

# **Messung von dreidimensionalen Impulsantworten: Untersuchung der Genauigkeit**

## **Bachelor-Thesis**

zur Erlangung des akademischen Grades B.Sc.

**Nico Hecht**

**Matrikelnummer 2130493**



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Fakultät Design, Medien und Information  
Department Medientechnik

Erstprüfer: Prof. Dr. Eva Wilk

Zweitprüfer: Prof. Dr. Robert Mores

Hamburg, 17. März 2017

## Zusammenfassung

Diese Thesen beschäftigt sich mit der Untersuchung der Genauigkeit von Messungen für dreidimensionale Impulsantworten. Es werden Methoden angewandt, mit welchen die Genauigkeit des Messsystems als Ganzes und seiner Einzelkomponenten ermittelt werden können. Gegebenenfalls auftretende Ungenauigkeiten sollten bei der Benutzung von Messsystemen dieser Art berücksichtigt werden. Dazu werden mögliche Ursachen, aus denen die Ungenauigkeiten resultieren könnten, aufgezeigt. Insgesamt soll ermittelt werden, was die Messung von dreidimensionalen Impulsantworten ermöglicht und ob die Genauigkeit für die Anwendung in der Praxis ausreichend ist.

Als Beispiel für diese Untersuchung wird das Messsystem „IRIS“ der neuseeländischen Firma Marshall Day Acoustics herangezogen.

## Abstract

This paper is about the analysis of the accuracy of three-dimensional impulse response measurements. Methods will be demonstrated to analyse the accuracy of the system as a whole and of its single components. By using measurement systems of this type existing variances must be taken into consideration. Furthermore possible causes of appearing variances will be presented. Overall it is to be determined, what the measurement of three-dimensional impulse responses allows and if the accuracy is sufficient for the practical use.

As an example the measurement system “IRIS” by Marshall Day Acoustics from New Zealand will be used to elucidate this procedure.

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Das IRIS Messsystem</b>  | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit des IRIS Messsystems</b>  | <b>11</b> |
| 3.1      | Erfassung der örtlichen Genauigkeit . . . . .                         | 11        |
| 3.1.1    | Messaufbau . . . . .  | 12        |
| 3.1.2    | Messdurchführung . . . . .  | 13        |
| 3.1.3    | Messergebnisse . . . . .  | 14        |
| 3.2      | Erfassung der zeitlichen Auflösung . . . . .                          | 15        |
| 3.2.1    | Messaufbau . . . . .  | 16        |
| 3.2.2    | Messdurchführung . . . . .  | 18        |
| 3.2.3    | Messergebnisse . . . . .  | 20        |
| 3.3      | Praxistest . . . . .  | 22        |
| 3.3.1    | Messaufbau . . . . .  | 23        |
| 3.3.2    | Messdurchführung . . . . .  | 24        |
| 3.3.3    | Messergebnisse . . . . .  | 25        |
| 3.4      | Auswertung . . . . .  | 29        |
| <b>4</b> | <b>Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit der Einzelkomponenten</b> | <b>31</b> |
| 4.1      | Untersuchung der Signalverarbeitung . . . . .                         | 31        |
| 4.1.1    | Messaufbau . . . . .  | 31        |
| 4.1.2    | Messdurchführung . . . . .  | 32        |
| 4.1.3    | Messergebnisse . . . . .  | 34        |
| 4.2      | Empfangscharakteristik der Mikrofonkapseln . . . . .                  | 35        |
| 4.2.1    | Messaufbau . . . . .  | 35        |
| 4.2.2    | Messdurchführung . . . . .  | 36        |
| 4.2.3    | Messergebnisse . . . . .  | 37        |
| 4.3      | Auswertung . . . . .  | 41        |
| <b>5</b> | <b>Zusammenfassung und Fazit</b>                                      | <b>42</b> |
| <b>A</b> | <b>Anlagen</b>  | <b>43</b> |
| A.1      | Erfassung der örtlichen Genauigkeit . . . . .                         | 43        |
| A.2      | Erfassung der zeitlichen Auflösung . . . . .                          | 47        |
| A.3      | Untersuchung der Signalverarbeitung . . . . .                         | 49        |

*Inhaltsverzeichnis*

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> | <b>52</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>   | <b>54</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>55</b> |

# 1 Einleitung

Die Messung von raumakustischen Eigenschaften wird heutzutage in einer Vielzahl von Einsatzgebieten verwendet: Zur Beschreibung der Akustik von Räumen, in denen Sprachkommunikation stattfindet (zum Beispiel Unterrichtsräume, Konferenzräume, Hörsäle), oder Räumen mit sehr speziellen Anforderungen (zum Beispiel Theater, Konzertsäle, Kinos oder Tonstudios), aber auch als Referenzgröße für Bauakustik-Messungen (Deutsches Institut für Normung e.V. 2016: 5).

Im Normalfall wird die Messung mittels Messmikrofon und Dodekaeder-Lautsprecher durchgeführt. Der Dodekaeder gibt ein Messsignal aus, mit welchem der Raum angeregt wird, wie beispielsweise eine MLS-Folge<sup>1</sup> eines Rauschsignals oder einen Sinus-Sweep. Das Mikrofon misst nach der Anregung des Raumes das Abklingverhalten und berechnet mittels Kreuzkorrelation des gesendeten und aufgenommenen Signals die daraus resultierende Impulsantwort des Raumes. Aus der Impulsantwort können im Folgenden die frequenzabhängigen Nachhallzeiten, der Frequenzgang oder auch ein Wasserfall-Diagramm generiert werden („Wiener-Chintschin-Theorem“). Für solche Messungen gelten als Anforderung eine gleichmäßige Anregung der zu überprüfenden Räumlichkeit mittels richtungsunabhängigem Lautsprecher (Dodekaeder) oder mehrerer Positionen der Sendequelle im Raum. Das Messmikrofon sollte eine Kugelcharakteristik zur richtungsunabhängigen Messung und einen möglichst hohen Rauschabstand aufweisen. Abgesehen vom Messsystem sollte die zu untersuchende Räumlichkeit frei von Störgeräuschen und anderen Schallquellen sein, welche die Messung verfälschen könnten (Dickreiter 2014: 639-642).

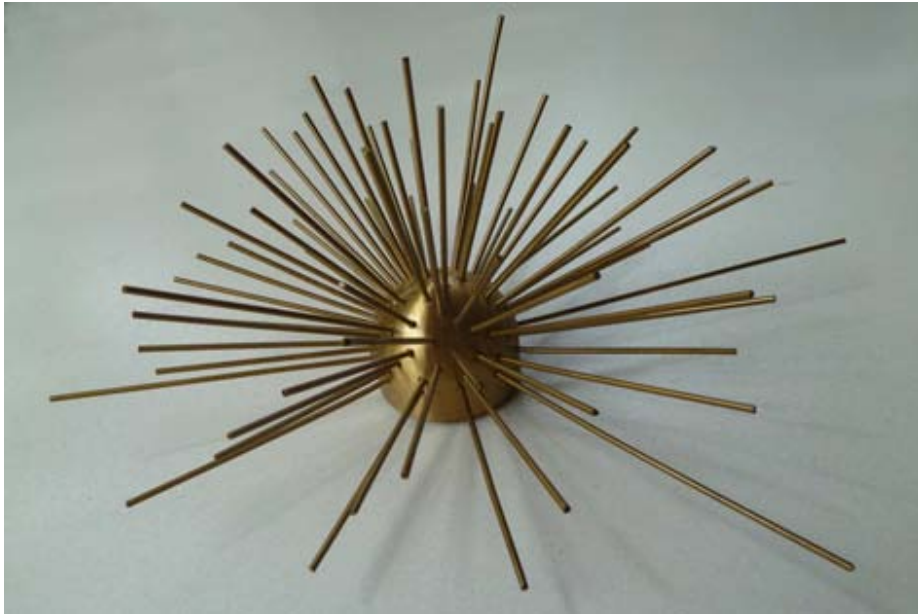
Als Weiterentwicklung der klassischen Raumakustik-Messung kann die dreidimensionale Messung mittels omnidirektionalem Mikrofon betrachtet werden. Bei dieser Methode wird statt einer einzelnen Mikrofonkapsel mit Kugelcharakteristik ein Mikrofon genutzt, welches zumeist aus vier Mikrofonkapseln mit Nierencharakteristik in tetraedischer Anordnung besteht (Yamasaki und Itow 1989; Protheroe und Guillemain 2013). Der Vorteil dieser Messung ist, dass nicht nur ein eindimensionales Impulsdigramm, sondern ein dreidimensionales Diagramm, der sogenannte „Schalligel“ (Abb. 1.1 auf S. 2), dargestellt werden kann. Somit werden neben der Nachhallzeit noch weitere Informationen zur umfassenderen raumakustischen Untersuchung geboten, *„[d]enn es hat sich gezeigt, dass die hierzu bisher fast ausschließlich herangezogene Nachhallzeit allein nicht ausreicht [...]“* (Junius 1959).

---

<sup>1</sup>engl.: Maximum-length-sequence; dt.: Maximallängensequenz

## 1 Einleitung

Der von Erwin Meyer und seinem Studenten R. Thiele entwickelte Schalligel liefert als dreidimensionales Modell Informationen darüber, aus welcher Richtung Schall eintrifft. Hierbei ist die Länge der Strahlen proportional zur eintreffenden Schallenergie (Guicking 2012: 30-32).



**Abbildung 1.1:** Modell eines Schalligels nach Erwin Meyer und R. Thiele (Guicking 2012: 32)

Derartige Messverfahren können dem Messingenieur durch vorhandene Ungenauigkeiten des Messsystems allerdings auch fehlerbehaftete Ergebnisse liefern, wenn zum Beispiel die Richtung des eintreffenden Schalls nicht exakt ist oder die Zeit in der Schalligel-Darstellung falsch angezeigt wird. So wäre es denkbar, dass bestimmte Flächen im Raum fälschlicherweise für die Ursache störender Reflexionen gehalten werden, während das tatsächlich vorhandene raumakustische Problem nicht identifiziert wird. Infolgedessen stellt sich die Frage, wie genau ein solches Messsystem in Bezug auf die Genauigkeit der Richtung und der Zeit, nach welcher Reflexionen eintreffen, ist und ob sich damit raumakustische Probleme ausreichend feststellen lassen. Falls Ungenauigkeiten vorhanden sein sollten, müssen diese bei der Auswertung von dreidimensionalen Messungen berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieser Bachelor-Thesis wird zunächst auf das zu untersuchende Messsystem eingegangen, im Anschluss die Genauigkeit des kompletten Systems evaluiert und ein Praxistest durchgeführt, in welchem es gilt ein raumakustisches Problem zu lösen. Zur Ermittlung der Genauigkeiten des Messsystems müssen die örtliche Genauigkeit (Genauigkeit des angezeigten Winkels) und die zeitliche Auflösung (Einteilung

## 1 Einleitung

von Reflexionen in bestimmte Zeitfenster) getrennt voneinander untersucht werden. Um die Ursache von gegebenenfalls auftretenden Ungenauigkeiten weiter eingrenzen zu können, werden die Einzelkomponenten des Messsystems noch einmal getrennt voneinander betrachtet. Dabei wird die Genauigkeit der Signalverarbeitung mit der Simulation von Messsignalen in der Software ermittelt und die Empfangscharakteristiken des Mikrofons mit den einzelnen Mikrofonkapseln gemessen. Nach einer kritischen Betrachtung der Messergebnisse werden im Anschluss die bei der Benutzung zu berücksichtigenden Ungenauigkeiten angegeben, in Frage kommende Ursachen für die Ungenauigkeiten genannt und Möglichkeiten zur Erhöhung der Genauigkeit vorgeschlagen.

Um die Vorgehensweise zur Untersuchung der Genauigkeit zu zeigen, wird das IRIS Messsystem von der neuseeländischen Firma Marshall Day Acoustics im Nachfolgenden analysiert.

## 2 Das IRIS Messsystem

Das IRIS Messsystem gilt als erstes erschwingliches und großflächig am Markt verfügbares Mess- und Visualisierungssystem für dreidimensionale Impulsantworten (Marshall Day Acoustics 2013). Es setzt sich aus zwei Komponenten zusammen – der IRIS Messsoftware und der darauf abgestimmten Hardware. Der Lieferumfang umfasst:

- USB Stick mit der IRIS Software
- USB Dongle mit Lizenzschlüssel
- Core Sound TetraMic (mit Rycote Mikrofonhalterung)
- MOTU 4pre USB Audio Interface
- Spezielle Kabel Adapter für das Mikrofon
- 30m CAT5E STP Kabel mit etherCON Stecker
- Pelican Flightcase



**Abbildung 2.1:** Foto des IRIS Messsystems im Pelican Flightcase



## 2 Das IRIS Messsystem

Auf dem USB Stick der Software befinden sich Kalibrierungsdateien für das TetraMic und das MOTU 4pre Interface. Jede dieser Kalibrierungen ist auf das jeweilige Gerät und seine Eigenschaften zugeschnitten. Die TetraMic Kalibrierung wird von dem Hersteller Core Sound während der Produktion erstellt, um Fertigungstoleranzen auszugleichen und sicher zu stellen, dass korrekte 3D-Signale ermittelt werden können. Damit für jeden Eingang des MOTU 4pre Audio Interfaces der gleiche Eingangspegel gilt, wird auch dafür eine Kalibrierung mitgeliefert (Marshall Day Acoustics 2015).



**Abbildung 2.2:** Foto des Core Sound TetraMic mit dem Logo nach vorne

Die Kapseln des TetraMic weisen eine Nierencharakteristik auf und sind tetraedisch angeordnet. Das Core Sound-Logo zeigt die Vorderseite des Mikrofons an, die einzelnen Kapseln lassen sich folgendermaßen in ihrer Position beschreiben (Core Sound 2017):

- Kapsel 1: LFU (left/front/up)
- Kapsel 2: RFD (right/front/down)
- Kapsel 3: LBD (left/back/down)
- Kapsel 4: RBU (right/back/up)

## 2 Das IRIS Messsystem

Um Schallmessungen durchführen zu können werden neben dem IRIS Messsystem ein Windows Laptop oder PC, ein Mikrofonstativ für das TetraMic und ein Sendelautsprecher benötigt. Der Sendelautsprecher sollte omnidirektional abstrahlen (Dodekaeder) und für raumakustische Messungen nach ISO 3382-1:2009 geeignet sein (Marshall Day Acoustics 2015: 2-4).

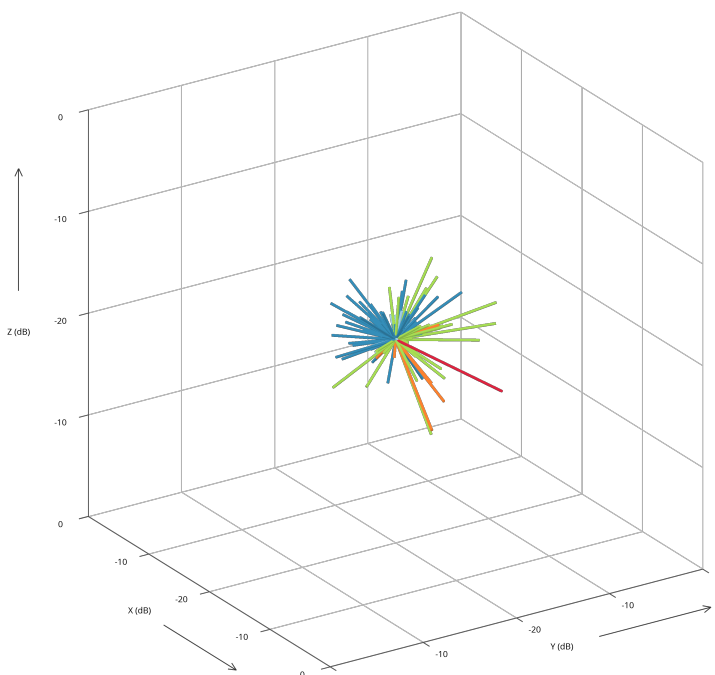
Nachdem ein neues Projekt erstellt und die Programmeinstellungen vorgenommen wurden, können die gewünschten Messungen durchgeführt werden. Im Anschluss an die Messung öffnet sich die jeweilige Analyseansicht. Diese liefert eine dreidimensionale Darstellung des Schalligels, welcher in der Software „IRIS Plot“ genannt wird, und die dazugehörige Impulsantwort. Rechts neben der Darstellung können Einstellungen zur Analyse vorgenommen werden:

- Oktav-Filterung (Breitband, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 1-8 kHz)
- Auflösung der einzelnen Strahlen (1 bis 10 ms in 1 ms Schritten)
- Pegelreferenz (falls eine Schallpegelkalibrierung vorliegt)
- Pegelbereich der Strahlen (10 bis 60 dB in 10 dB Schritten)
- Zeiteinteilung für versch. Einsatzgebiete („Music“, „Speech“, „Studio“)
- Direktschall als 0° Start der Richtungsanzeige

Mit Hilfe dieser Einstellungen lässt sich die Darstellung den gewünschten Anforderungen entsprechend anpassen. So können nur bestimmte Oktav-Bänder betrachtet, die Auflösung verändert und der Pegelbereich der Strahlen eingegrenzt werden. Die möglichen Oktav-Bänder sind dabei abhängig von der ausgewählten Auflösung – die untere Grenzfrequenz wird ebenfalls angezeigt.

Im IRIS Plot wird der Schalligel mit den farbigen Strahlen in einem dreidimensionalen Raster dargestellt. Zur Ermittlung von störenden Reflexionen können Strahlen im Impulsdiagramm mittels linker Maustaste und gedrückter Steuerungs-Taste markiert werden. Hierdurch wird der betreffende Strahl im IRIS Plot hervorgehoben und zusätzliche Informationen wie Schallpegel, Azimut-/Steigungswinkel und die Zeit in der rechten unteren Ecke eingeblendet. Die Länge der Strahlen ist abhängig von der Schallenergie, wie auch im Modell nach Erwin Meyer und R. Thiele (Abb. 1.1 auf S. 2).

## 2 Das IRIS Messsystem



**Abbildung 2.3:** Beispiel eines Schallgels bzw. des IRIS Plots in der IRIS Software

Die einzelnen Strahlen resultieren aus einstellbaren Fensterungen der Impulsantwort und sind farblich für die verschiedenen Einsatzgebiete codiert. Dabei steht die Farbe Rot immer für den Direktschall (0 bis 2 ms). Von IRIS werden die Zeiten in den drei verschiedenen Einstellungen wie folgt eingeteilt:

|        |             |            |
|--------|-------------|------------|
| Music: | 0 - 2 ms    | Rot        |
|        | 2 - 20 ms   | Orange     |
|        | 20 - 80 ms  | Grün       |
|        | 80 - 200 ms | Dunkelblau |
|        | >200 ms     | Hellblau   |

|         |            |            |
|---------|------------|------------|
| Speech: | 0 - 2 ms   | Rot        |
|         | 2 - 50 ms  | Grün       |
|         | 50 - 80 ms | Dunkelblau |
|         | >80 ms     | Hellblau   |

|         |            |            |
|---------|------------|------------|
| Studio: | 0 - 2 ms   | Rot        |
|         | 2 - 15 ms  | Orange     |
|         | 15 - 50 ms | Grün       |
|         | >50 ms     | Dunkelblau |

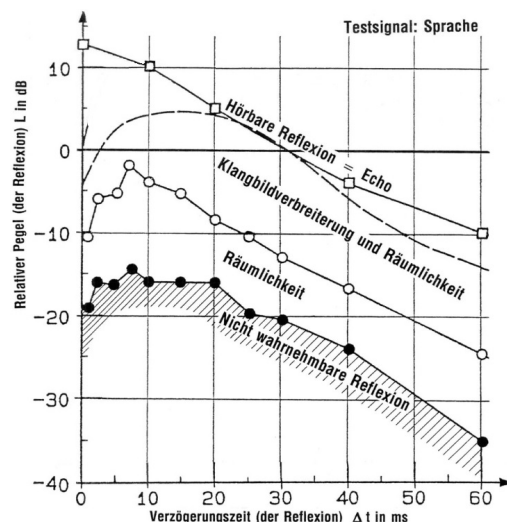
## 2 Das IRIS Messsystem

In der Einstellung „Musik“ steht die orange Einteilung 2 bis 20 ms für frühe Reflexionen in kleineren Räumen und die grüne Einteilung 20 bis 80 ms für frühe Reflexionen in größeren Räumen. In Aufführungssälen beeinflussen Reflexionen über 50 ms den räumlichen Eindruck. Unter 80 ms sorgen Reflexionen für eine Verbreiterung oder Verschiebung des Klangbildes, wobei die späten Reflexionen über 80 ms beim Zuhörer für eine „Einhüllung“ verantwortlich sind (Toole 2008: 97, 295, 405).

