkte gibt, die im fb SNR>10dB:
    warning('In diesem Frequenzbereich gibt es Keine Punkte, die einen SNR>10 dB(Z) SPL haben!');
    warning('Wähle einen kleineren Frequenzbereich');
    disp(fb)
    return;
end
%% Normierter SNR-Bereich:
% mittelwerte über alle Frequenzen im Frequenzbereich
% für jeden einzelnen Messpunkt und diese normieren:
% snr_rnge = real( abs( mean(SNR(idmp_common,idx_f),2) ./...
% max(abs(mean(SNR(idmp_common,idx_f),2))) ) );
dbMax=40;
idx_sn_dbMax = find(SNRdB(idmp_common,idx_f)>dbMax);
SNRdB_MX=SNRdB(idmp_common,idx_f);
SNRdB_MX(idx_sn_dbMax) = dbMax; % alle Pegel über dbMax auf dbMax setzen
% snr range-vektor auf dbMax normieren;
snr_rnge= 10*log10(median(10.^(SNRdB_MX./10),2))./dbMax;
% Farben berechnen und Datenskala:
s_clr = 1 - [.05 .3 .05]; % Dunkelgrün (wie mans gern hat)
%max_clr = max(snr_rnge); % min_clr=min(snr_rnge);% Extrema der snr_rnge
clr_shade=linspace(.1,1,n_val)'; % Verlauf für colormap
clr_shade = 1 - [ clr_shade.*s_clr(1),... % R
                 clr_shade.*s_clr(2),... % G
                 clr_shade.*s_clr(3) ]; % B

colormap(clr_shade);
% Wertebereich der SNR-Karte:
SNRdB_vals = linspace( SNR_dBmin ,... % von
                      dbMax,... % bismax(max(SNRdB_MX))
                      n_val); % mit anzahl n_val

%% Plotten
% Empfängerkoordinaten plotten:
for pp=1:length(idmp_common)
    plot( EposKreisebene(idmp_common(pp),1)+PosRotationsMittelpunkt(1),...
          EposKreisebene(idmp_common(pp),2)+PosRotationsMittelpunkt(2),...
          '.', 'Color', 1-(snr_rnge(pp).*s_clr),...
          'MarkerSize',16);
    hold on;
end

```

```

end
grid on; % set(gca,'GriLineStyle','-.','XColor',[.5 .5 .5])
axis equal
% Mittellinien plotten
line([0 Lx],[4 4],'Color','k')
line([4.5 4.5],[0 Ly],'Color','k')
axis([0,Lx,0,Ly]) % Achsen auf xy-Raummaße einstellen
cb = colorbar;
set(cb,'YTick',(1:n_val),...
    'YTickLabel',...
    {num2str(SNRdB_vals(1:end-1) ,3);sprintf('>%.0f',dbMax)});
hlabl = get(cb,'ylabel');
set(hlabl,'String','FrequenzMittel(L_Z(SNR)) /dB ');
title(sprintf(['SNR-Kartierung im RAR, mit dem Modalmodell\n ',...
    'Frequenzbereich: %.1f bis %.1f Hz\n',...
    'Annahme max. Störgeräuschpegel: %d dB(Z)\n',...
    'Anregungspegel: %d dB'],fb(1),fb(2),L_Noise,L_Anregung))
xlabel('Raumkoordinate x /m \rightarrow')
ylabel('Raumkoordinate y /m \rightarrow')
text(TuerePos(1),TuerePos(2)-0.5,'Türe')
text(LS_Pos(1)-2,LS_Pos(2)-0.4,'LS-McBrown')
plot(LS_Pos(1),LS_Pos(2),'ko','MarkerFace','k')
%

```

plot\_SNR\_frequencyrange.m

```

%% Plot des SNRs für mehrere Frequenzbereiche
% Author : Siegfried Gündert <siegfried.guendert AT student.fh-ooow.de>
% Date : 26.01.11
% Updated: <>
% Licence: at the end of file
% close all;
% init_SNR_modalmodell_RAR;
%% P A R A M E T E R:
szLS = 'McBrown'; % Name des Lautsprechers
FreqBereiche=[ [9,20];[9,16]; [15 20]; [18,25]};% ; [15,19] ; [19,25]};
n_val = 10; % Werteanzahl in Colorbar
%% Make plots:
Nfbs = length(FreqBereiche) ;
%figure;
for kk=1:Nfbs
    % subplot(spRows,spCols,kk);
    figure;
    fb=FreqBereiche{kk};
    plot_SNR_frequencyrange
    %title(sprintf('Frequenzbereich: %.1f bis %.1f Hz\n',fb(1),fb(2)));
    set(gcf,'PaperUnits','centimeters',...
        'PaperPosition',[3,3,14,15]); % Abmessungen im PDF
    % PDF-erstellen
    print( '-dpdf','-r200',...
        sprintf('SNR_Karte_%d_bis_%d_Hz_%s',fb(1),fb(2),szLS))
end
arrange('tight',2) % Grafiken anordnen
%

```

MakePlotsOfFrequencyranges.m