Ab einer bestimmten Verzögerung können starke Reflexionen allerdings auch als eigenständiges und damit störendes Schallereignis wahrgenommen werden: Für Musik wurde ermittelt, dass eine hörbare Reflexion nach mehr als 80 ms als störend empfunden wird (Dietsch und Kraak 1986: 214 f.).

Für „Sprache“ wirken sich Reflexionen in der grünen Einteilung 2 bis 50 ms als Verstärkung des Signals aus (Bradley und Sato 2003), wohingegen die dunkelblaue Einteilung 50 bis 80 ms auch hier für den räumlichen Eindruck sorgt. Unter die hellblaue Einteilung  $>80$  ms fallen meist der diffuse Nachhall oder einzelne Reflexionen großer Räume, welche die Sprachverständlichkeit negativ beeinflussen können (Toole 2008: 97, 162) (siehe Abb. 2.4).

Im „Studio“-Modus sollte der zu untersuchende Raum möglichst frei von ersten Reflexionen sein, um Klangverfärbungen durch Kammfiltereffekte zu vermeiden. Die orange Einteilung 2 bis 15 ms steht hier für frühe erste Reflexionen (unter 5 m Laufzeitdifferenz), wohingegen die grüne Einteilung 15 bis 50 ms spätere erste Reflexionen und auch Reflexionen höherer Ordnung umfasst (5 bis 17 m Laufzeitdifferenz). Da Studios im Normalfall nicht sehr groß sind, fällt unter die dunkelblaue Einteilung über 50 ms meist der diffuse Nachhall (Friesecke 2015: 44-46, 100 f.).



**Abbildung 2.4:** Auswirkungen von Reflexionen mit unterschiedlichem Pegel auf Sprache (Sengpiel 1995)

Im Benutzerhandbuch sind Angaben zur Genauigkeit zu finden: Die direktionale Genauigkeit ist abhängig von dem Abstand, den die Mikrofonkapseln zueinander haben. Tiefe Frequenzen sind von der Ungenauigkeit des Kapselabstandes nicht betroffen, da sie eine größere Wellenlänge aufweisen als der Abstand der Mikrofonkapseln zueinander beträgt. Bei Betrachtung des Empfangsdiagramms von Beamformern<sup>1</sup>, weisen diese ein ähnliches Verhalten auf – tiefe Frequenzen werden gut erfasst, während in hohen Frequenzen Unregelmäßigkeiten durch sogenannte Nebenkeulen entstehen (Van Veen und Buckley 1988; Michel und Möser 2010: 365 ff.). Im Falle des IRIS Messsystems nimmt die Genauigkeit bei hohen Frequenzen über 5 kHz ab, weshalb das Signal bei der „Breitband“- und der „1-8 kHz“-Einstellung mit einem 5 kHz Lowpass gefiltert wird, bevor die Software die Richtung des eingetroffenen Signals kalkuliert. Im E-Mail Kontakt mit Daniel Protheroe, welcher das Grundkonzept von IRIS in seiner Master-Thesis entwickelte, gab er an, dass die Frequenz von 5 kHz gewählt wurde, um die größten Ungenauigkeiten zu behandeln ohne das Spektrum zu stark zu beschränken. Die horizontale Genauigkeit wird mit  $\pm 7,5^\circ$  angegeben. Für die vertikale Genauigkeit wird kein Wert angegeben, aber die Aussage getroffen, dass die ermittelte Genauigkeit von  $\pm 7,5^\circ$  in jeder Richtung gelten soll (Marshall Day Acoustics 2015; Protheroe und Guillemin 2013).

Neben dem IRIS Plot lassen sich wie bei anderen akustischen Messsystemen auch Parameter direkt ablesen. So liefert IRIS den Durchschnittswert und die Werte für Oktav-Bänder folgender Parameter:

- Signal-Rausch-Abstand (Decay Range)
- Frühe Abklingzeit (EDT: Early Decay Time)
- Nachhallzeit (T20, T30)
- Stärkemaß (G, G Early, G Late)
- Seitenschallgrad (LF, LFC)
- Klarheitsmaß (C80)
- Deutlichkeitsmaß (C50)
- Deutlichkeit (D50)
- Schwerpunktzeit (Ts)
- Unterstützungsmäß (ST Early, ST Late)

Des Weiteren lässt sich der IRIS Plot als Grafik oder als Text-File exportieren. Das Text-File liefert genauere Werte mit mehr Nachkommastellen und kann in Google SketchUp importiert werden. Somit können die Reflexionen direkt in einem Nachbau

---

<sup>1</sup>Mikrofon-Array zur Ortung von Schallquellen

## 2 *Das IRIS Messsystem*

des betreffenden Raumes anschaulich gemacht werden. Außerdem lässt sich die Impulsantwort im Mono- oder B-Format importieren und exportieren.

Als Messsignal ist ein exponentiell ansteigender Sinus-Sweep festgelegt. In den Einstellungen können die Sweep Länge (1 bis 30 Sekunden), die erwartete Länge der Impulsantwort (1 bis 30 Sekunden), sowie die Start- und Endfrequenz festgelegt werden. Die Nutzung anderer Messsignale, wie eine MLS-Folge eines Rauschsignals, ist nicht möglich.

# 3 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit des IRIS Messsystems

Für die Untersuchung eines Messsystems zur Erfassung dreidimensionaler Impulsantworten muss zunächst das Messsystem als Ganzes untersucht werden. Diese Untersuchung muss die örtliche und die zeitliche Genauigkeit getrennt von einander behandeln. Bei der örtlichen Genauigkeit wird Schall kontrolliert aus einem bestimmten Winkel abgestrahlt und danach der eingestellte Wert mit dem ausgegebenen Wert in der Messsoftware verglichen. Danach wird die zeitliche Auflösung untersucht. Im Fall des IRIS Messsystems wird hierbei zunächst betrachtet, ob Reflexionen nach z.B. 2 ms auch exakt als solche gemessen werden oder es Abweichung im Vergleich zu den ermittelten Werten anderer Software zur Messung von Raumakustik gibt. Analog hierzu kann eine Untersuchung der zeitlichen Auflösung auch in anderen Messsystemen vorgenommen werden. Im Anschluss soll das Messsystem noch einem Praxistest unterzogen werden, um herauszufinden, ob beispielsweise ein vorhandenes raumakustisches Problem lokalisiert werden kann, um es effektiv zu behandeln.

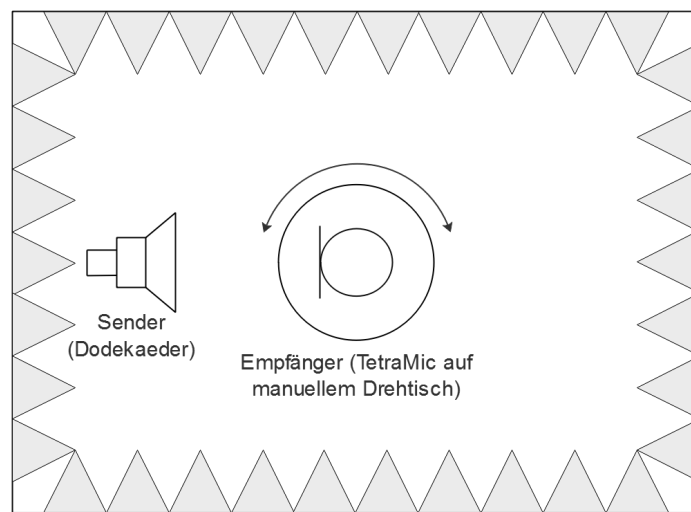
## 3.1 Erfassung der örtlichen Genauigkeit

Das Herzstück des IRIS Messsystems und der Vorteil gegenüber der klassischen akustischen Messung ist die dreidimensionale Darstellung der Reflexionen. Hier ist es von besonderem Interesse, dass die angezeigten Richtungen auch mit der Realität übereinstimmen. Bei der vom Hersteller angegebenen horizontalen Genauigkeit von  $\pm 7,5^\circ$  kann es allerdings dazu kommen, dass die von IRIS berechnete Reflexion in der Wirklichkeit  $7,5^\circ$  in der einen oder anderen Richtung abweicht. In dem Paper zur Untersuchung der Richtungs Genauigkeit wurde lediglich die horizontale Ebene untersucht und behauptet, dass die ermittelte Genauigkeit für jede Richtung gilt (Protheroe und Guillemin 2013: 8).

Zur Untersuchung der Genauigkeit gilt es zunächst die Herstellerangabe zu überprüfen. Im Anschluss wird die Messung in der vertikalen Richtung wiederholt, um die Aussage zu verifizieren, dass die Genauigkeit in jede Richtung gleich sein soll.

### 3.1.1 Messaufbau

Die Messungen wurden in einem reflexionsarmen Raum, welcher sich an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg am Berliner Tor 7 befindet, durchgeführt. Wie in der bereits durchgeführten Studie zur horizontalen Genauigkeit wurde das TetraMic auf einem Drehtisch entsprechend des Benutzerhandbuches mit dem Logo des Mikrofons nach vorne positioniert (Abb. 3.2 (a) auf S. 13) (Protheroe und Guillemain 2013:6-8). Für die Untersuchung der vertikalen Ebene wurde das Mikrofon seitlich um 90° gekippt und ebenfalls mit dem Logo in Richtung des Lautsprechers ausgerichtet (Abb. 3.2 (b) auf S. 13). Als Sendequelle wurde ein Dodekaeder Lautsprecher in 2,8 m Entfernung aufgestellt, welcher einen exponentiell ansteigenden Sinus-Sweep mit 30 Sekunden Länge von 20 bis 20.000 Hz abstrahlte.

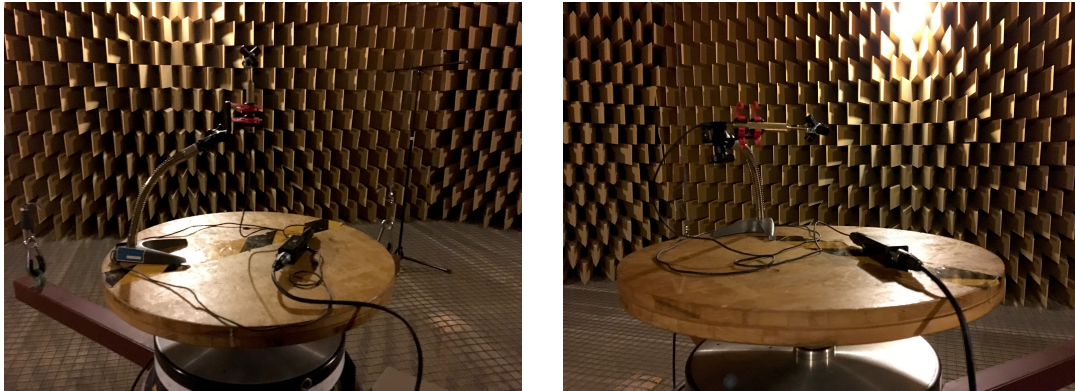


**Abbildung 3.1:** Skizzierter Messaufbau zur Untersuchung der örtlichen Genauigkeit

Die Messmittel und -objekte umfassten:

- Tetraeder-Mikrofon Core Sound TetraMic (S/No. 2371)
- Audio Interface MOTU 4pre (S/No. 4PRE1002682)
- Dodekaeder Werner Ocker Schallmesstechnik DO12 (S/No. 11-00)
- Verstärker SOLTON SPA 500 (S/No. 163341)
- Messsoftware Marshall Day Acoustics IRIS (Version 1.1.1)





(a) Horizontal

(b) Vertikal

**Abbildung 3.2:** Positionierung des TetraMic im reflexionsarmen Raum

### 3.1.2 Messdurchführung

Der Drehtisch wurde pro Messung manuell in  $5^\circ$  Schritten rotiert, von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$ , da keine automatische Ansteuerung vorhanden war. Für den Aufbau zur Überprüfung der horizontalen und der vertikalen Genauigkeit wurden somit jeweils 73 Messungen durchgeführt. Nach der Messung wurde für jeden Schritt der Wert des Azimut- bzw. des Steigungswinkels abgelesen, den IRIS für den Direktschall aus den ersten 2 ms des Impulsdigramms berechnet hat. Für die Ungenauigkeit beim Einstellen des Winkels wurde für den Endwert der ermittelten Genauigkeiten eine Toleranz von  $\pm 0,50^\circ$  hinzuaddiert. Zur Vergleichbarkeit wurde bei beiden Diagrammen ein Darstellungsbereich von 22 dB eingestellt.

### 3.1.3 Messergebnisse

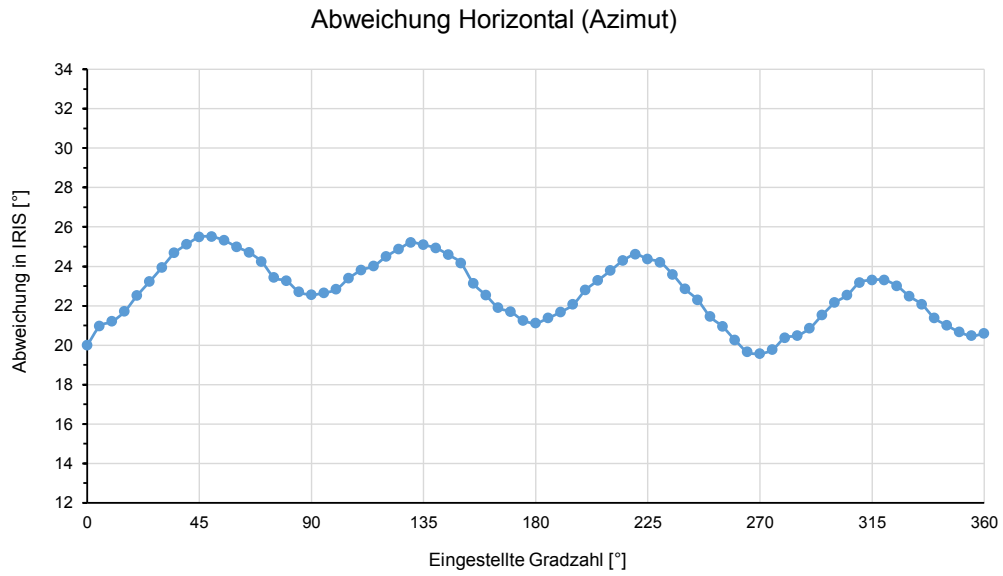


Abbildung 3.3: Gemessene Abweichung in horizontaler Ebene

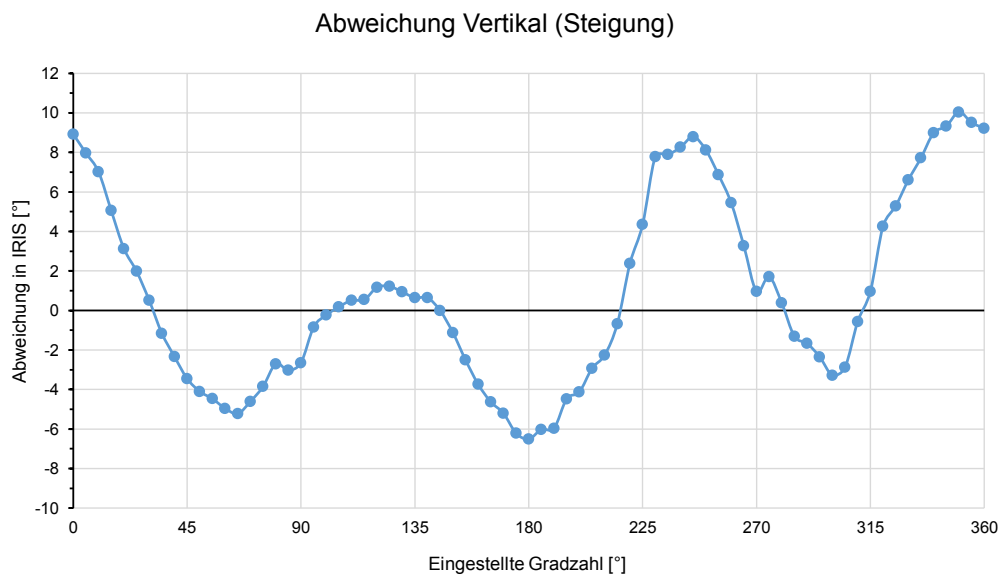


Abbildung 3.4: Gemessene Abweichung in vertikaler Ebene

|                       | Horizontale Ebene [°] | Vertikale Ebene [°] |
|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| Kleinster Wert:       | 19,571                | -6,509              |
| Höchster Wert:        | 25,507                | 10,047              |
| Differenz:            | 5,936                 | 16,556              |
| Messtoleranz:         | ±0,500                | ±0,500              |
| Effektive Abweichung: | ±3,468                | ±8,778              |

**Tabelle 3.1:** Messergebnisse der horizontalen und vertikalen Genauigkeit

## 3.2 Erfassung der zeitlichen Auflösung

Da IRIS die Richtung der Strahlen im dreidimensionalen Diagramm auf Basis der einstellbaren 1 bis 10ms langen Segmente berechnet, ist es essentiell, dass die mit dem TetraMic gemessene Impulsantwort der tatsächlichen Impulsantwort entspricht. Es ist denkbar, dass hier eine Abweichung durch die Verrechnung der vier unterschiedlichen Messwerte der vier Mikrofonkapseln entsteht.

Zur Feststellung der zeitlichen Auflösung der Software in Kombination mit dem TetraMic werden die von IRIS vorgegebenen und nicht veränderbaren farblichen Codierungen als Einteilungen herangezogen. Laut einem YouTube Video von Navcon US soll ein Update der Software folgen, in welchem die Zeiteinteilung und Farbcodierung selbst festgelegt werden kann (NAVCON US 2015: 5m12s). Da diese Information allerdings vom 18. Februar 2015 stammt und es zum Zeitpunkt der Thesis noch nicht möglich war diese Einstellungen vorzunehmen, wurde der momentane Stand der Software und damit die vorgegebenen Optionen untersucht.

Im besten Fall sollte die Messung der zeitlichen Auflösung wie die Überprüfung der örtlichen Genauigkeit im reflexionsarmen Raum durchgeführt werden. In dem zur Verfügung stehenden reflexionsarmen Raum war die Messung allerdings nicht möglich, da der Drahtboden durch seine Beschaffenheit immer an der Stelle nachgegeben hat, an der sich eine Person aufhielt. Wollte man nun die Entfernung von Mikrofon zu Reflexionsfläche messen (siehe Versuchsdurchführung auf S. 18), hat das Nachgeben des Drahtbodens beim Verlassen des Raumes das Messergebnis der Entfernung so stark verfälscht, dass ein zentimetergenaues Einstellen nicht möglich war.

Aus diesem Grund sollte die Messung zunächst im Freien auf einem Feld durchgeführt werden, da hier ebenfalls eine reflexionsarme Umgebung vorhanden ist. Doch trotz nur sehr leichtem Wind – Grashalme haben sich minimal bewegt; 4 bis 9 km/h laut Wetterdiensten – trat bereits ein so starkes Störgeräusch auf, dass es zu einem Übersteuern des Interfaces bei Einstellung laut Benutzerhandbuch kam. Ein Herunterregeln der Eingangsverstärkung am Interface und ein improvisierter Windschutz führten zwar dazu, dass keine Übersteuerung mehr auftrat, dennoch kam es bei IRIS zu der Fehlermeldung, dass zu viele Störgeräusche vorhanden seien.

Als alternative Methode zur Ermittlung der zeitlichen Auflösung wurde nun ein möglichst großer Raum gewählt, in welchem die Entfernung der nächstliegenden Reflexionsflächen mindestens halb so groß sein mussten wie der zu untersuchende Abstand. Für die in IRIS vorhandenen Zeiteinteilungen ergeben sich mit einer Schallgeschwindigkeit von  $v_{\text{Schall}, 20^\circ\text{C}} = 343,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  (Giancoli 2010: 561) damit folgende Laufzeitdifferenzen:

| Zeiteinteilung | Laufzeitdifferenz |
|----------------|-------------------|
| 2 ms           | 0,686 m           |
| 15 ms          | 5,145 m           |
| 20 ms          | 6,860 m           |
| 50 ms          | 17,15 m           |
| 80 ms          | 27,44 m           |
| 200 ms         | 68,6 m            |

**Tabelle 3.2:** Zeiteinteilungen in der IRIS Software für die farbliche Codierung

Die Wahl fiel auf das Forum im Neubau des Departements Design Medien Informationen der HAW Hamburg am Standort Finkenau. Mit einer Länge von 15,97 m, einer Breite von 15,39 m und einer lichten Raumhöhe von 6,06 m im Mittelpunkt dieses Raumes befindet sich die erste Reflexion in 6,06 m Entfernung an der Decke. Da der Schall bis zum Eintreffen am Mikrofon diesen Weg allerdings zwei Mal zurücklegen muss, ergibt sich eine Laufzeitdifferenz von 12,12 m. Somit wird die erste Reflexion vom Mittelpunkt des Raumes nach 28,3 ms eintreffen. Dieser zeitliche Abstand ist ausreichend um die zeitliche Auflösung der ersten drei Unterteilungen 2, 15 und 20 ms in diesem Raum untersuchen zu können.

Zum Vergleich wurde ein Messmikrofon mit Kugelcharakteristik von der Firma NTi Audio in Kombination mit der Messsoftware EASERA von AFMG, sowie eine manuelle Analyse mittels Impulssignal hinzugezogen.

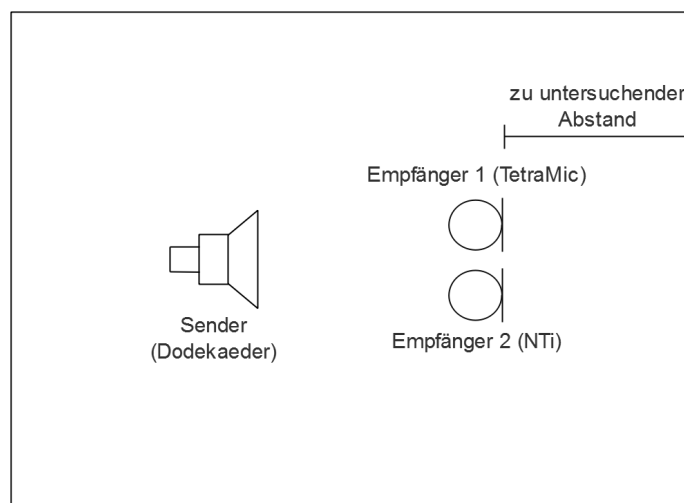
### 3.2.1 Messaufbau

Für die Messung wurden der Dodekaeder und die Messmikrofone in Bodennähe positioniert. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich die Mikrofonkapseln auf Höhe des Mittelpunktes des Dodekaeders befinden. Für die zu untersuchenden Zeiteinteilungen muss eine Reflexion stattfinden – hierfür wurde eine vorhandene glatte Wand des Raumes als Reflexionsfläche für die Messung genutzt. Die zu untersuchenden Abstän-

### 3 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit des IRIS Messsystems

de entsprechen dabei der Hälfte der ermittelten Laufzeitdifferenzen.

Als Messsignal wurde in IRIS ein exponentiell ansteigender Sinus-Sweep von 20 bis 20.000 Hz mit 30 Sekunden Länge genutzt. In EASERA wurde hingegen eine MLS-Folge von weißem Rauschen mit einer Anregung und zwei Mittelungen á 3 Sekunden Länge durchgeführt. Das unterschiedliche Messsignal wurde gewählt, um zu überprüfen, ob sich durch den Sinus-Sweep als Messsignal gegebenenfalls eine Abweichung ergibt. Stichprobenweise wurde in EASERA ebenfalls ein Sinus-Sweep von 20 bis 20.000 Hz mit 3 und 23,8 Sekunden Länge zur Vergleichbarkeit verwendet. Als weitere Referenz wurde ein Impulssignal genutzt, welches in einer DAW<sup>1</sup> selbst synthetisiert wurde.



**Abbildung 3.5:** Skizzierter Messaufbau zur Untersuchung der zeitlichen Auflösung

---

<sup>1</sup>engl.: Digital Audio Workstation



(a) Messaufbau



(b) NTi und TetraMic Mikrofon

**Abbildung 3.6:** Fotos des Messaufbaus zur Ermittlung der zeitlichen Auflösung

Die Messmittel und -objekte umfassten:

- Tetraeder-Mikrofon Core Sound TetraMic (S/No. 2371)
- Messmikrofon NTi Audio M4260 (S/No. 5380)
- Audio Interface MOTU 4pre (S/No. 4PRE1002682)
- Audio Interface RME Fireface UC (S/No. 23067895)
- Dodekaeder Werner Ocker Schallmesstechnik DO12 (S/No. 11-00)
- Verstärker SOLTON SPA 500 (S/No. 163341)
- Messsoftware Marshall Day Acoustics IRIS (Version 1.1.1)
- Messsoftware AFMG EASERA (Version 1.1.3)
- Audiosoftware Audacity (Version 2.0.6)
- Laserentfernungsmesser Stabila LE 20 (P/N 16554)

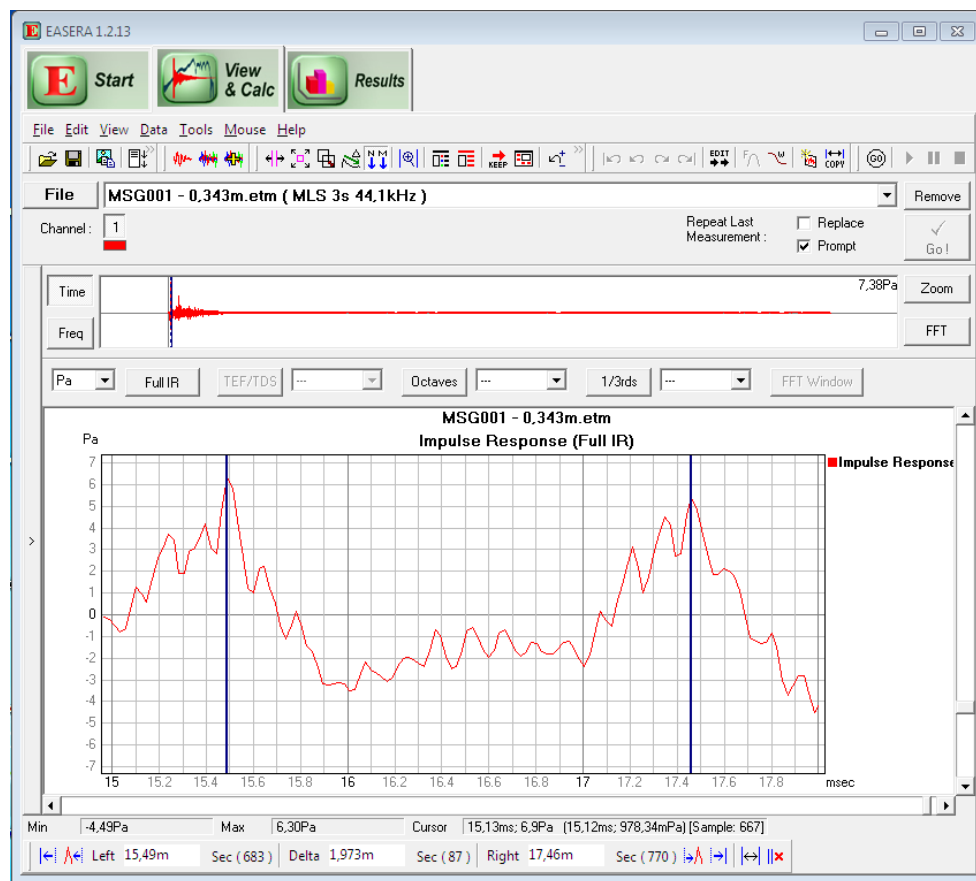
### 3.2.2 Messdurchführung

Wie auf S. 16 bereits analysiert, konnten nur die ersten drei Zeiteinteilungen 2, 15 und 20 ms in dem zur Verfügung stehenden Raum untersucht werden. Die errechneten Laufzeitdifferenzen (Tab. 3.2 auf S. 16) wurden halbiert, um den Abstand zu erhalten, den die Messmikrofone zur Reflexionsfläche für die jeweilige Zeiteinteilung aufweisen mussten. Zur Untersuchung der zeitlichen Auflösung wurden die jeweiligen Abstände in 10 mm Schritten variiert und mit dem Laserentfernungsmesser von der Mitte der Messmikrofone zur Reflexionsfläche eingestellt. Dabei wurden 7 Messschritte vor und 5 Messschritte nach der Zeiteinteilung untersucht. Im Fall der ersten

### 3 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit des IRIS Messsystems

Zeiteinteilung von 2 ms wurden nur 5 Messschritte davor durchgeführt, da der verwendete Laserentfernungsmesser kleinere Abstände nicht erfassen kann und für die Vergleichbarkeit ausschließlich der Laserentfernungsmesser genutzt wurde. Für jeden Messschritt wurde je eine Messung mit IRIS und mit EASERA durchgeführt und der Zeitabstand vom Direktschall zur ersten Reflexion abgelesen. In IRIS wurden dafür die Messergebnisse als Text-Datei exportiert, um den Wert der Reflexion genau ablesen zu können. Für EASERA wurde die Zeit der Reflexion bestimmt, indem im Impulssignal der gleiche Punkt im Direktschall und in der Reflexion markiert wurde, um den Delta-Wert in der unteren Leiste zu erhalten (siehe Abb. 3.7 auf S. 19).

In IRIS wurde anschließend überprüft, ob der Startpunkt der ersten Reflexion noch im vorherigen oder schon im zu untersuchenden Zeitfenster liegt. Als Referenz wurde zusätzlich ein Impulssignal für die exakten Messpunkte bei 2, 15 und 20 ms verwendet, welches mit dem NTi Messmikrofon und der Software Audacity aufgenommen und mit Hilfe von EASERA auf gleiche Weise analysiert wurde.



**Abbildung 3.7:** Screenshot zur Ermittlung der gemessenen Reflexion in EASERA, Beispiel 2 ms

Die Laufzeitdifferenz des Bodens konnte bei dieser Messung vernachlässigt werden, da die dort stattfindende Reflexion kurz nach der zu untersuchenden Reflexion eintrifft. Als Messtoleranz musste die vom Hersteller angegebene Toleranz von  $\pm 5$  mm (entspricht  $\pm 0,15$  ms) des Laserentfernungsmessers berücksichtigt werden.

### 3.2.3 Messergebnisse

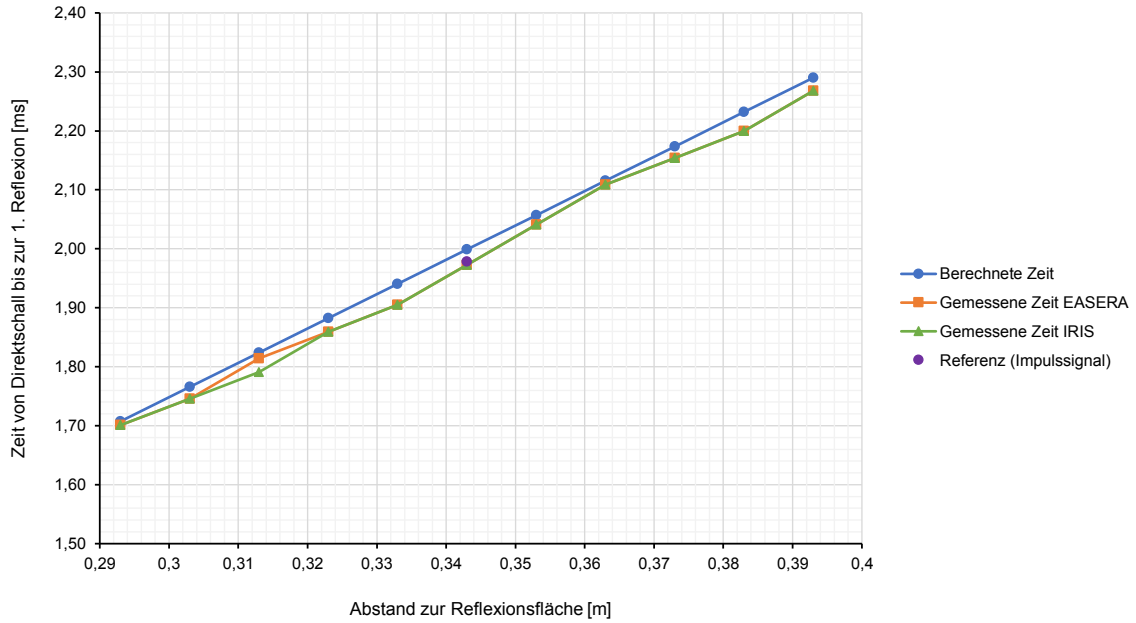
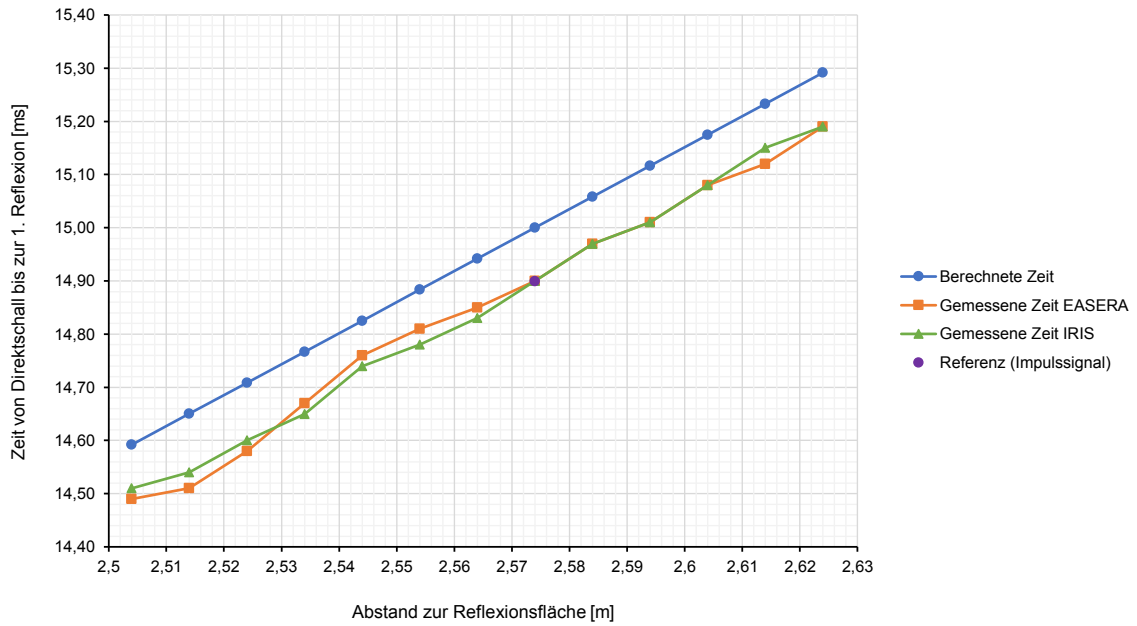


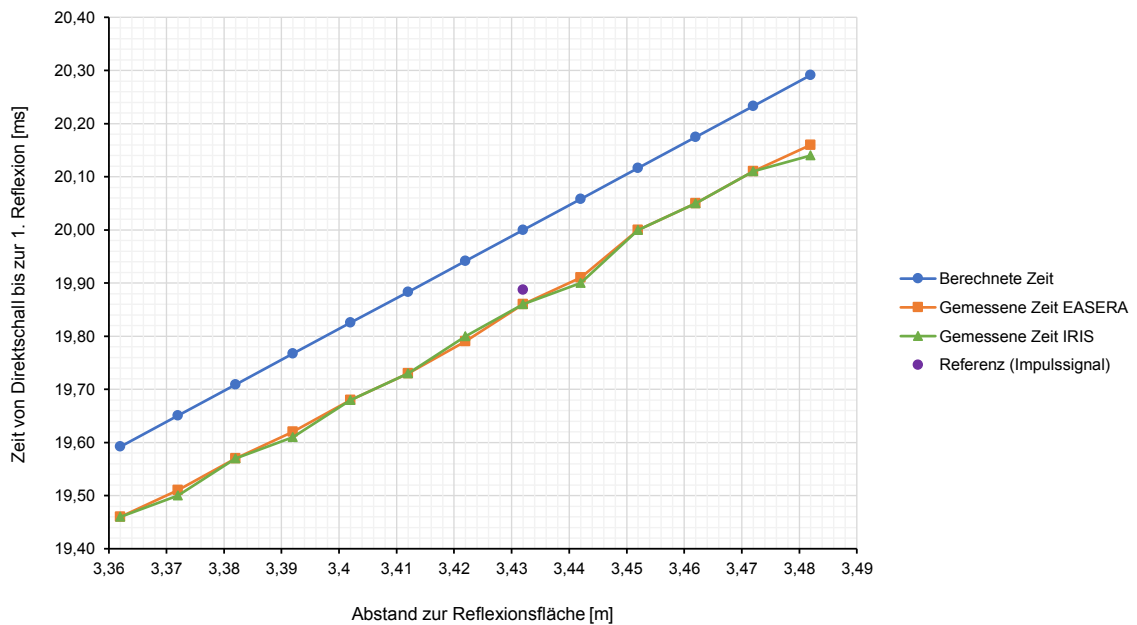
Abbildung 3.8: Vergleich von berechneter zu gemessener Zeit der Reflexion bei 2 ms



### 3 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit des IRIS Messsystems



**Abbildung 3.9:** Vergleich von berechneter zu gemessener Zeit der Reflexion bei 15 ms



**Abbildung 3.10:** Vergleich von berechneter zu gemessener Zeit der Reflexion bei 20 ms

|                                | EASERA   | IRIS     |
|--------------------------------|----------|----------|
| Kleinste Abweichung (2 ms):    | -0,01 ms | -0,01 ms |
| Höchste Abweichung (2 ms):     | -0,04 ms | -0,04 ms |
| Durchschn. Abweichung (2 ms):  | -0,02 ms | -0,02 ms |
| Kleinste Abweichung (15 ms):   | -0,07 ms | -0,08 ms |
| Höchste Abweichung (15 ms):    | -0,14 ms | -0,12 ms |
| Durchschn. Abweichung (15 ms): | -0,10 ms | -0,10 ms |
| Kleinste Abweichung (20 ms):   | -0,12 ms | -0,12 ms |
| Höchste Abweichung (20 ms):    | -0,15 ms | -0,16 ms |
| Durchschn. Abweichung (20 ms): | -0,14 ms | -0,14 ms |

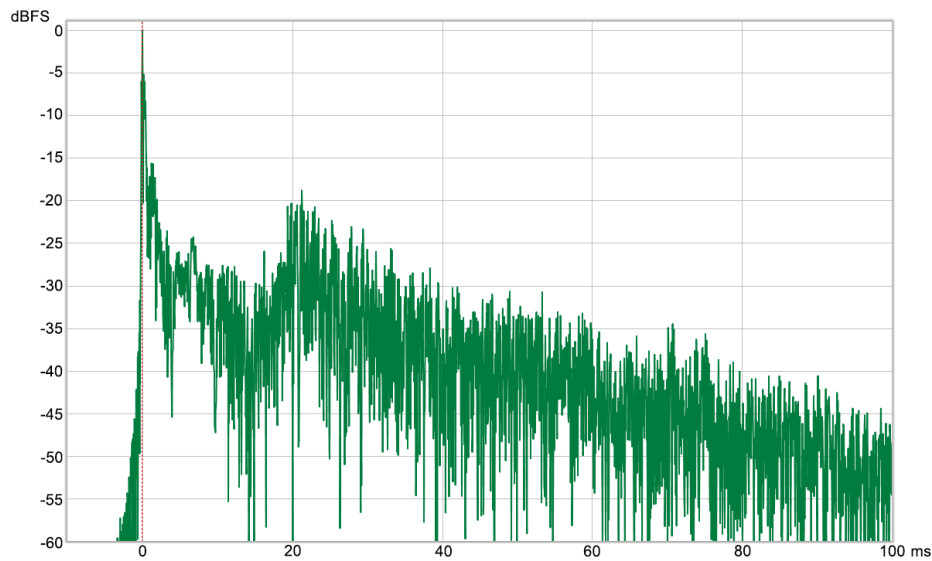
**Tabelle 3.3:** Messergebnisse der Erfassung der zeitlichen Auflösung

### 3.3 Praxistest

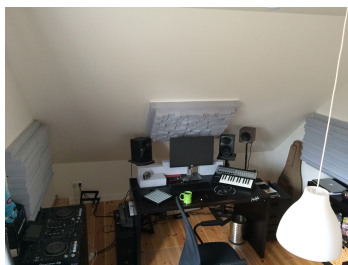
Für den Praxistest wurde ein bereits weitestgehend akustisch optimiertes Heimstudio gewählt. Da bei den bisher durchgeführten eindimensionalen Messungen trotz Absorption der Erstreflexionen noch Reflexionen nach 20 ms vorhanden waren, gilt es mittels IRIS die noch vorhandenen Reflexionen zu lokalisieren. Sinn dieser Messung ist es zu überprüfen, ob IRIS in der Lage ist raumakustische Probleme eindeutig zu identifizieren, um sie direkt beheben zu können.