```

function stModes = readSHS(FilePath)
% Read Shape Table Spreadsheet Data (*.shs-Files) from ME'scope
% Usage: stModes = readSHS(FilePath)
% input: Path and Filename of *shs file

```

```

%           example: FilePath='ShapeTable1.shs'
% output:  stModes(n) = 1xN_Modes struct array with fields:
%           Label ... of the Mode
%           DOF   ... Label of the DegreeOfFreedom
%           Frequency ... of the mode n
%           Damping ... of the mode n
%           Magnitude ... Eigenfunction r
%           Phase ... Eigenfunction phi
% Author :  Siegfried Gündert <siegfried.guendert AT student.fh-oow.de>
% Date   :  7.12.2010
% Updated:  >
%clear
%close all;
%FilePath='Shape Table 1.shs';
%% File Auslesen:
fid=fopen(FilePath,'r'); % fid...file identifier.
kk=1; pp=1;% counter
while 1
    tline = fgetl(fid); % lese nächste Zeile von fid
    % wenn es Buchstabe ist, dann ist ende des filese erreicht
    if ~ischar(tline), break, end
    % suche alle Trennzeichen für Tabellen-Elemente in einer Zeile
    idx = find(tline==' ');
    % Das erste Tabellen-element ist:
    LineLabel = tline(idx(1)+1 : idx(2)-1);
    if strcmp(LineLabel,'Shape Label')
        ShapeLabel = getElements(idx(3:end),tline);
    elseif strcmp(LineLabel,'Shape Frequency')
        ShapeFrequency = getElements(idx(3:end),tline);
    elseif strcmp(LineLabel,'Shape Damping')
        ShapeDamping = getElements(idx(3:end),tline);
    elseif strcmp(LineLabel,'GPO:PO')
        M= getElements(idx,tline);
        idx_magni = 1:2:length(ShapeLabel)*2-1;
        Magnitude(pp,1:length(idx_magni))=M{4}(idx_magni);
        idx_phase = 2:2:length(ShapeLabel)*2;
        Phase(pp,1:length(idx_phase))=M{4}(idx_phase);
        DOF{pp} = M{2};
        pp = pp + 1;
    end
    kk = kk + 1;
end
fclose(fid);
%% Output Structure:
for n_mode=1:length(ShapeLabel)
    stModes(n_mode).Label = cell2mat(ShapeLabel(n_mode));
    stModes(n_mode).DOF = DOF';
    stModes(n_mode).Frequency = cell2mat(ShapeFrequency(n_mode)) ;
    stModes(n_mode).Damping = cell2mat(ShapeDamping(n_mode)) ;
    stModes(n_mode).Magnitude = Magnitude(:,n_mode);
    stModes(n_mode).Phase = Phase(:,n_mode);
end
end % end of Function readSHS
%% Get Elements Funktion
function cStr = getElements(idx,szInput)
% by Siegfried Gündert Dez. 2010
kk=1;
for pp = 1:length(idx)-1
    Elmnt = szInput(idx(pp)+1:idx(pp+1)-1);
    % wenns kein Leerzeichen oder Anführungszeichen oder wenns nicht

```

```

% Leer ist, dann muss es ein Element sein und gespeichert werden:
if length(Elmnt)>1 | ~( strcmp(Elmnt, '') | ...
    isempty(Elmnt) | isspace(Elmnt) ),
    cStr{kk} = Elmnt;
    if str2num(Elmnt) | isspace(szInput(idx(pp)))
        %Kommata gegen Punkte eintauschen:
        idx2 = find(Elmnt==' ');
        Elmnt(idx2) = ',';
        cStr{kk} = str2num(Elmnt);
    end
    kk=kk+1;
end
end
if length(szInput) > idx(end)
    Elmnt = szInput(idx(end)+1 : length(szInput));
    % Kommata gegen Punkte tauschen: Warum gibts da immernoch keine
    % konvention :-P ?
    idx2= find(Elmnt==' ');
    Elmnt(idx2)=',';
    % In Cell den Vektor schreiben:
    cStr{kk}=str2num(Elmnt);
end
end

```

readSHS.m

### D.2.5. Skript zur Ortung der Fremdgeräusche mit einer Migrationsanalyse

Das Matlabskript zur Migrationsanalyse wurde nach [Hor10] umgesetzt und leicht modifiziert (z. B. die Koordinatenberechnung der Empfänger).