Als bisherige raumakustische Maßnahmen wurden drei etwa 15 cm dicke Absorber mit einer Größe von 100 x 70 cm bei der Abhörposition und ein 160 x 100 x 14 cm Absorber an der Rückwand installiert, um die Erstreflexionen zu absorbieren. Da es sich um einen privaten Raum mit begrenzten finanziellen Mitteln handelt, wurden die bisherigen Messungen mit der Freeware Room EQ Wizard in der Version 5.1 durchgeführt. Die bereits durchgeführten Messungen haben ergeben, dass zwar eine recht ausgeglichene Nachhallzeit vorhanden ist, allerdings noch vereinzelte Reflexionen nach 20 bis 25 ms mit etwa 20 dB Schallpegeldifferenz zum Direktsignal vorzufinden sind. Für Tonstudios gilt, dass die Raumantwort mehr als 20 dB unter dem Direktsignal liegen sollte (Friesecke 2015: 100). Die dafür verantwortlichen Reflexionen gilt es im Folgenden zu lokalisieren und zu bedämpfen, um die Raumantwort auf eine Schallpegeldifferenz von 25 dB zum Direktsignal zu verringern.

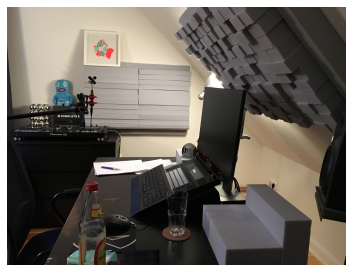
### 3 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit des IRIS Messsystems



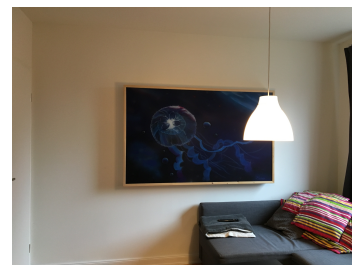
**Abbildung 3.11:** Impulsdiagramm der bestehenden raumakustischen Situation, 20 dB Schallpegeldifferenz vom Direktschall zur Raumantwort (Darstellung in Room EQ Wizard)



(a) Übersicht



(b) Seitenaufnahme



(c) Rückwand

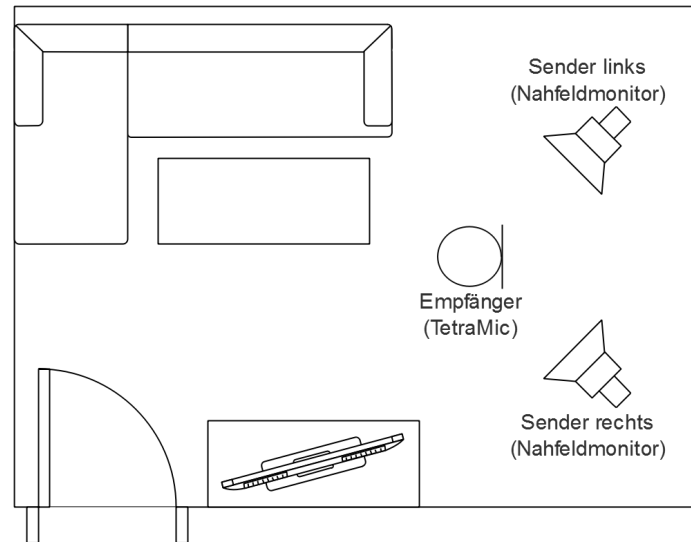
**Abbildung 3.12:** Bestehende raumakustische Maßnahmen im Heimstudio

#### 3.3.1 Messaufbau

Da es sich bei dem Praxistest um die Optimierung einer Heimstudio-Situation handelt, wurde hier kein Dodekaeder-Lautsprecher verwendet, sondern die vorhandenen Studio-Monitore genutzt. Das TetraMic wurde an der Abhörposition in 1,20 m Höhe – entsprechend der Höhe der Ohren im Sitzen – positioniert, so dass sich ein gleichschenkeliges Stereo-Dreieck mit den Studio-Monitoren ergab. Da mit der Kalibrierungsdatei des MOTU Interfaces nur ein Mono Signal ausgegeben werden kann, wurde das Signal über ein Audio Interface von Focusrite mittels der „Direct Out“-Funktion auf beide Studio Monitore dupliziert. Bei der „Direct Out“-Funktion wird

### 3 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit des IRIS Messsystems

das eingehende Signal latenzfrei auf die Ausgänge des Audio Interfaces weitergeleitet, ohne dass das Signal in irgendeiner Weise verarbeitet wird. Als Messsignal wurde ein exponentiell ansteigender Sinus-Sweep von 20 bis 20.000 Hz mit 30 Sekunden Länge verwendet.



**Abbildung 3.13:** Skizzierter Messaufbau zum Praxistest

Die Messmittel und -objekte umfassten:

- Tetraeder-Mikrofon Core Sound TetraMic (S/No. 2371)
- Audio Interface MOTU 4pre (S/No. 4PRE1002682)
- Audio Interface Focusrite Scarlett 2i4 (S/No. S464293108744)
- Nahfeldmonitore 2x Neumann KH 120 A (S/No. 3085184219, 3125244881)
- Messsoftware Marshall Day Acoustics IRIS (Version 1.1.1)

#### 3.3.2 Messdurchführung

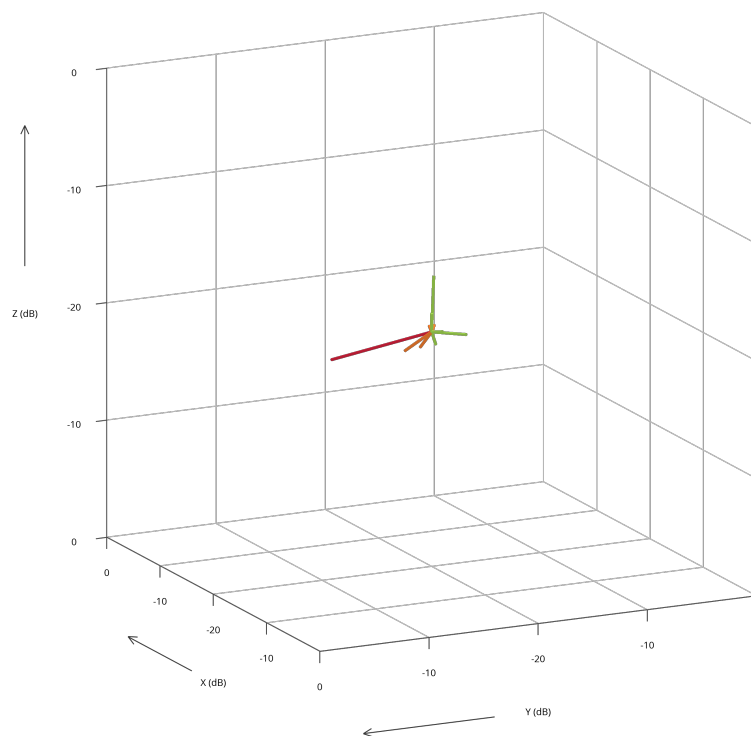
Um Informationen über die Herkunft der Reflexionen zu bekommen, musste zunächst der Ist-Zustand gemessen werden. Vermutet wurde die Rückwand als Ursache für die vorhandenen Reflexionen nach etwa 20 ms (siehe Abb. 3.11 auf S. 23). Der Abstand von Lautsprecher und Rückwand beträgt 3,75 m – dies entspricht einer Laufzeitdifferenz von etwa 22 ms. Nach der Messung des Ist-Zustandes wurden Absorber aus

### 3 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit des IRIS Messsystems

Melaminharzschaum mit einer Dicke von 5 cm an den vermuteten Reflexionspunkten angebracht und eine erneute Messung durchgeführt, um zu verifizieren, ob Absorber an diesen Stellen auch wirklich die unerwünschten Reflexionen bedämpfen. Dieser Ablauf wurde so oft wiederholt, bis alle Peaks der Raumantwort im Impulsdigramm 25 dB unter dem Direktschall lagen. Die zentimetergenaue Bestimmung der Positionierung erfolgte im Anschluss mit einem Raytracing<sup>2</sup>-Programm.

In IRIS wurden der „Studio“-Modus, eine Auflösung von 2 ms und ein Darstellungsbereich der Strahlen von 20 dB gewählt.

#### 3.3.3 Messergebnisse



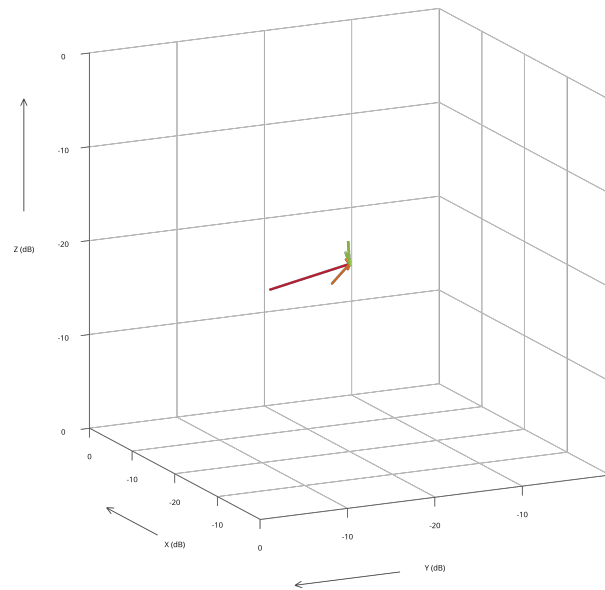
**Abbildung 3.14:** Vorher - IRIS Plot der bestehenden Situation

Nach der Anbringung von Absorptionsmaterial an den vermuteten Stellen an der Rückwand zeichnete sich folgendes Bild ab (Abb. 3.15 auf auf S. 26):

---

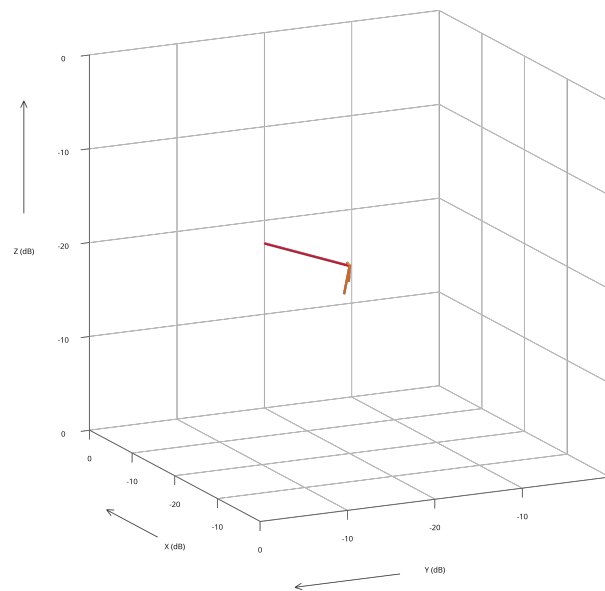
<sup>2</sup>dt.: Strahlenverfolgung

### 3 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit des IRIS Messsystems



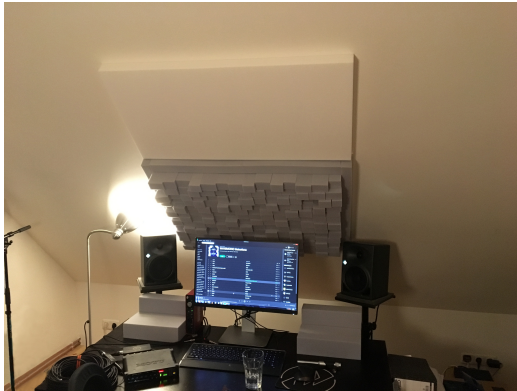
**Abbildung 3.15:** Zwischenschritt - IRIS Plot mit Absorbern an der Rückwand

Bei Anbringung von Absorptionsmaterial an den vermuteten Stellen an der Rückwand wurde deutlich, dass noch eine Reflexion über der Abhörposition vorhanden ist. Eine zusätzliche Anbringung eines Absorbers über der Abhörposition (siehe Abb. 3.17) brachte folgendes Ergebnis:



**Abbildung 3.16:** Nachher - IRIS Plot mit Absorbern an Rückwand und über Abhörposition

### 3 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit des IRIS Messsystems

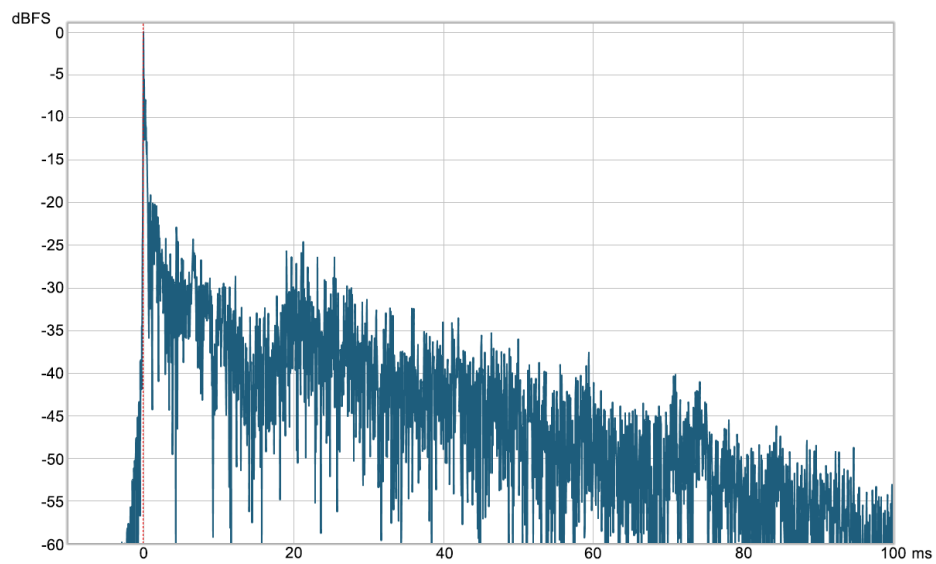


(a) Abhörposition



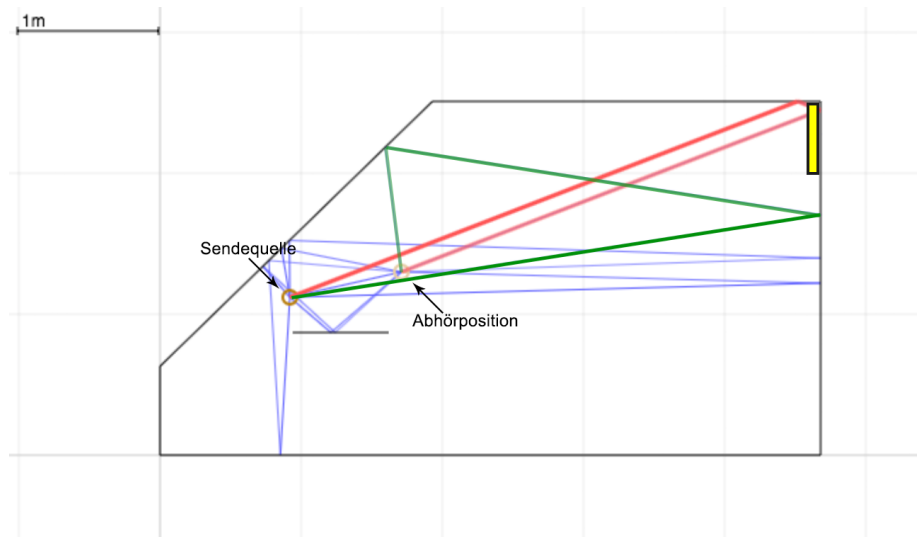
(b) Rückwand

**Abbildung 3.17:** Resultat der zusätzlichen Absorptionsflächen im Heimstudio

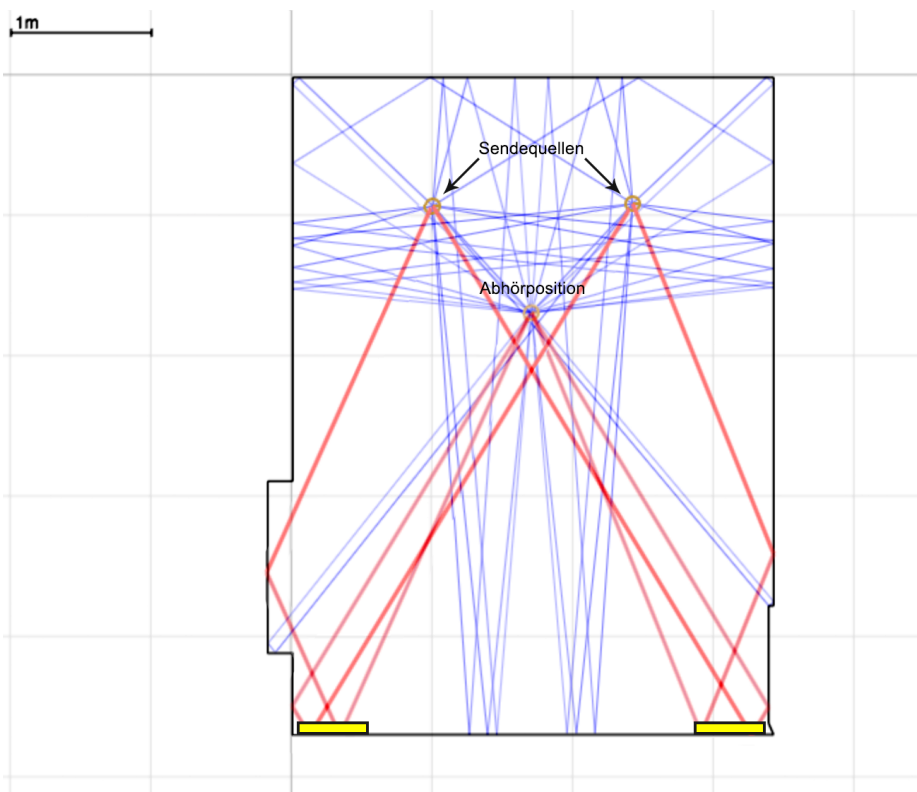


**Abbildung 3.18:** Impulsdigramm der raumakustischen Situation nach der Optimierung, 25 dB Schallpegeldifferenz vom Direktschall zur Raumantwort (Darstellung in Room EQ Wizard) (vgl. Abb. 3.11 auf S. 23)

3 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit des IRIS Messsystems



(a) Seitenansicht



(b) Draufsicht

**Abbildung 3.19:** Genaue Positionierung an der Rückwand (gelbe Kästen) mittels Ray-tracing Modell (amray - sketch to trace: <http://amray.andymel.eu>)



## 3.4 Auswertung

Das Ziel bei der Ermittlung der örtlichen Genauigkeit war, die vom Hersteller angegebene Ungenauigkeit von  $\pm 7,5^\circ$  zu überprüfen und die Aussage zu validieren, dass diese Ungenauigkeit in jede Richtung gelten soll. Unter Berücksichtigung einer Mess-toleranz von  $\pm 0,5^\circ$  ergibt sich in der horizontalen Ebene eine Abweichung von  $\pm 3,47^\circ$  und in der vertikalen Ebene eine Abweichung von  $\pm 8,78^\circ$ . Somit fällt die Abweichung in der Vertikalen zwar höher als vom Hersteller angegeben aus, die Abweichung in der Horizontalen ist hingegen deutlich geringer. Die Aussage, dass die Abweichung in jede Richtung gilt, kann nicht bestätigt werden. Besonders bei großen Räumen kann eine Abweichung von  $\pm 8,78^\circ$  den Messingenieur in die Irre führen, wenn die Ungenauigkeit nicht berücksichtigt wird. Möglicherweise werden dann bestimmte Flächen als raumakustisches Problem ausgemacht, die gar keine sind.

Auffällig ist weiterhin, dass es ein sogenanntes „Null-Offset“ gibt, was bedeutet, dass das Mikrofon einen Azimut-Winkel von etwa  $20^\circ$  und einen Steigungswinkel von etwa  $9^\circ$  misst, wenn es mit dem Logo in Richtung der Schallquelle positioniert wird. Ein Teil dieses Offsets ist eventuell auf eine nicht exakte Ausrichtung des TetraMic zurückzuführen, allerdings ist der gemessene Wert signifikant höher, als dass er durch die Ausrichtung allein begründet werden könnte. Wenn der Direktschall allerdings in der X-Achse angepasst wird („Align direct sound xy to x-axis“-Funktion in IRIS), ist das Offset im Azimut-Winkel vernachlässigbar. Für den Steigungswinkel sollte aber die Differenz von Direktschall und Reflexion überprüft werden, da hier keine Anpassung vorgenommen werden kann. Es wäre wünschenswert, dass auch hier der Direktschall als Null-Wert angepasst werden könnte.

Bei dem E-Mail Kontakt mit Daniel Protheroe von Marshall Day Acoustics gab dieser als mögliche Gründe für die abweichende Ungenauigkeit an, dass entweder Core Sound die Kalibrierung des TetraMic über die Jahre verbessert hat oder dass das in dieser Arbeit genutzte Messequipment genauer ist als das, welches er selbst im Jahr 2013 verwendete. Allgemeine Gründe für die Ungenauigkeiten können sogenannte „non-coincidence“-Effekte<sup>3</sup> sein, sowie Beugungen und Reflexionen am Mikrofon direkt. Nach der Aussage von Daniel Protheroe geht IRIS davon aus, dass sich alle vier Kapseln an ein und dem selben Ort befinden. Dieser Ausgangspunkt kann für hohe Frequenzen, bei denen die Wellenlänge kleiner ist als der Abstand der einzelnen Mikrofonkapseln zueinander, allerdings nicht stimmen und damit zu Problemen in Form von Phasenauslösungen führen. Erst bei Frequenzen mit größerer Wellenlänge liegen die eintreffenden Signale wieder in Phase. Wie auf S. 9 bereits erwähnt, nutzt IRIS einen Lowpass-Filter bei 5 kHz, um die größten Fehler zu beheben ohne dabei das Spektrum zu sehr zu beschränken. Eine nähere Betrachtung des TetraMic findet in der Untersuchung der Einzelkomponenten in Kapitel 4 statt.

---

<sup>3</sup>dt.: Effekte von Ungleichzeitigkeit

### 3 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit des IRIS Messsystems

Die zeitliche Auflösung, also die Genauigkeit in welcher IRIS Reflexionen in Zeitfenster einteilt, ist optimal und steht einem anderen etablierten Messsystem für raumakustische Eigenschaften in nichts nach. Auch die Überprüfung mit einem Impuls-signal als weitere Referenz weist keine nennenswerten Abweichungen auf. Die Mess-ergebnisse zeigen zwar eine vorhandene Abweichung zum erwarteten Wert, welche allerdings auf die Messtoleranz des Laser-Entfernungsmessers zurückzuführen ist, da EASERA und die Referenz exakt die gleiche Abweichung aufweisen. Die Messtoleranz beträgt  $\pm 5$  mm bzw.  $\pm 0,15$  ms und ist fast deckungsgleich mit der größten gemessenen Abweichung bei 20 ms. Weiterhin werden eintreffende Reflexionen richtig in die Zeitfenster eingeteilt. Die Richtung stimmt auch, wenn der Beginn der Reflexion noch im vorherigen Zeitfenster liegt, weshalb es in der Praxis nicht zu Ungenauigkeiten aufgrund der zeitlichen Auflösung kommen sollte.

In dem Praxistest erweist sich IRIS als gute Hilfe um Reflexionen zu lokalisieren. Im als Beispiel gewählten Heimstudio wurde aufgrund der Zeit der Reflexion erst davon ausgegangen, dass ausschließlich die Rückwand die Ursache für die Reflexionen ist. Als dort die Absorber an den vermuteten Stellen angebracht wurden, fiel sofort auf, dass direkt über der Abhörposition noch eine Reflexion vorhanden ist. Erst als auch dort Absorptionsmaterial installiert wurde, waren keine grünen Strahlen (15-50 ms) im Bereich bis -20 dB mehr vorhanden und somit die Anforderung für eine optimale Studio-Situation erfüllt. In Anbetracht der bereits vorher gemessenen örtlichen Genauigkeit kann sich allerdings nicht exakt auf die von IRIS errechneten Richtungen verlassen werden. Die zentimetergenaue Position der Absorber wurde deshalb mittels Raytracing Modellen bestimmt.

# 4 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit der Einzelkomponenten

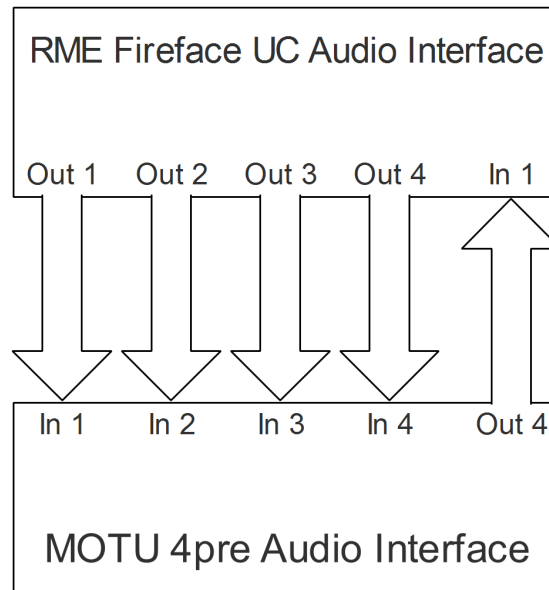
Als weitere Untersuchung zur Ermittlung der Genauigkeit werden im Folgenden die Einzelkomponenten betrachtet. Begonnen wird mit der Simulation von Eingangssignalen des Mikrofons, um die internen Berechnungen von IRIS zu überprüfen. Zuletzt werden die Empfangscharakteristiken der einzelnen Kapseln gemessen, um genauere Einblicke in die Genauigkeit des Mikrofons zu gewinnen.

## 4.1 Untersuchung der Signalverarbeitung

Im E-Mail Kontakt mit Daniel Protheroe gab dieser an, dass die Richtung des Schalls von IRIS auf der Grundlage der Pegeldifferenzen von den einzelnen Kapseln zueinander berechnet wird. Um die Genauigkeit der Signalverarbeitung zu untersuchen, wird dem Messsignal daher in einer DAW ein Delay mit für jeden Kanal unterschiedlicher Pegelanpassung hinzugefügt.

### 4.1.1 Messaufbau

Für die Untersuchung der internen Signalverarbeitung wurde das Messsignal aus dem mitgelieferten MOTU 4pre Audio Interface in ein weiteres Audio Interface gespeist. Genutzt wurde für diesen Zweck ein RME Fireface UC. Der Output 4 des MOTU Interfaces wurde mit dem Input 1 des RME Interfaces verbunden. In einer DAW wurde das eingehende Messsignal auf vier Spuren dupliziert und die simulierte Richtung einer Reflexion mittels Delay-Effekt (20 ms) und unterschiedlichen Lautstärkeunterschieden simuliert. Das Delay wurde nur hinzugemischt und nicht mittels Dry/Wet-Regelung gesteuert, um die Herkunft des Direktschalls unberührt zu lassen. Die simulierten Messsignale wurden über die Ausgänge 1-4 des RME Interfaces mit den Eingängen 1-4 des MOTU Interfaces verbunden. Das TetraMic und ein Lautsprecher wurden für diese Messung dementsprechend nicht benötigt. Als Messsignal wurde ein exponentiell ansteigender Sinus-Sweep von 20 bis 20.000 Hz mit 10 Sekunden Länge genutzt.



**Abbildung 4.1:** Skizzierter Messaufbau zur Untersuchung der Signalverarbeitung

Die Messmittel und -objekte umfassten:

- Messsoftware Marshall Day Acoustics IRIS (Version 1.1.1)
- Audio Interface MOTU 4pre Audio Interface (S/No. 4PRE1002682)
- Audio Interface RME Fireface UC (S/No. 23570753)
- Digital Audio Workstation Ableton Live (Version 9.7)

Da in IRIS keine Messung ohne Kalibrierungsdateien möglich ist, wurde die Text-Datei des TetraMic modifiziert und alle Equalizer- und Empfindlichkeits-Einstellungen in der Kalibrierung mittels Text Editor auf Null gesetzt, so dass keine Kalibrierung des TetraMic stattfand. Bei der Kalibrierung wird zusätzlich auf IIR-Filter zugegriffen – diese hätten im optimalen Fall auch auf Null gesetzt werden müssen. Da es allerdings nicht ohne weiteres möglich war, diese Dateien zu öffnen (getestet wurden MathWorks MATLAB und GNU Octave), konnten diese nicht für die Simulation deaktiviert werden. Aus Geheimhaltungsgründen seitens Core Sound konnten durch Daniel Protheroe keine weiteren Angaben zu Verwendung und Auswirkung der IIR-Filter eingeholt werden.

### 4.1.2 Messdurchführung

Zur Simulation der Messsignale für die einzelnen Kanäle war es notwendig, die Lautstärke des Delays für jeden Kanal einzeln zu berechnen. Zur Berechnung der einzelnen

#### 4 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit der Einzelkomponenten

Kanäle wurde folgende Formel für diese Arbeit aufgestellt (Gleichungen 4.1, 4.2, 4.3, 4.4):

$$L_1(\alpha) = -12 + 3\sin(\alpha + 135^\circ) \text{ [dB]} \quad (4.1)$$

$$L_2(\alpha) = -12 + 3\sin(\alpha + 45^\circ) \text{ [dB]} \quad (4.2)$$

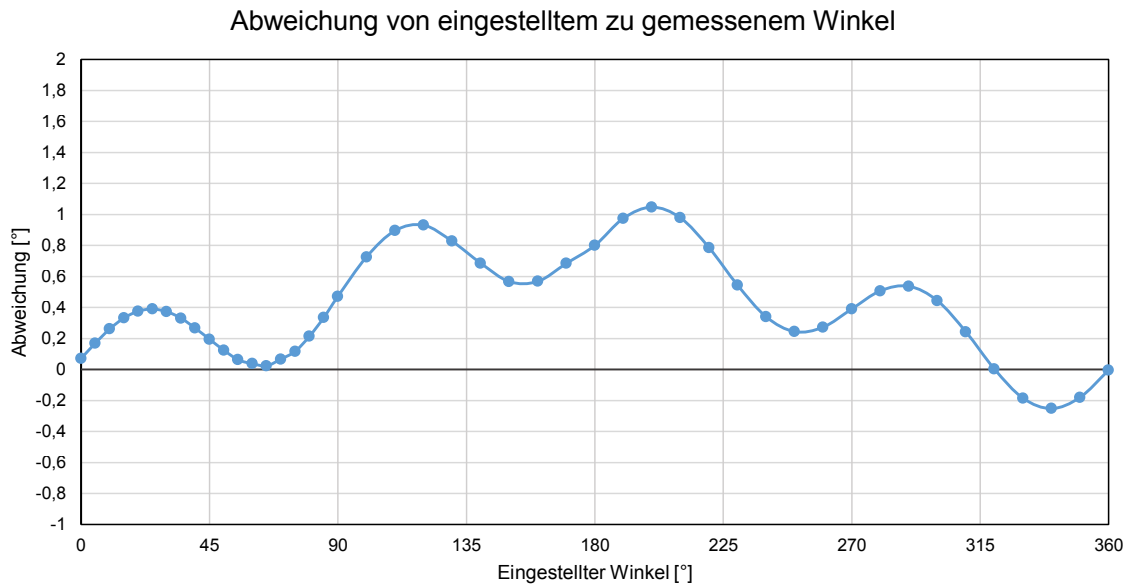
$$L_3(\alpha) = -12 + 3\sin(\alpha - 135^\circ) \text{ [dB]} \quad (4.3)$$

$$L_4(\alpha) = -12 + 3\sin(\alpha - 45^\circ) \text{ [dB]} \quad (4.4)$$

Diese Formel entstand durch logische Schlussfolgerung: Wenn die Reflexion von vorne kommen soll, müssen Kanal 1 und 2 den gleichen Schallpegel und zudem einen höheren Schallpegel als Kanal 3 und 4 aufweisen. Wird die Reflexion nun im Uhrzeigersinn gedreht, wird der Schallpegel von Kapsel 1 geringer, von Kapsel 2 höher, von Kapsel 3 höher und von Kapsel 4 geringer. Diese Veränderung kann durch die Kreisform mit einer Sinusfunktion beschrieben werden. Der unterschiedliche Versatz im Winkel ist auf die Anordnung der Kapseln zurückzuführen. Die Reflexion wurde mit -12 dB dimensioniert und eine Pegeländerung von den Kanälen zueinander von  $\pm 3$  dB veranschlagt.

Um möglichst genaue Messergebnisse zu erzielen, wurden die berechneten Werte für die Lautstärke der Reflexion mit vier Nachkommastellen eingegeben. Da IRIS nur eine Nachkommastelle in der normalen Auswertung anzeigt, wurden die Messwerte als Text-Datei exportiert, um somit deutlich mehr Nachkommastellen auslesen zu können. Anschließend wurde die Differenz von eingestelltem und gemessenem Wert bestimmt und als Kurvendiagramm dargestellt. Die Messung erfolgte bis  $90^\circ$  in  $5^\circ$ -Schritten. Da sich in der durchgeführten Messung ein kurvenförmiger Verlauf ohne starke Abweichungen abzeichnete, konnten die Messschritte mit  $10^\circ$ -Schritten etwas gröber fortgeführt und die Kurve nachträglich in Excel interpoliert werden.

### 4.1.3 Messergebnisse



**Abbildung 4.2:** Abweichung der Signalverarbeitung bei der Simulation von Reflexionen in der horizontalen Ebene

|                 | Messergebnis [°] |
|-----------------|------------------|
| Kleinster Wert: | -0,252           |
| Höchster Wert:  | 1,047            |
| Differenz:      | 1,299            |
| Abweichung:     | $\pm 0,650$      |

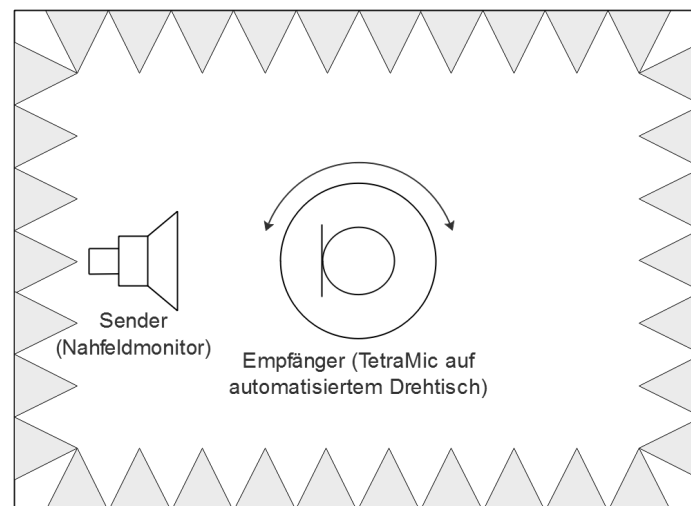
**Tabelle 4.1:** Abweichung der Signalverarbeitung

## 4.2 Empfangscharakteristik der Mikrofonkapseln

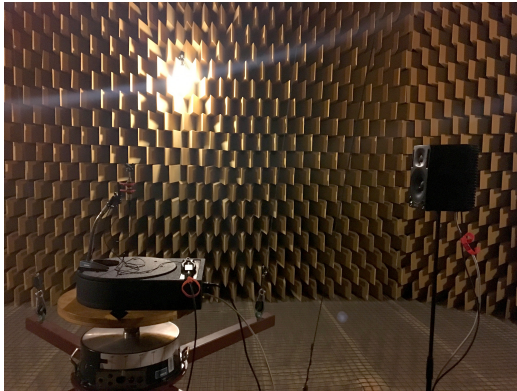
Neben der Signalverarbeitung der Software müssen auch die Empfangscharakteristiken der Mikrofonkapseln untersucht werden. Aus der Überlagerung der Empfangscharakteristiken der einzelnen Mikrofonkapseln resultiert dabei die gesamte Empfangscharakteristik des omnidirektionalen Mikrofons. Hierbei gilt es herauszufinden, ob durch die sehr nahe Anordnung der einzelnen Kapseln Reflexionen von Kapsel zu Kapsel auftreten und wie sich die einzelnen Empfangscharakteristiken miteinander verhalten. Diese Messung muss in einem reflexionsarmen Raum komplett frei von Störgeräuschen stattfinden, da ansonsten das Ergebnis verfälscht werden kann (Lerch et al. 2009: 501 f.).