```

%% VERSUCH der FremdgeräuschQuellortung im RAR der PTB
%% anhand einer Migrationsanalyse %%
% nach Tobias Horstmann (Geophysik, Karlsruhe)
%   Dipl.Arbeit: Interferometrische Analyse seismischer
%               Hintergrundsignale,
%               Karlsruher Institut für Technologie(KIT), 2010
% Zur Untersuchung auf einen überwiegenden Fremdgeräusch-Quellort.
% Es herrscht ein Modales Schallfeld, was die Ortung fragwürdig macht.
% Nichtstationäre Anteile könnten das vielleicht doch ermöglichen.
% Vorgehensweise:
% Es werden 'unbiased' Kreuzkorrelationsfunktionen gemittelt. (mal
% untersuchen ob das richtig ist, das zu machen)
% Die Einhüllenden der  $N=0.5*(n^2-n)$  Kreuzkorrelationsfunktionen
% werden berechnet, geglättet und dann normiert. --> E_x(KKF)
%
% Für hypothetische Quellen werden die zeitdifferenzen zwischen den
% Empfängern berechnet, dann die verzögerten Amplituden derer E_x(KKF)
% für alle Senderkombinationen aufsummiert, was die sog. Semblance ist, die
% den Maximalwert  $S_{max} = 0.5*(n^2-n)$  für n Empfänger bekommen kann.
%
% Author : Siegfried Gündert <siegfried.guendert AT student.fh-ooe.de>
% Date   : 26.01.2011
% Updated: <>
% Licence: at the end of file
clear; %close all;
addpath(genpath(pwd))
%% Positionsdaten festlegen:
Lx=9; Ly=8; Lz=6; % Raummaße Keilspitzen
PosRotationsMittelpunkt=[4.2,4.0]; %(x,y)
%MPLabels ={'MP1','MP2','MP3','MP4','MP5','MP7'};% ;'MP8'

```

```

% Mikrofonpositionen reeleativ vom Rotationsmittelpunkt
%
%           x-coord.  y-coord.
PosMikrosReMittelpunkt = [0.1-4.2 , 0.1-4.0 ;... % MP1
                        0.603,    -1.54    ;... % MP2
                        2.1 ,      -1.62    ;... % MP3
                        8.9-4.2 , -3.9     ;... % MP4
                        2.65 ,     0        ;... % MP5
                        0.46 ,     0.46    ;... % MP7
                        0 ,         3.9     ]; % MP8

PosMPk = ...
    [PosMikrosReMittelpunkt(:,1) + PosRotationsMittelpunkt(1),...
     PosMikrosReMittelpunkt(:,2) + PosRotationsMittelpunkt(2) ];

% % Plot Mik Positionen:
% figure;
%     line([0,Lx],[4 4], 'color', 'k');
%     hold on;
%     line([4.5,4.5],[0 Ly], 'color', 'k')
%     plot(PosMPk(:,1),PosMPk(:,2),'o')
% Messung auswählen, Blockverarbeitung der Messfiles:
MeasFileIDX=[1,2,3,4,5,7];%
MeasNum=3; %Messungsnummer
    if MeasNum == 2
        MeasFileIDX=[MeasFileIDX,8];
    end
Nchan=length(MeasFileIDX);
[NNw fs] = wavread( sprintf('Messung%d_Ch%d_resample.wav',MeasNum,1),...
                  'size');

% E I N S T E L L U N G: welcher Bereich im File analysiert werden soll:
Nblock = round(100*fs); % Länge eines Blocks (100 Sekunden)
Nwavblk=1; %*Nblock;%floor(0.125*NNw(1)/Nblock)-1; % Anzahl Wavblöcke
StartSample = round(400*fs);%round(NNw(1)/4); % Startsample für Analyse
xw = zeros(Nblock,Nchan);