### 4.2.1 Messaufbau

Für diese Messung wurde, wie bereits bei der Untersuchung der örtlichen Genauigkeit, der reflexionsarme Raum der HAW Hamburg am Berliner Tor 7 genutzt. Da der vorhandene Drehtisch nicht automatisch ansteuerbar ist, wurde für die Messung der Empfangscharakteristik ein neuer, digital ansteuerbarer Drehtisch auf diesen gestellt. Das zu untersuchende TetraMic wurde mit Hilfe eines flexiblen Tischstatives mittig auf dem Drehtisch positioniert und ein Lautsprecher in 1 m Abstand zum Mikrofon aufgestellt. Da das Logo des TetraMic die Vorderseite markiert, wurde das Logo zum Lautsprecher ausgerichtet. Zur Ansteuerung des Drehtisches wurde dieser via Ethernet-Kabel mit dem Laptop verbunden und das TetraMic an die vier Eingänge des MOTU Interfaces angeschlossen.



**Abbildung 4.3:** Skizzierter Messaufbau zur Messung der Empfangscharakteristiken



(a) Seitenansicht



(b) Ansicht vom Lautsprecher

**Abbildung 4.4:** Fotos des Messaufbaus zur Messung der Empfangscharakteristik

Die Messmittel und -objekte umfassten:

- Tetraeder-Mikrofon Core Sound TetraMic (S/No. 2371)
- Audio Interface MOTU 4pre (S/No. 4PRE1002682)
- Nahfeldmonitor Genelec 1029A (S/No. n.v.)
- Drehtisch Outline ET 250-3D (S/No. n.v.)
- Messsoftware AFMG EASERA (Version 1.1.3)
- Messsoftware AFMG EASE SpeakerLab (Version 1.1.20)

## 4.2.2 Messdurchführung

Für die Messung wurde das POLARS-Modul in EASERA genutzt, um eine automatisierte Messung mit einem Drehtisch durchzuführen. Die automatisierte Messung wurde in  $1^\circ$ -Schritten mit einer MLS-Folge von weißem Rauschen in 1,5 Sekunden Länge durchgeführt. Alle vier Mikrofonkapseln wurden parallel mit den vier Eingängen des Audio Interfaces aufgezeichnet.

Zur Erstellung der Empfangscharakteristik als Kreisdiagramm wurde EASE SpeakerLab von AFMG genutzt. Die Software kann allerdings nur Messwerte über  $180^\circ$  einlesen, wenn nur die horizontale Achse vorhanden ist. Deshalb musste zunächst die Spiegelachse für die zu untersuchenden Kapseln bestimmt werden. Aufgrund der Nierencharakteristik der Mikrofone ließ sich diese recht einfach ermitteln, da die Spiegelachse in diesem Fall dort liegt, wo der geringste Schalldruckpegel vorhanden ist.



Um Abweichungen durch hohe und tiefe Frequenzen zu umgehen, wurde zur Bestimmung der Spiegelachse der Oktav-Wert von 1 kHz hinzugezogen.

Aufgrund der Tatsache, dass EASERA bei der Messung alle 4 Kanäle in eine Datei speichert und SpeakerLab beim Import nur den ersten Kanal ausliest, wurden nur die vorderen beiden Kapseln für die Empfangscharakteristik der einzelnen Kapseln betrachtet. Das wesentliche Problem lag hierbei darin, dass in EASERA für jede Datei einzeln die Kanäle entfernt und die Datei neu gespeichert werden müssen. Somit konnten die Dateien für Kapsel 1 direkt importiert werden, während für Kapsel 2 zunächst der erste Kanal entfernt werden musste. Danach folgte eine Umbenennung der je 180 Dateien in das für SpeakerLab geforderte Format: beginnend bei „IR000000.etm“ hoch zählend. Durch die tetraedische Anordnung kann davon ausgegangen werden, dass die beiden hinteren Kapseln identisch zu den Vorderen sind.

Im Anschluss wurde ein Empfangsdiagramm erstellt, in welchem alle 4 Kapseln kombiniert wurden. Zunächst musste eine Kalibrierung der einzelnen Kanäle zueinander erfolgen, für die der maximale Schalldruckpegel im Kreis von jedem Kanal ermittelt wurde. Die schwächeren Kanäle wurden mit der Multiply-Funktion in EASERA um einen ermittelten Faktor zum lautesten Kanal angepasst. Diese Methode deckte sich mit einer Kalibrierung vor Ort, bei welcher der Kalibrator aufgrund der Größe nur auf die oberen Kapseln (Kapsel 1 und 4) gesteckt werden konnte. Der Faktor für die Multiply-Funktion wurde mit der Formel  $y = 10^{\frac{\Delta L}{10}}$  (Sengpiel o. J.) berechnet (siehe Tab. 4.2). Danach wurden alle Kanäle miteinander addiert. Diese Vorgehensweise ist sehr zeitintensiv, da pro Gradschritt jeder Kanal einzeln kalibriert und alle Kanäle miteinander addiert werden müssen – deshalb wurde in dieser Arbeit im Abschnitt von 0-180° in 2°-Schritten vorgegangen.

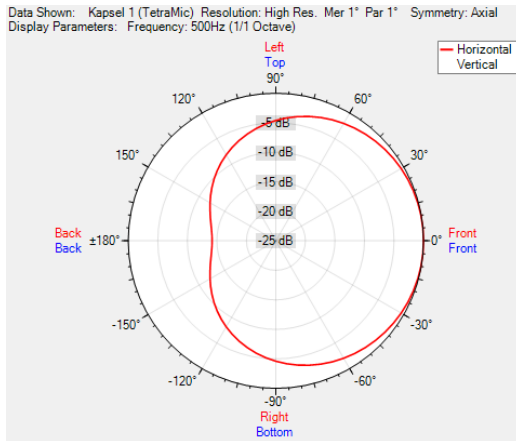
|           | Höchster Wert [dBFS] | Differenz [dBFS] | Faktor |
|-----------|----------------------|------------------|--------|
| Kapsel 1: | 116,6                | -                | -      |
| Kapsel 2: | 115,9                | 0,7              | 1,084  |
| Kapsel 3: | 116,5                | 0,1              | 1,012  |
| Kapsel 4: | 114,6                | 2,0              | 1,259  |

**Tabelle 4.2:** Höchster Schallpegel und Berechnung des Faktors zur Kalibrierung

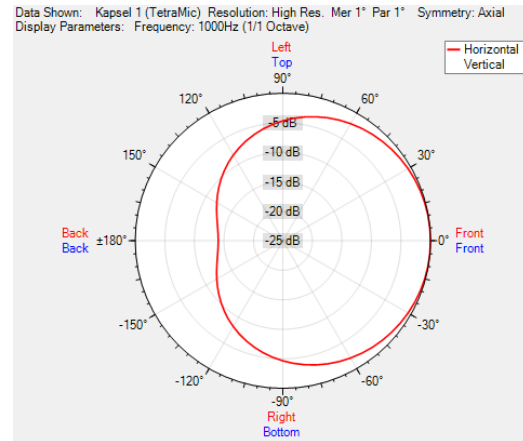
### 4.2.3 Messergebnisse

Um eine Vergleichbarkeit gegenüber der Darstellung von Empfangscharakteristiken handelsüblicher Mikrofone zu gewährleisten, wurde ebenso eine Einteilung in 5 dB Schritten bis -25 dB gewählt (Schneider 2008: 399 f.). Der Wert 0° beschreibt bei den einzelnen Kapseln den Mittelpunkt. Bei Betrachtung aller Kapseln definiert der Wert 0° den Punkt, an welchem sich das Core Sound Logo befindet.

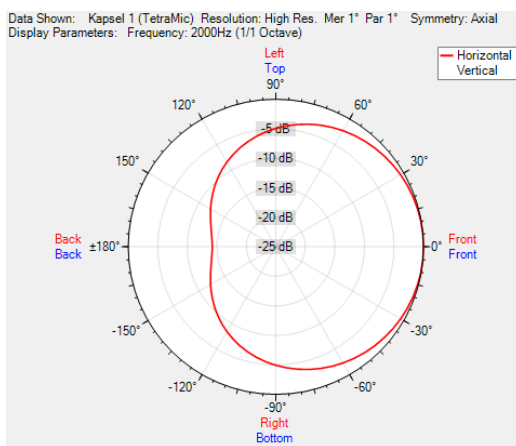
#### 4 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit der Einzelkomponenten



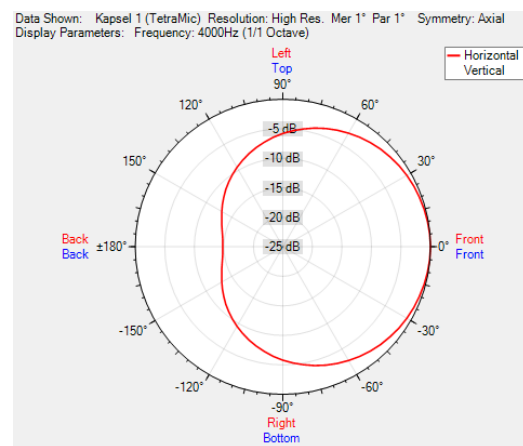
(a) Kapsel 1 bei 500 Hz



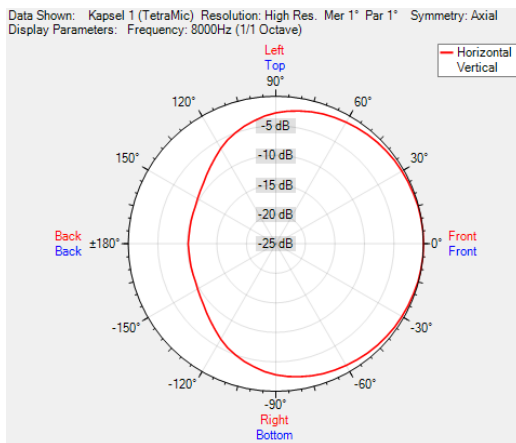
(b) Kapsel 1 bei 1000 Hz



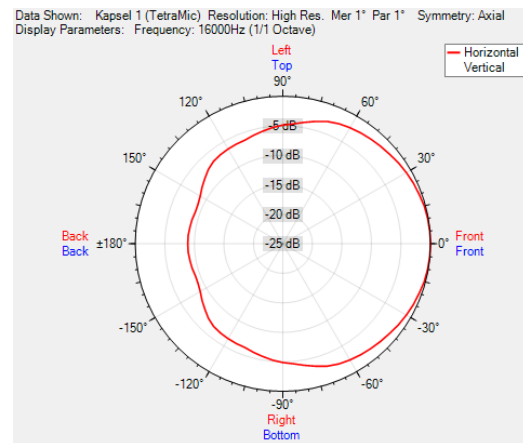
(c) Kapsel 1 bei 2000 Hz



(d) Kapsel 1 bei 4000 Hz



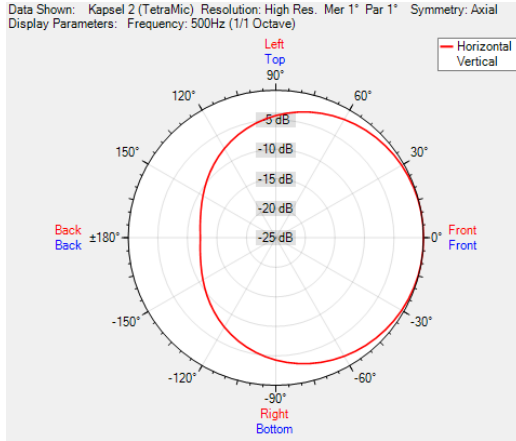
(e) Kapsel 1 bei 8000 Hz



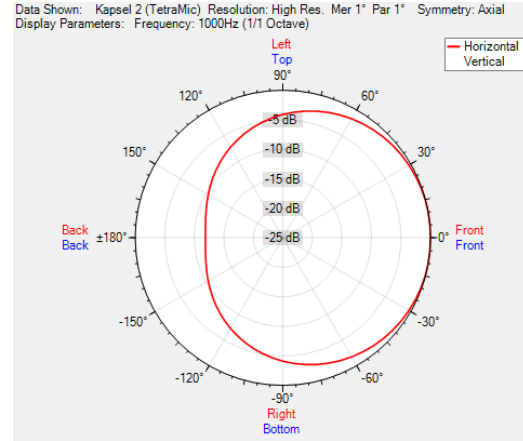
(f) Kapsel 1 bei 16000 Hz

**Abbildung 4.5:** Frequenzabhängige Empfangscharakteristik der ersten Mikrofonkapsel

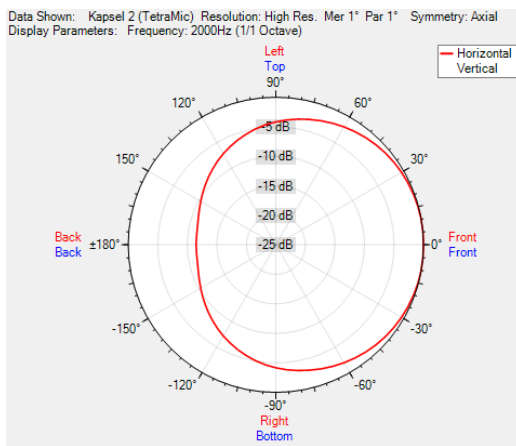
#### 4 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit der Einzelkomponenten



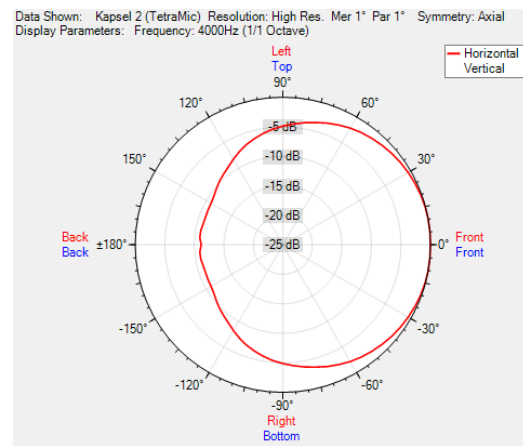
(a) Kapsel 2 bei 500 Hz



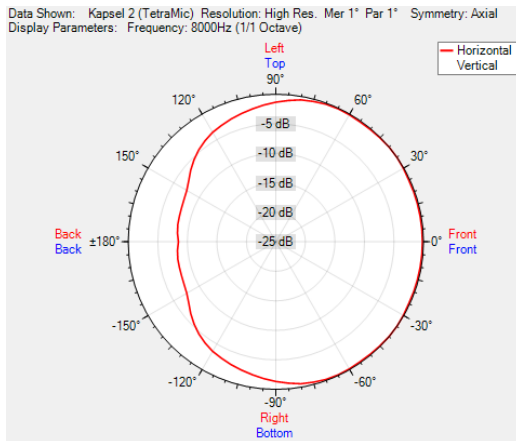
(b) Kapsel 2 bei 1000 Hz



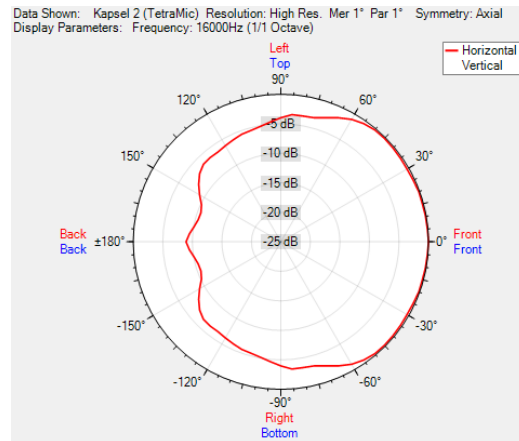
(c) Kapsel 2 bei 2000 Hz



(d) Kapsel 2 bei 4000 Hz



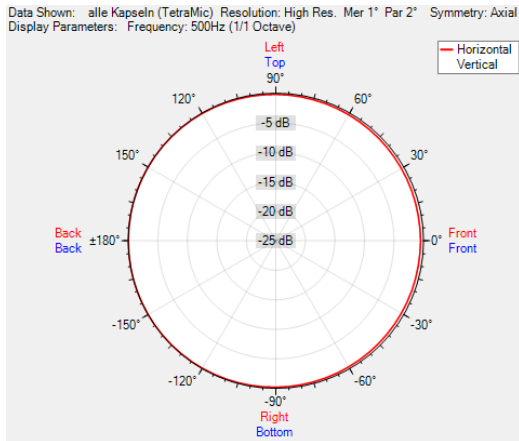
(e) Kapsel 2 bei 8000 Hz



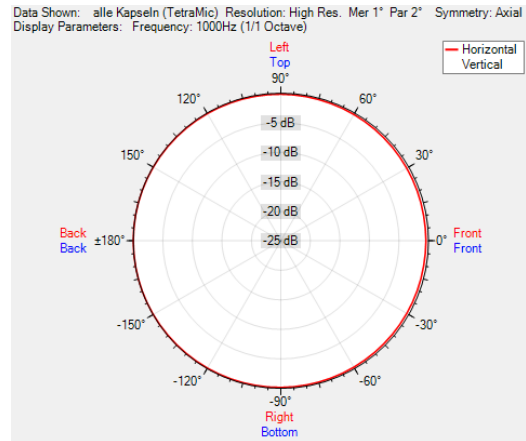
(f) Kapsel 2 bei 16000 Hz

**Abbildung 4.6:** Frequenzabhängige Empfangscharakteristik der zweiten Mikrofonkapsel

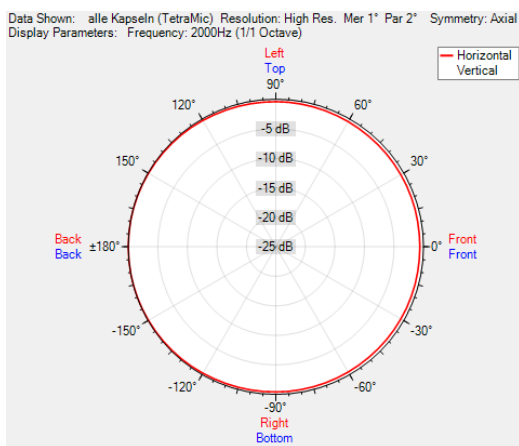
#### 4 Messungen zur Ermittlung der Genauigkeit der Einzelkomponenten



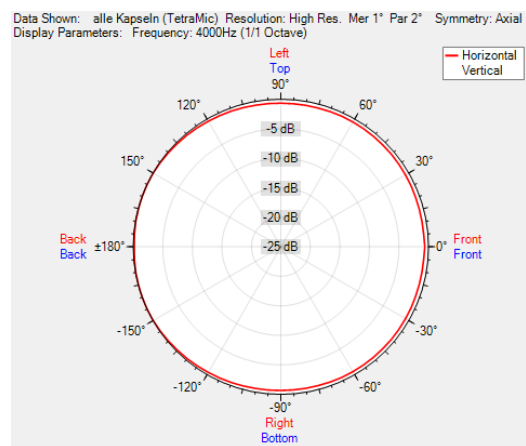
(a) alle Kapseln bei 500 Hz



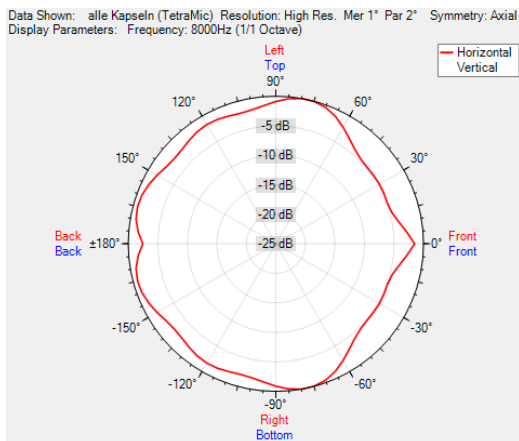
(b) alle Kapseln bei 1000 Hz



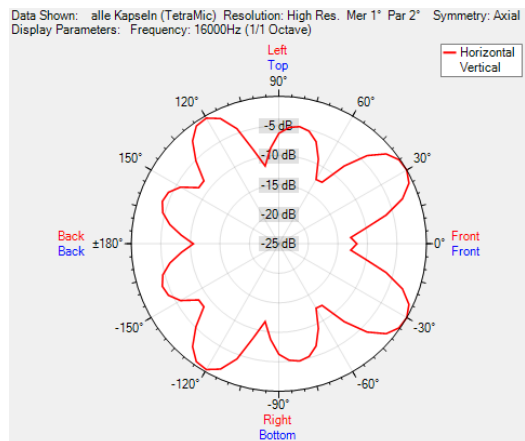
(c) alle Kapseln bei 2000 Hz



(d) alle Kapseln bei 4000 Hz



(e) alle Kapseln bei 8000 Hz



(f) alle Kapseln bei 16000 Hz

**Abbildung 4.7:** Frequenzabhängige Empfangscharakteristik des gesamten Mikrofons

## 4.3 Auswertung

Mit der Simulation von Messsignalen zur Untersuchung der Signalverarbeitung wird deutlich, dass die Signalverarbeitung allein eine signifikant geringere Ungenauigkeit aufweist als die Software in Kombination mit dem TetraMic. Die Abweichung sieht insgesamt Sinus-förmig aus und steigt in der Mitte ( $90^\circ$  bis  $225^\circ$ ) an. Dieser Anstieg ist höchstwahrscheinlich auf einen minimal abweichenden Eingangs- oder Ausgangspegel auf Kanal 3 und 4 am RME Audio Interface zurückzuführen. Wie in Anlage A.3 auf S. 50 zu sehen, verändert sich der Pegel bei einem  $5^\circ$  Schritt um 0,1 bis 0,5 dBFS, daher ist es möglich, dass eine minimale Abweichung des Eingangs- oder Ausgangspegels solche Abweichungen hervorruft. Weitere Ursachen könnten die nicht deaktivierbaren IIR-Filter sein, da diese die Genauigkeit des TetraMic erhöhen und bei der Simulation gegenteilige Effekte verursachen könnten. Ebenfalls infrage kommt die Formel zur Schallpegelberechnung der Reflexionen, da diese aus einer logischen Schlussfolgerung entstanden ist und nicht zwangsläufig die Realität mit dem TetraMic widerspiegelt. Dennoch beträgt die Abweichung nur  $\pm 0,65^\circ$ . Probehaltber wurde die Simulation auch mit der mitgelieferten Text-Datei für die Kalibrierung durchgeführt – Stichproben haben ergeben, dass sich das Bild der Abweichung an manchen Punkten um  $0,1^\circ$  verändert, aber die Grundform erhalten bleibt.