% xcorr und Einhüllende berechnen Parameter
iP      = nchoosek((1:Nchan),2); % Permutationsindex
Ncorrs  = length(iP);
maxlags = round(fs*10/343); %Maximal 10 meter weg (ist großzügig);
x_cor_sum = zeros(2*maxlags+1,Ncorrs);
Ex = zeros(2*maxlags+1,Ncorrs);
for bn=1:Nwavblk
    %figure;
    for kc = 1:Nchan
        % Einlesen
        fname =...
            sprintf('Messung%d_Ch%d_resample.wav',MeasNum,MeasFileIDX(kc));
        [xw(:,kc),fs] =...
            wavread(fname, [(bn-1)*Nblock+1,bn*Nblock]+StartSample);
    end
    for nx = 1:Ncorrs
        x_cor_sum(:,nx) = x_cor_sum(:,nx) + ...
            xcorr( xw(:, iP(nx,1) ) ,...
                  xw(:, iP(nx,2) ) ,maxlags, 'unbiased');
    end
end
% Normierung Einhüllende
for nx = 1:Ncorrs
    Ex(:,nx)= fastsmooth(he(x_cor_sum(:,nx)),10);
    Ex(:,nx) = Ex(:,nx)./max(Ex(:,nx));
end
% Alle möglichen Quellpositionen durchrechnen:
Nq = 30; % Anzahl hypothetischer Quellen

```



```

Q_xPos = linspace(0,Lx,Nq);
Q_yPos = linspace(0,Ly,Nq);
c = 343; %Schallgeschwindigkeit /m/s
kk=0;
S = zeros(Nq*Nq, 3);
Skoord = zeros(Nq*Nq, 3);
for ix = 1:Nq
    Qx = Q_xPos(ix);
    for iy = 1:Nq
        Qy = Q_yPos(iy);
        kk=kk+1;
        for nx=1:Ncorrs
            % Empfängerpositionen:
            E1x = PosMPk(iP(nx,1), 1); %E1
            E1y = PosMPk(iP(nx,1), 2);
            E2x = PosMPk(iP(nx,2), 1); %E2
            E2y = PosMPk(iP(nx,2), 2);
            % Entfernung zur Quelle:
            d1 = sqrt((Qx-E1x)^2 +(Qy-E1y)^2); %Abstand: Quelle<-->E1
            d2 = sqrt((Qx-E2x)^2 +(Qy-E2y)^2); %Abstand: Quelle<-->E2
            % Zeitdifferenz
            t1 = d1/c;
            t2 = d2/c;
            Dt = t2-t1;
            idx_tau=round(Dt*fs)+maxlags; %length(Ex(:,1));
            if nx==1
                Semblance_current_q = Ex(idx_tau,nx);
            else
                Semblance_current_q = ...
                    Semblance_current_q + Ex(idx_tau,nx);
            end
        end
        S(kk,3) = Semblance_current_q;
        S(kk,1) = ix;
        S(kk,2) = iy;
        Skoord(kk,3) = Semblance_current_q;
        Skoord(kk,1) = Q_xPos(ix);
        Skoord(kk,2) = Q_yPos(iy);
    end
end
% S(:,3)=S(:,3)/max(S(:,3));
% Skoord(kk,3)=Skoord(kk,3)/max(Skoord(kk,3));
[X,Y] = meshgrid(Q_xPos(:),Q_yPos(:));
Z = griddata(Skoord(:,1),Skoord(:,2),Skoord(:,3),X,Y);
figure;
n_cont=15;
colormap(gray(n_cont+1));
contourf(X,Y,Z,n_cont)
cb=colorbar;
zlab = get(cb,'ylabel'); % Colorbar beschriften:
set(zlab,'String','Semblance');
%set(gca,'CLim',[9 14]);
axis equal
hold on;
line([0,Lx],[4 4], 'color','k');
hold on;
line([4.5,4.5],[0 Ly], 'color','k')
plot( PosMPk(1:length(MeasFileIDX),1),...
      PosMPk(1:length(MeasFileIDX),2),...
      'ko','MarkerFace',[1,.3,.25]);%,'LineWidth',1.1)

```