An den Polardiagrammen der Empfangscharakteristik der einzelnen Kapseln des TetraMic lässt sich die Nierencharakteristik erkennen. Da die Kapseln bei der durchgeführten Messung nie direkt von vorne getroffen, sondern schräg geschnitten wurden, ist das Minimum bei  $180^\circ$  nicht so stark ausgeprägt, wie man es von Nierencharakteristiken aus der Literatur kennt. In den höheren Frequenzen wird deutlich, dass die Kapseln ihre Nierencharakteristik verlieren und zunehmend auf der Rückseite an Empfindlichkeit gewinnen. Eine Ursache dafür könnten Beugungseffekte und Reflexionen von den Kapseln untereinander sein. Betrachtet man die Addition von allen Kapseln zusammen, wird veranschaulicht, warum ein 5 kHz Tiefpass-Filter vor der Berechnung der Richtung von eintreffendem Schall notwendig ist. Bei der Addition der Kapseln – und somit der Empfangscharakteristik des TetraMic als Ganzes – auf S. 40 sieht man in Abb. 4.7 (e) und (f), dass das Problem der bereits angesprochenen „non-coincidence“-Effekte zu Phasenauslöschungen und damit starken Ungenauigkeiten führt. Interessant wäre es an dieser Stelle zu wissen, was für eine Flanken-Steilheit der genutzte Filter aufweist und ob ein Lowpass-Filter bei einer tieferen Frequenz und/oder mit einer höheren Ordnung die direktionale Genauigkeit erhöhen würde. In Abb. 4.7 (a) bis (d) kann man erkennen, dass die Genauigkeit keinen perfekten Kreis bildet, was durch eine unzureichende Kalibrierung begründet werden kann – dies ist der Tatsache geschuldet, dass sich ein Kalibrator durch die tetraedische Anordnung des Mikrofons nicht auf die unteren beiden Kapseln stecken lässt. Wie in der Messdurchführung auf S. 37 erwähnt, fand eine grobe Kalibrierung durch die Bestimmung des höchsten Schalldruckpegels jeder Kapsel statt, was allerdings nicht die gleiche Genauigkeit wie eine ordnungsgemäße Kalibrierung mittels Kalibrator bietet.

## 5 Zusammenfassung und Fazit

In dieser Bachelor-Thesis sollte die Genauigkeit eines Messsystems für dreidimensionale Impulsantworten untersucht werden. Begonnen wurde mit der Ermittlung der örtlichen Genauigkeit, welche für die horizontale Ebene vom Hersteller mit  $\pm 7,5^\circ$  angegeben wurde. Bei der Messung der Genauigkeit in der Horizontalen wurde eine deutlich geringere Abweichung von  $\pm 3,47^\circ$  festgestellt, die Vertikale hingegen weist eine etwas höhere Abweichung von  $\pm 8,78^\circ$  auf. Somit ist eine gewisse Ungenauigkeit in der Direktionalität vorhanden, die in der Praxis berücksichtigt werden muss. Bei der Erfassung der zeitlichen Auflösung wurde festgestellt, dass die fixen Zeitfenster von 1 bis 10 ms kein Problem bei der Bestimmung der Richtung von Reflexionen darstellen. Selbst wenn der Beginn einer Reflexion bei der standardmäßigen Einstellung von 2 ms noch im vorherigen Zeitfenster liegt, wird die Richtung dennoch richtig bestimmt. Im Praxistest wird weiterhin deutlich, dass raumakustische Probleme durch störende Reflexionen mit Hilfe des Messsystems lokalisiert und unter Berücksichtigung der Ungenauigkeit einfach behoben werden können.

Betrachtet man die Einzelkomponenten, wird schnell deutlich, wo die Ursachen von Ungenauigkeiten liegen. Dadurch, dass die Software davon ausgeht, dass alle Kapseln am selben Ort sind, kann es für höhere Frequenzen zu destruktiven Interferenzen kommen. Zwar wurden diese Ungenauigkeiten schon mit Hilfe eines Tiefpass-Filters eingedämmt, allerdings könnte eine Feinabstimmung des Filters für eine noch höhere Genauigkeit sorgen. Auch die Verwendung eines anderen Tetraeder-Mikrofons, bei dem die Kapseln näher beieinander liegen, könnte die örtliche Genauigkeit nochmals verbessern. Vernachlässigbar ist die Abweichung in der Signalverarbeitung, da nicht sicher ist, ob es sich bei der gemessenen Abweichung auch wirklich um die reale Abweichung handelt.

Insgesamt lassen sich durch die dargestellten Methoden Schwachstellen bei Messsystemen für dreidimensionale Impulsantworten herausfinden, die von den Herstellern noch verbessert werden können und vom Messingenieur bei der Auswertung von Messungen berücksichtigt werden müssen. Die Weiterentwicklung von Messsystemen für dreidimensionale Impulsantworten erscheint sinnvoll, da es vor allem im Bereich der akustischen Messtechnik in den letzten Jahren zu wenig grundlegenden Neuerungen kam. Es werden Möglichkeiten eröffnet, durch welche derartige Messsysteme das Potential haben, sich auf Dauer durchzusetzen. Es ist denkbar, dass andere Hersteller dieses Prinzip mit in ihre Messsysteme implementieren.

# A Anlagen

## A.1 Erfassung der örtlichen Genauigkeit

| Messergebnisse Horizontale Ebene |                       |                        |                |
|----------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| Eingestellter Winkel [°]         | Gemessener Winkel [°] | Angepasster Winkel [°] | Abweichung [°] |
| 0                                | 19,985                | 0,015                  | 19,985         |
| 5                                | 15,956                | 4,044                  | 20,956         |
| 10                               | 11,199                | 8,801                  | 21,199         |
| 15                               | 6,707                 | 13,293                 | 21,707         |
| 20                               | 2,514                 | 17,486                 | 22,514         |
| 25                               | -1,784                | 21,784                 | 23,216         |
| 30                               | -6,056                | 26,056                 | 23,944         |
| 35                               | -10,325               | 30,325                 | 24,675         |
| 40                               | -14,880               | 34,880                 | 25,120         |
| 45                               | -19,518               | 39,518                 | 25,482         |
| 50                               | -24,493               | 44,493                 | 25,507         |
| 55                               | -29,684               | 49,684                 | 25,316         |
| 60                               | -35,014               | 55,014                 | 24,986         |
| 65                               | -40,301               | 60,301                 | 24,699         |
| 70                               | -45,764               | 65,764                 | 24,236         |
| 75                               | -51,566               | 71,566                 | 23,434         |
| 80                               | -56,741               | 76,741                 | 23,259         |
| 85                               | -62,293               | 82,293                 | 22,707         |
| 90                               | -67,440               | 87,440                 | 22,560         |
| 95                               | -72,352               | 92,352                 | 22,648         |
| 100                              | -77,166               | 97,166                 | 22,834         |
| 105                              | -81,607               | 101,607                | 23,393         |
| 110                              | -86,190               | 106,190                | 23,810         |
| 115                              | -90,984               | 110,984                | 24,016         |
| 120                              | -95,501               | 115,501                | 24,499         |
| 125                              | -100,127              | 120,127                | 24,873         |
| 130                              | -104,796              | 124,796                | 25,204         |
| 135                              | -109,915              | 129,915                | 25,085         |

| <b>Messergebnisse Horizontale Ebene</b> |                       |                        |                |
|---|-----------------------|------------------------|----------------|
| Eingestellter Winkel [°]                | Gemessener Winkel [°] | Angepasster Winkel [°] | Abweichung [°] |
| 140                                     | -115,071              | 135,071                | 24,929         |
| 145                                     | -120,417              | 140,417                | 24,583         |
| 150                                     | -125,838              | 145,838                | 24,162         |
| 155                                     | -131,872              | 151,872                | 23,128         |
| 160                                     | -137,468              | 157,468                | 22,532         |
| 165                                     | -143,098              | 163,098                | 21,902         |
| 170                                     | -148,311              | 168,311                | 21,689         |
| 175                                     | -153,746              | 173,746                | 21,254         |
| 180                                     | -158,881              | 178,881                | 21,119         |
| 185                                     | -163,624              | 183,624                | 21,376         |
| 190                                     | -168,320              | 188,320                | 21,680         |
| 195                                     | -172,942              | 192,942                | 22,058         |
| 200                                     | -177,204              | 197,204                | 22,796         |
| 205                                     | 178,289               | 201,711                | 23,289         |
| 210                                     | 173,777               | 206,223                | 23,777         |
| 215                                     | 169,292               | 210,708                | 24,292         |
| 220                                     | 164,599               | 215,401                | 24,599         |
| 225                                     | 159,372               | 220,628                | 24,372         |
| 230                                     | 154,202               | 225,798                | 24,202         |
| 235                                     | 148,585               | 231,415                | 23,585         |
| 240                                     | 142,850               | 237,150                | 22,850         |
| 245                                     | 137,292               | 242,708                | 22,292         |
| 250                                     | 131,449               | 248,551                | 21,449         |
| 255                                     | 125,942               | 254,058                | 20,942         |
| 260                                     | 120,260               | 259,740                | 20,260         |
| 265                                     | 114,655               | 265,345                | 19,655         |
| 270                                     | 109,571               | 270,429                | 19,571         |
| 275                                     | 104,770               | 275,230                | 19,770         |
| 280                                     | 100,374               | 279,626                | 20,374         |
| 285                                     | 95,483                | 284,517                | 20,483         |
| 290                                     | 90,860                | 289,140                | 20,860         |
| 295                                     | 86,530                | 293,470                | 21,530         |
| 300                                     | 82,151                | 297,849                | 22,151         |
| 305                                     | 77,538                | 302,462                | 22,538         |
| 310                                     | 73,176                | 306,824                | 23,176         |
| 315                                     | 68,305                | 311,695                | 23,305         |
| 320                                     | 63,305                | 316,695                | 23,305         |
| 325                                     | 58,007                | 321,993                | 23,007         |



| Messergebnisse Horizontale Ebene |                       |                        |                |
|----------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| Eingestellter Winkel [°]         | Gemessener Winkel [°] | Angepasster Winkel [°] | Abweichung [°] |
| 330                              | 52,478                | 327,522                | 22,478         |
| 335                              | 47,066                | 332,934                | 22,066         |
| 340                              | 41,376                | 338,624                | 21,376         |
| 345                              | 36,006                | 343,994                | 21,006         |
| 350                              | 30,666                | 349,334                | 20,666         |
| 355                              | 25,472                | 354,528                | 20,472         |
| 360                              | 20,597                | 359,403                | 20,597         |

**Tabelle A.1:** Messergebnisse von der Erfassung der örtlichen Genauigkeit in horizontaler Ebene

| Messergebnisse Vertikale Ebene |                       |                        |                |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| Eingestellter Winkel [°]       | Gemessener Winkel [°] | Angepasster Winkel [°] | Abweichung [°] |
| 0                              | 8,921                 | 8,921                  | 8,921          |
| 5                              | 12,968                | 12,968                 | 7,968          |
| 10                             | 17,015                | 17,015                 | 7,015          |
| 15                             | 20,054                | 20,054                 | 5,054          |
| 20                             | 23,132                | 23,132                 | 3,132          |
| 25                             | 26,989                | 26,989                 | 1,989          |
| 30                             | 30,513                | 30,513                 | 0,513          |
| 35                             | 33,845                | 33,845                 | -1,155         |
| 40                             | 37,660                | 37,660                 | -2,340         |
| 45                             | 41,550                | 41,550                 | -3,450         |
| 50                             | 45,898                | 45,898                 | -4,102         |
| 55                             | 50,532                | 50,532                 | -4,468         |
| 60                             | 55,043                | 55,043                 | -4,957         |
| 65                             | 59,775                | 59,775                 | -5,225         |
| 70                             | 65,392                | 65,392                 | -4,608         |
| 75                             | 71,149                | 71,149                 | -3,851         |
| 80                             | 77,295                | 77,295                 | -2,705         |
| 85                             | 81,972                | 81,972                 | -3,028         |
| 90                             | 87,355                | 87,355                 | -2,645         |
| 95                             | 85,836                | 94,164                 | -0,836         |
| 100                            | 80,230                | 99,770                 | -0,230         |

| <b>Messergebnisse Vertikale Ebene</b> |                       |                        |                |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| Eingestellter Winkel [°]              | Gemessener Winkel [°] | Angepasster Winkel [°] | Abweichung [°] |
| 105                                   | 74,814                | 105,186                | 0,186          |
| 110                                   | 69,486                | 110,514                | 0,514          |
| 115                                   | 64,456                | 115,544                | 0,544          |
| 120                                   | 58,832                | 121,168                | 1,168          |
| 125                                   | 53,779                | 126,221                | 1,221          |
| 130                                   | 49,061                | 130,939                | 0,939          |
| 135                                   | 44,355                | 135,645                | 0,645          |
| 140                                   | 39,360                | 140,640                | 0,640          |
| 145                                   | 35,009                | 144,991                | -0,009         |
| 150                                   | 31,116                | 148,884                | -1,116         |
| 155                                   | 27,499                | 152,501                | -2,499         |
| 160                                   | 23,732                | 156,268                | -3,732         |
| 165                                   | 19,630                | 160,370                | -4,630         |
| 170                                   | 15,202                | 164,798                | -5,202         |
| 175                                   | 11,210                | 168,790                | -6,210         |
| 180                                   | 6,509                 | 173,491                | -6,509         |
| 185                                   | 1,022                 | 178,978                | -6,022         |
| 190                                   | -4,039                | 184,039                | -5,961         |
| 195                                   | -10,530               | 190,530                | -4,470         |
| 200                                   | -15,874               | 195,874                | -4,126         |
| 205                                   | -22,072               | 202,072                | -2,928         |
| 210                                   | -27,743               | 207,743                | -2,257         |
| 215                                   | -34,324               | 214,324                | -0,676         |
| 220                                   | -42,376               | 222,376                | 2,376          |
| 225                                   | -49,352               | 229,352                | 4,352          |
| 230                                   | -57,780               | 237,780                | 7,780          |
| 235                                   | -62,890               | 242,890                | 7,890          |
| 240                                   | -68,260               | 248,260                | 8,260          |
| 245                                   | -73,795               | 253,795                | 8,795          |
| 250                                   | -78,122               | 258,122                | 8,122          |
| 255                                   | -81,863               | 261,863                | 6,863          |
| 260                                   | -85,449               | 265,449                | 5,449          |
| 265                                   | -88,275               | 268,275                | 3,275          |
| 270                                   | -89,038               | 270,962                | 0,962          |
| 275                                   | -83,295               | 276,705                | 1,705          |
| 280                                   | -79,622               | 280,378                | 0,378          |
| 285                                   | -76,319               | 283,681                | -1,319         |
| 290                                   | -71,667               | 288,333                | -1,667         |

| Messergebnisse Vertikale Ebene |                       |                        |                |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| Eingestellter Winkel [°]       | Gemessener Winkel [°] | Angepasster Winkel [°] | Abweichung [°] |
| 295                            | -67,349               | 292,651                | -2,349         |
| 300                            | -63,278               | 296,722                | -3,278         |
| 305                            | -57,874               | 302,126                | -2,874         |
| 310                            | -50,564               | 309,436                | -0,564         |
| 315                            | -44,036               | 315,964                | 0,964          |
| 320                            | -35,747               | 324,253                | 4,253          |
| 325                            | -29,720               | 330,280                | 5,280          |
| 330                            | -23,399               | 336,601                | 6,601          |
| 335                            | -17,278               | 342,722                | 7,722          |
| 340                            | -11,013               | 348,987                | 8,987          |
| 345                            | -5,677                | 354,323                | 9,323          |
| 350                            | 0,047                 | 360,047                | 10,047         |
| 355                            | 4,508                 | 364,508                | 9,508          |
| 360                            | 9,225                 | 369,225                | 9,225          |

**Tabelle A.2:** Messergebnisse von der Erfassung der örtlichen Genauigkeit in vertikaler Ebene

## A.2 Erfassung der zeitlichen Auflösung

| Messergebnisse zeitliche Auflösung |                     |                               |                             |                           |
|------------------------------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Abstand [m]                        | erwartete Zeit [ms] | gemessene Zeit, Referenz [ms] | gemessene Zeit, EASERA [ms] | gemessene Zeit, IRIS [ms] |
| 0,293                              | 1,71                | -                             | 1,70                        | 1,70                      |
| 0,303                              | 1,77                | -                             | 1,75                        | 1,75                      |
| 0,313                              | 1,82                | -                             | 1,81                        | 1,79                      |
| 0,323                              | 1,88                | -                             | 1,86                        | 1,86                      |
| 0,333                              | 1,94                | -                             | 1,91                        | 1,91                      |
| 0,343                              | 2,00                | 1,98                          | 1,97                        | 1,97                      |
| 0,353                              | 2,06                | -                             | 2,04                        | 2,04                      |
| 0,363                              | 2,12                | -                             | 2,11                        | 2,11                      |
| 0,373                              | 2,17                | -                             | 2,15                        | 2,15                      |
| 0,383                              | 2,23                | -                             | 2,20                        | 2,20                      |
| 0,393                              | 2,29                | -                             | 2,27                        | 2,27                      |

| Messergebnisse zeitliche Auflösung |                     |                               |                             |                           |
|------------------------------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Abstand [m]                        | erwartete Zeit [ms] | gemessene Zeit, Referenz [ms] | gemessene Zeit, EASERA [ms] | gemessene Zeit, IRIS [ms] |
| 2,504                              | 14,59               | -                             | 14,49                       | 14,51                     |
| 2,514                              | 14,65               | -                             | 14,51                       | 14,54                     |
| 2,524                              | 14,71               | -                             | 14,58                       | 14,60                     |
| 2,534                              | 14,77               | -                             | 14,67                       | 14,65                     |
| 2,544                              | 14,83               | -                             | 14,76                       | 14,74                     |
| 2,554                              | 14,88               | -                             | 14,81                       | 14,78                     |
| 2,564                              | 14,94               | -                             | 14,85                       | 14,83                     |
| 2,574                              | 15,00               | 14,90                         | 14,90                       | 14,90                     |
| 2,584                              | 15,06               | -                             | 14,97                       | 14,97                     |
| 2,594                              | 15,12               | -                             | 15,01                       | 15,01                     |
| 2,604                              | 15,17               | -                             | 15,08                       | 15,08                     |
| 2,614                              | 15,23               | -                             | 15,12                       | 15,15                     |
| 2,624                              | 15,29               | -                             | 15,19                       | 15,19                     |
| 3,362                              | 19,59               | -                             | 19,46                       | 19,46                     |
| 3,372                              | 19,65               | -                             | 19,51                       | 19,50                     |
| 3,382                              | 19,71               | -                             | 19,57                       | 19,57                     |
| 3,392                              | 19,77               | -                             | 19,62                       | 19,61                     |
| 3,402                              | 19,83               | -                             | 19,68                       | 19,68                     |
| 3,412                              | 19,88               | -                             | 19,73                       | 19,73                     |
| 3,422                              | 19,94               | -                             | 19,79                       | 19,80                     |
| 3,432                              | 20,00               | 19,89                         | 19,86                       | 19,86                     |
| 3,442                              | 20,06               | -                             | 19,91                       | 19,90                     |
| 3,452                              | 20,12               | -                             | 20,00                       | 20,00                     |
| 3,462                              | 20,17               | -                             | 20,05                       | 20,05                     |
| 3,472                              | 20,23               | -                             | 20,11                       | 20,11                     |
| 3,482                              | 20,29               | -                             | 20,16                       | 20,14                     |

**Tabelle A.3:** Messergebnisse von der Erfassung der zeitlichen Auflösung

### A.3 Untersuchung der Signalverarbeitung

| Schallpegelberechnung der einzelnen Kanäle |                |                |                |                |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Reflexion [°]                              | Kanal 1 [dBFS] | Kanal 2 [dBFS] | Kanal 3 [dBFS] | Kanal 4 [dBFS] |
| 0  | -9,8787        | -9,8787        | -14,1213       | -14,1213       |
| 5  | -10,0716       | -9,7019        | -14,2981       | -13,9284       |
| 10   | -10,2793       | -9,5425        | -14,4575       | -13,7207       |
| 15   | -10,5000       | -9,4019        | -14,5981       | -13,5000       |
| 20   | -10,7321       | -9,2811        | -14,7189       | -13,2679       |
| 25   | -10,9739       | -9,1809        | -14,8191       | -13,0261       |
| 30   | -11,2235       | -9,1022        | -14,8978       | -12,7765       |
| 35   | -11,4791       | -9,0456        | -14,9544       | -12,5209       |
| 40   | -11,7385       | -9,0114        | -14,9886       | -12,2615       |
| 45   | -12,0000       | -9,0000        | -15,0000       | -12,0000       |
| 50   | -12,2615       | -9,0114        | -14,9886       | -11,7385       |
| 55   | -12,5209       | -9,0456        | -14,9544       | -11,4791       |
| 60   | -12,7765       | -9,1022        | -14,8978       | -11,2235       |
| 65   | -13,0261       | -9,1809        | -14,8191       | -10,9739       |
| 70   | -13,2679       | -9,2811        | -14,7189       | -10,7321       |
| 75   | -13,5000       | -9,4019        | -14,5981       | -10,5000       |
| 80   | -13,7207       | -9,5425        | -14,4575       | -10,2793       |
| 85   | -13,9284       | -9,7019        | -14,2981       | -10,0716       |
| 90   | -14,1213       | -9,8787        | -14,1213       | -9,8787        |
| 100  | -14,4575       | -10,2793       | -13,7207       | -9,5425        |
| 110  | -14,7189       | -10,7321       | -13,2679       | -9,2811        |
| 120  | -14,8978       | -11,2235       | -12,7765       | -9,1022        |
| 130  | -14,9886       | -11,7385       | -12,2615       | -9,0114        |
| 140  | -14,9886       | -12,2615       | -11,7385       | -9,0114        |
| 150  | -14,8978       | -12,7765       | -11,2235       | -9,1022        |
| 160  | -14,7189       | -13,2679       | -10,7321       | -9,2811        |
| 170  | -14,4575       | -13,7207       | -10,2793       | -9,5425        |
| 180  | -14,1213       | -14,1213       | -9,8787        | -9,8787        |
| 190  | -13,7207       | -14,4575       | -9,5425        | -10,2793       |
| 200  | -13,2679       | -14,7189       | -9,2811        | -10,7321       |
| 210  | -12,7765       | -14,8978       | -9,1022        | -11,2235       |
| 220  | -12,2615       | -14,9886       | -9,0114        | -11,7385       |
| 230  | -11,7385       | -14,9886       | -9,0114        | -12,2615       |
| 240  | -11,2235       | -14,8978       | -9,1022        | -12,7765       |
| 250  | -10,7321       | -14,7189       | -9,2811        | -13,2679       |
| 260  | -10,2793       | -14,4575       | -9,5425        | -13,7207       |
| 270  | -9,8787        | -14,1213       | -9,8787        | -14,1213       |

| Schallpegelberechnung der einzelnen Kanäle |                |                |                |                |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Reflexion [°]                              | Kanal 1 [dBFS] | Kanal 2 [dBFS] | Kanal 3 [dBFS] | Kanal 4 [dBFS] |
| 280  | -9,5425        | -13,7207       | -10,2793       | -14,4575       |
| 290  | -9,2811        | -13,2679       | -10,7321       | -14,7189       |
| 300  | -9,1022        | -12,7765       | -11,2235       | -14,8978       |
| 310  | -9,0114        | -12,2615       | -11,7385       | -14,9886       |
| 320  | -9,0114        | -11,7385       | -12,2615       | -14,9886       |
| 330  | -9,1022        | -11,2235       | -12,7765       | -14,8978       |
| 340  | -9,2811        | -10,7321       | -13,2679       | -14,7189       |
| 350  | -9,5425        | -10,2793       | -13,7207       | -14,4575       |
| 360  | -9,8787        | -9,8787        | -14,1213       | -14,1213       |

**Tabelle A.4:** Berechnung der Schallpegel für die Simulation von Messsignalen

| Messergebnisse Signalverarbeitung |                  |               |                 |                |
|-----------------------------------|------------------|---------------|-----------------|----------------|
| Eingestellter Winkel [°]          | Direktschall [°] | Reflexion [°] | Aufbereitet [°] | Abweichung [°] |
| 0                                 | 0,076            | 0,005         | 0,071           | 0,071          |
| 5                                 | 0,077            | -5,093        | 5,170           | 0,170          |
| 10                                | 0,076            | -10,185       | 10,261          | 0,261          |
| 15                                | 0,077            | -15,255       | 15,332          | 0,332          |
| 20                                | 0,077            | -20,299       | 20,376          | 0,376          |
| 25                                | 0,077            | -25,313       | 25,390          | 0,390          |
| 30                                | 0,076            | -30,297       | 30,373          | 0,373          |
| 35                                | 0,077            | -35,254       | 35,331          | 0,331          |
| 40                                | 0,076            | -40,190       | 40,266          | 0,266          |
| 45                                | 0,078            | -45,117       | 45,195          | 0,195          |
| 50                                | 0,077            | -50,047       | 50,124          | 0,124          |
| 55                                | 0,078            | -54,985       | 55,063          | 0,063          |
| 60                                | 0,083            | -59,954       | 60,037          | 0,037          |
| 65                                | 0,078            | -64,946       | 65,024          | 0,024          |
| 70                                | 0,085            | -69,982       | 70,067          | 0,067          |
| 75                                | 0,077            | -75,040       | 75,117          | 0,117          |
| 80                                | 0,076            | -80,138       | 80,214          | 0,214          |
| 85                                | 0,078            | -85,256       | 85,334          | 0,334          |
| 90                                | 0,081            | -90,391       | 90,472          | 0,472          |
| 100                               | 0,082            | -100,644      | 100,726         | 0,726          |
| 110                               | 0,086            | -110,810      | 110,896         | 0,896          |

| Messergebnisse Signalverarbeitung |                  |               |                 |                |
|-----------------------------------|------------------|---------------|-----------------|----------------|
| Eingestellter Winkel [°]          | Direktschall [°] | Reflexion [°] | Aufbereitet [°] | Abweichung [°] |
| 120                               | 0,088            | -120,843      | 120,931         | 0,931          |
| 130                               | 0,081            | -130,746      | 130,827         | 0,827          |
| 140                               | 0,081            | -140,605      | 140,686         | 0,686          |
| 150                               | 0,075            | -150,492      | 150,567         | 0,567          |
| 160                               | 0,075            | -160,493      | 160,568         | 0,568          |
| 170                               | 0,075            | -170,609      | 170,684         | 0,684          |
| 180                               | 0,075            | 179,200       | 180,800         | 0,800          |
| 190                               | 0,075            | 169,025       | 190,975         | 0,975          |
| 200                               | 0,076            | 158,953       | 201,047         | 1,047          |
| 210                               | 0,076            | 149,022       | 210,978         | 0,978          |
| 220                               | 0,075            | 139,214       | 220,786         | 0,786          |
| 230                               | 0,076            | 129,456       | 230,544         | 0,544          |
| 240                               | 0,076            | 119,660       | 240,340         | 0,340          |
| 250                               | 0,076            | 109,756       | 250,244         | 0,244          |
| 260                               | 0,075            | 99,727        | 260,273         | 0,273          |
| 270                               | 0,076            | 89,610        | 270,390         | 0,390          |
| 280                               | 0,076            | 79,493        | 280,507         | 0,507          |
| 290                               | 0,076            | 69,463        | 290,537         | 0,537          |
| 300                               | 0,075            | 59,556        | 300,444         | 0,444          |
| 310                               | 0,075            | 49,757        | 310,243         | 0,243          |
| 320                               | 0,075            | 39,997        | 320,003         | 0,003          |
| 330                               | 0,075            | 30,185        | 329,815         | -0,185         |
| 340                               | 0,075            | 20,252        | 339,748         | -0,252         |
| 350                               | 0,075            | 10,180        | 349,820         | -0,180         |
| 360                               | 0,076            | 0,005         | 359,995         | -0,005         |

**Tabelle A.5:** Abweichung von eingestelltem zu gemessenem Winkel bei der Simulation von Messsignalen

# Abbildungsverzeichnis

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Modell eines Schalligels nach Erwin Meyer und R. Thiele<br>(Guicking 2012: 32) . . . . .  | 2  |
| 2.1  | Foto des IRIS Messsystems im Pelican Flightcase . . . . .   | 4  |
| 2.2  | Foto des Core Sound TetraMic mit dem Logo nach vorne . . . . .  | 5  |
| 2.3  | Beispiel eines Schalligels bzw. des IRIS Plots in der IRIS Software . .   | 7  |
| 2.4  | Auswirkungen von Reflexionen mit unterschiedlichem Pegel auf Sprache<br>(Sengpiel 1995) . . . . .   | 8  |
| 3.1  | Skizzierter Messaufbau zur Untersuchung der örtlichen Genauigkeit .   | 12 |
| 3.2  | Positionierung des TetraMic im reflexionsarmen Raum . . . . .   | 13 |
| 3.3  | Gemessene Abweichung in horizontaler Ebene . . . . .  | 14 |
| 3.4  | Gemessene Abweichung in vertikaler Ebene . . . . .  | 14 |
| 3.5  | Skizzierter Messaufbau zur Untersuchung der zeitlichen Auflösung . .  | 17 |
| 3.6  | Fotos des Messaufbaus zur Ermittlung der zeitlichen Auflösung . . . .   | 18 |
| 3.7  | Screenshot zur Ermittlung der gemessenen Reflexion in EASERA,<br>Beispiel 2 ms . . . . .  | 19 |
| 3.8  | Vergleich von berechneter zu gemessener Zeit der Reflexion bei 2 ms .   | 20 |
| 3.9  | Vergleich von berechneter zu gemessener Zeit der Reflexion bei 15 ms  | 21 |
| 3.10 | Vergleich von berechneter zu gemessener Zeit der Reflexion bei 20 ms  | 21 |
| 3.11 | Impulsdiagramm der bestehenden raumakustischen Situation,<br>20 dB Schallpegeldifferenz vom Direktschall zur Raumantwort<br>(Darstellung in Room EQ Wizard) . . . . .                                     | 23 |
| 3.12 | Bestehende raumakustische Maßnahmen im Heimstudio . . . . .   | 23 |
| 3.13 | Skizzierter Messaufbau zum Praxistest . . . . .   | 24 |
| 3.14 | Vorher - IRIS Plot der bestehenden Situation . . . . .  | 25 |
| 3.15 | Zwischenschritt - IRIS Plot mit Absorbern an der Rückwand . . . . .   | 26 |
| 3.16 | Nachher - IRIS Plot mit Absorbern an Rückwand und über Abhörposition<br>. . . . .   | 26 |
| 3.17 | Resultat der zusätzlichen Absorptionsflächen im Heimstudio . . . . .  | 27 |
| 3.18 | Impulsdiagramm der raumakustischen Situation nach der Optimierung,<br>25 dB Schallpegeldifferenz vom Direktschall zur Raumantwort<br>(Darstellung in Room EQ Wizard) (vgl. Abb. 3.11 auf S. 23) . . . . . | 27 |
| 3.19 | Genaue Positionierung an der Rückwand (gelbe Kästen) mittels Raytracing<br>Modell (amray - sketch to trace: <a href="http://amray.andymel.eu">http://amray.andymel.eu</a> )                               | 28 |



## *Abbildungsverzeichnis*

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 4.1 | Skizzierter Messaufbau zur Untersuchung der Signalverarbeitung . . .  | 32 |
| 4.2 | Abweichung der Signalverarbeitung bei der Simulation von Reflexionen<br>in der horizontalen Ebene . . . . . | 34 |
| 4.3 | Skizzierter Messaufbau zur Messung der Empfangscharakteristiken . .   | 35 |
| 4.4 | Fotos des Messaufbaus zur Messung der Empfangscharakteristik . . .  | 36 |
| 4.5 | Frequenzabhängige Empfangscharakteristik der ersten Mikrofonkapsel  | 38 |
| 4.6 | Frequenzabhängige Empfangscharakteristik der zweiten Mikrofonkapsel   | 39 |
| 4.7 | Frequenzabhängige Empfangscharakteristik des gesamten Mikrofons .   | 40 |

# Tabellenverzeichnis

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.1 | Messergebnisse der horizontalen und vertikalen Genauigkeit . . . . .                            | 15 |
| 3.2 | Zeiteinteilungen in der IRIS Software für die farbliche Codierung . . .                         | 16 |
| 3.3 | Messergebnisse der Erfassung der zeitlichen Auflösung . . . . .                                 | 22 |
| 4.1 | Abweichung der Signalverarbeitung . . . . .   | 34 |
| 4.2 | Höchster Schallpegel und Berechnung des Faktors zur Kalibrierung .                              | 37 |
| A.1 | Messergebnisse von der Erfassung der örtlichen Genauigkeit in horizontaler Ebene . . . . .      | 45 |
| A.2 | Messergebnisse von der Erfassung der örtlichen Genauigkeit in vertikaler Ebene . . . . .        | 47 |
| A.3 | Messergebnisse von der Erfassung der zeitlichen Auflösung . . . . .                             | 48 |
| A.4 | Berechnung der Schallpegel für die Simulation von Messsignalen . . . .                          | 50 |
| A.5 | Abweichung von eingestelltem zu gemessenem Winkel bei der Simulation von Messsignalen . . . . . | 51 |

# Literaturverzeichnis

- Bradley, J. S. & Sato, H.: „On the importance of early reflections for speech in rooms“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 113, S. 3233, 2003
- Core Sound: *TetraMic Specifications*, <http://www.core-sound.com/TetraMic/2.php>, 2017, letzter Zugriff: 10. März 2017
- Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN 18041:2016-03 – Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung*, 2016, Beuth Verlag GmbH
- Dickreiter, Michael: „Messungen an Lautsprechersystemen“, in: Michael Dickreiter, Volker Dittel, Wolfgang Hoeg, Martin Wöhr (Hrsg.): *Handbuch der Tonstudioteknik – Band 1*, 8. Aufl., De Gruyter Saur 2014
- Dietsch, L. & Kraak, W.: „Ein objektives Kriterium zur Erfassung von Echostörungen bei Musik- und Sprachdarbietungen“, *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 60, No. 3, 1986
- Friesecke, Andreas: *Studio Akustik – Konzepte für besseren Klang*, 5. Aufl., PPV-MEDIEN 2015
- Giancoli, Douglas C.: *Physik: Lehr- und Übungsbuch*, Pearson Deutschland GmbH 2010
- Guicking, Dieter: *Erwin Meyer – Ein bedeutender deutscher Akustiker – Biographische Notizen*, Universitätsverlag Göttingen 2012
- Junius, W.: „Raumakustische Untersuchungen mit neueren Messverfahren in der Liederhalle Stuttgart“, *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 9, No. 4, 1959
- Lerch, Reinhard & Sessler, Gerhard & Wolf, Dietrich: *Technische Akustik*, Springer-Verlag 2009
- Marshall Day Acoustics: *Marshall Day Acoustics release IRIS 3D impulse response measurement system*, <http://www.iris.co.nz/news/marshall-day-acoustics-release-iris-3d-impulse-response-measurement-system>, 2013, letzter Zugriff: 10. März 2017
- Marshall Day Acoustics: *IRIS 1.1 User Manual*, 2015

## Literaturverzeichnis

- Michel, Ulf & Möser, Michael: „Akustische Antennen“, in Möser, Michael (Hrsg.): *Messtechnik der Akustik*, Springer-Verlag 2010
- NAVCON US: *IRIS 3D Acoustic Impulse Response*, <https://youtu.be/HMAVB9r3zho?t=5m12s>, 2015, letzter Zugriff: 21. Februar 2017
- Protheroe, Daniel & Guillemin, Bernard: „3D impulse response measurements of spaces using an inexpensive microphone array“, *International Symposium on Room Acoustics*, 2013
- Schneider, Martin: „Mikrofone“, in Weinzierl, Stefan (Hrsg.): *Handbuch der Audio-technik*, Springer-Verlag 2008
- Sengpiel, Eberhard: *Wirkung einer Seitenreflexion bei Sprache als Testsignal*, <http://www.sengpielaudio.com/WirkungEinerSeitenreflexionBeiSprache.pdf>, 1995, letzter Zugriff: 23. Februar 2017
- Sengpiel, Eberhard: *Schallpegeländerung und Lautheitsfaktor*, <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-pegelaenderung.htm>, o. J., letzter Zugriff: 14. März 2017
- Toole, Floyd E.: *Sound Reproduction – Loudspeakers and Rooms*, Focal Press 2008
- Van Veen, B. D. & Buckley, K. M.: „Beamforming: a versatile approach to spatial filtering“, *IEEE ASSP Magazine*, Vol. 5, No. 2, 1988
- Yamasaki, Yoshio & Itow, Takeshi: „Measurement of spatial information in sound fields by closely located four point microphone method“, *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, Vol. 10, No. 2, 1989

Ich versichere, die vorliegende Arbeit selbstständig ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt zu haben. Die aus anderen Werken wörtlich entnommenen Stellen oder dem Sinn nach entlehnten Passagen sind durch Quellenangaben eindeutig kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Nico Hecht