```
xlabel('Raumkoordinate x /m \rightarrow ')
ylabel('Raumkoordinate y /m \rightarrow ')
title(...
    sprintf('Migrationsanalyse Messung %d, Zeitintervall %.1f ... %.1f s',...
        MeasNum,StartSample/fs,(Nwavblk*Nblock + StartSample)/fs))
% Zeitbereich='EndViertel';
% print('-dpdf','-r300',sprintf('MigrAnaMessung%d_%s',MeasNum,Zeitbereich))
% arrange('tight',2)
%
```

MigrationsanalyseFremdgerMess.m

# Symbole und Abkürzungen

## Allgemeine Notation:

- Vektoren werden als fettgedruckte Kleinbuchstaben dargestellt.  
Beispiel:  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ .
- Matrizen werden als fettgedruckte Großbuchstaben dargestellt.  
Beispiel:  $\mathbf{S}_{xx}$ .
- Schätzgrößen werden durch ein Dach gekennzeichnet.  
Beispiel:  $\hat{S}_{xx}$ .

## Römische Symbole:

$c$	Schallgeschwindigkeit ( $\approx 343m/s$ )
$f_s$	Samplingfrequenz
$H(\cdot)$	Übertragungsfunktion eines LTI-Systems
$h(\cdot)$	Impulsantwort eines linearen, zeitinvarianten Systems
$L_x$	Länge in x-Richtung (wie auch $L_y, L_z$ )
$q$	Schallfluss einer Quelle
$r$	Radius
$r$	Ortsindex
$R_{xy}$	Kreuzkorrelationsfunktion
$S_{xx}$	diskretes Auto-Leistungsdichtespektrum
$S_{xy}$	diskretes Kreuz-Leistungsdichtespektrum
$t$	kontinuierliche Zeitvariable
$V$	Volumen eines Raumes
$w(\cdot)$	Fensterfunktion
$X_i(\cdot)$	Fouriertransformierte von $x_i(\cdot)$

## Griechische Symbole:

$\gamma^2(\cdot)$	Kohärenz, genauer: Mean-Squared-Coherence (MSC)
$\lambda$	Wellenlänge

$\Lambda_n(\omega)$	Diagonale Eigenwertmatrix der Mode $n$
$\pi$	3.14159265359...
$\tau$	Zeitverschiebung
$\varphi$	Phase
$\varphi$	Azimutwinkel
$Psi_n$	Eigenfunktion der Mode $n$
$\omega$	Kreisfrequenz

**Spezielle Symbole:**

$\arg\{\cdot\}$	Argument einer komplexen Funktion
$E\{\Delta\}$	Erwartungswertoperator
$\text{Im}\{\Delta\}$	Imaginärteil einer komplexen Zahl
$\mathcal{L}(\cdot)$	Lagrange-Funktion
$\text{Re}\{\Delta\}$	Realteil einer komplexen Zahl
$\text{Std}\{x\}$	Stichproben-Standardabweichung einer Zufallsvariable $x$
$\infty$	unendlich
*	Faltungssymbol
$(\cdot)^T$	Transponierung
$(\cdot)^*$	Konjugation

**Abkürzungen:**

ALDS	Auto-Leistungsdichtespektrum
bez.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
dB	Dezibel (logarithmische Maßeinheit)
d.h.	das heißt
DOF	Freiheitsgrad (engl. <i>Degree-Of-Freedom</i> )
FFT	schnelle Fourier-Transformation (engl. <i>Fast Fourier-Transform</i> )
KLDS	Kreuz-Leistungsdichtespektrum
LDS	Leistungsdichtespektrum
MDOF	System mit mehreren Freiheitsgraden (engl. <i>Multiple-Degree-Of-Freedom</i> )
MP	Mikrofon-Position
RAR	reflexionsarmer Raum

SDOF	System mit einem einzigen Freiheitsgrad (engl. <i>Single-Degree-Of-Freedom</i> )
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis (s/n) (engl. <i>Signal to Noise Ratio</i> ) bzw. Signal-Rauschabstand (lg s/n /dB)
sog.	sogenannt/e/n
z. B.	zum Beispiel

# Literaturverzeichnis

- [Bla09] Blau, M.: *Akustische Messverfahren*, Institut für Hörtechnik und Audiologie. Slides, 2009. XXI. Winterschule der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Physik Pichl.
- [Bor91] Bork, I.: *Modalanalyse von Schallfeldern*. *Acustica*, Vol. 75:154–167, 1991.
- [BP71] Bendat, J. S. und Piersol, A. G.: *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- [BW09] Bethke, C. und Wittstock, V.: *Technical aspects in the qualification of free-field environments*. In: *DAGA*, 2009.
- [BW10] Bethke, C. und Wittstock, V.: *Erfahrungen mit der Raumrückwirkung in hochabsorbierenden Halb- und Viertlräumen*. In: *DAGA*, 2010.
- [CM82] Cremer, L. und Müller, H. A.: *Principles and Applications of Room Acoustics*, Band 2. Applied Science Publishers, 1982.
- [Cre74] Cremer, L.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik*, Band 2. Hirzel, Stuttgart, 1974.
- [Cro07] Crocker, M. J. (Herausgeber): *Handbook of Noise and Vibration Control*. John Wiley & Sons, 2007.
- [Die68] Diestel, H. G.: *Messung des mittleren Reflexionsfaktors der Wandauskleidung in reflexionsarmen Räumen*. *Acustica*, Vol. 20:101–104, 1968.
- [DIN99] *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, DIN V ENV 13005*, 1999.
- [DIN04] *DIN EN ISO 3745 Akustik - Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume*, 2004.
- [Ewi88] Ewins, D. J.: *Modal Testing: Theory and Practice*. Research Studies Press, 24 Belvedere Road, Taunton, Somerset, England TA1 1HD, 1988.
- [Fuc10] Fuchs, H.: *Schallabsorber und Schalldämpfer*. Springer, 3. Auflage, 2010.
- [FZSP98] Fuchs, H., Zah, X., Späh, M. und Pommer, M.: *Qualification of small freefield and reverberation rooms for low frequencies*. In: *Euro Noise*, 1998.
- [Grü63] Grützmacher, M.: *Der neue schalltote Raum der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt*. *Acustica*, Vol. 13:373–376, 1963.
- [Hor10] Horstmann, T.: *Interferometrische Analyse seismischer Hintergrundsignale*. Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät Physik, Februar 2010.
- [Kör90] Körner, C.: *Erfahrungen bei der akustischen Eignungsprüfung reflexionsarmer Räume*. *wksb-Sonderausgabe*, Vol. ? :24–28, 1990.
- [Kut04] Kuttruff, H.: *Akustik, eine Einführung*. S. Hirzel Verlag, 2004.
- [Kut09] Kuttruff, H.: *Room Acoustics*. Spon Press, 5. Auflage, 2009.
- [LSW09] Lerch, R., Sessler, G. M. und Wolf, D.: *Technische Akustik*. Springer, 2009.

- [LV01] Luykx, I. M. und Vercammen, I. M.: *Reflections in anechoic rooms*. In: *Inter Noise*, 2001.
- [Mec95] Meche, F. P.: *Schallabsorber*, Band 2. Hirzel Verlag Stuttgart - Leipzig, 1995.
- [Mös07] Möser, M.: *Technische Akustik*. Springer, 7. Auflage, 2007.
- [Mös10] Möser, M. (Herausgeber): *Messtechnik der Akustik*. Springer, 2010.
- [Nat92] Natke, H. G.: *Einführung in die Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse*. Vieweg, 1992.
- [Ros07] Rossing, T. D. (Herausgeber): *Springer Handbook of Acoustics*. Springer, 2007.
- [Sch06] Schirmer, W. (Herausgeber): *Technischer Lärmschutz*. Springer, 2006.
- [SK08] Schneider, S. und Kern, C.: *Acoustical Behavior of the Large Anechoic Chamber at the Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique in the Low Frequency Range*. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 94:141–147, 2008.
- [Vei05] Veit, I.: *Technische Akustik*. Vogel, 6. Auflage, 2005.
- [Vor08] Vorländer, M.: *Auralization*. Springer, 1. Auflage, 2008.
- [Wel67] Welch, P. D.: *The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms*. *IEEE Trans. Audio and Electroacoust.*, Vol. AU-15:70–73, 1967.

# Danksagung

*Mein Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Matthias Blau für die Betreuung der Bachelorarbeit und die Ideen zur Erweiterung des Themas.*

*Ich danke Dr.-Ing. Ingolf Bork, der mich während der Praxis- und Bachelorarbeitsphase ideenreich und wohlwollend betreute und mir so einiges in dieser Zeit beibrachte.*

*Ich danke Andreas Schmidt für seine tatkräftige Unterstützung und für die Stadtführung, die mir eine Freude war.*

*Dr. rer. nat. Christoph Kling gilt mein Dank vor allem für die Hilfe bei der Erstellung des Messprogramms in Visual Basic.*

*Außerdem danke ich Georg Tomin für seine spontanen Hilfestellungen und für die amüsanten Unterhaltungen.*

*Ich danke allen, die mir durch Korrekturlesen eine große Hilfe waren und denjenigen, die mich während der Arbeit unterstützten.*

*Meiner Familie und den mir Nahestehenden danke ich für ihr Dasein und die Unterstützung.*

*Zum Schluss sei für die Lehre im Institut für Hörtechnik und Audiologie und der PTB für die Praxisstelle gedankt.*