

---

# BACHELOR

---

Herr  
**Konstantin Schönherr**

## **Analytische Überprüfung binauraler Raumimpulsantworten während der Messung**

**Analytical verification of binaural room impulse  
responses during measurement**

2019



# **BACHELOR**

---

## **Analytische Überprüfung binauraler Raumimpulsantworten während der Messung**

**Analytical verification of binaural room impulse  
responses during measurement**

Autor:

**Konstantin Schönherr**

Studiengang:

MAE - Vertiefung Akustik

Seminargruppe:

MG15W-C

Erstprüfer:

Prof. Jörn Hübelt

Zweitprüfer:

Dr. Stephan Werner

Mittweida, März 2019



---

## **Bibliografische Angaben**

Schönherr, Konstantin: Analytische Überprüfung binauraler Raumimpulsantworten während der Messung, Analytical verification of binaural room impulse responses during measurement, 89 Seiten, 72 Abbildungen, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Medien

Bachelor, 2019

## **Referat**

Um eine akustische Simulationen an die auditive Wahrnehmung des Menschen anzupassen bedient man sich binauraler Raumimpulsantworten (BRIR). Diese werden meist durch einen Kunstkopf gemessen unter Verwendung eines logarithmischen Sinus-Sweeps. Die Messungen sind zeitaufwendig und anfällig für Störungen, die durch Störgeräusche oder Fehler in der Messanordnung entstehen können.

Um die Qualität der Aufnahmen während der Messung zu überprüfen, wurde eine Funktion unter Verwendung der Messung der spektralen Ebenheit (SFM) in MatLab entwickelt. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind hier zusammenfassend dargestellt.



# I. Inhaltsverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| Inhaltsverzeichnis .....                      | I   |
| Abbildungsverzeichnis .....                   | II  |
| Tabellenverzeichnis .....                     | III |
| 1 Einleitung .....                            | 1   |
| 2 Theoretische Grundlagen .....               | 3   |
| 2.1 Raumimpulsantworten .....                 | 3   |
| 2.1.1 Erzeugung von Raumimpulsantworten ..... | 3   |
| 2.1.2 Vergleich der Aufnahmeverfahren .....   | 7   |
| 2.2 Binaurale Raumimpulsantworten .....       | 8   |
| 2.3 Die spektrale Ebenheit (SFM) .....        | 9   |
| 3 Vorüberlegung .....                         | 11  |
| 3.1 Bestehendes Skript .....                  | 11  |
| 3.2 Fehleranalyse .....                       | 12  |
| 3.2.1 Systematische Fehler .....              | 12  |
| 3.2.2 Zufällige Fehler .....                  | 13  |
| 3.2.3 Ausblick .....                          | 13  |
| 3.3 Ermittlung der Zielfunktion .....         | 15  |
| 3.3.1 Ansatz .....                            | 15  |
| 3.3.2 Bestimmung der Parameter .....          | 17  |
| 4 Umsetzung in MatLab .....                   | 23  |
| 4.1 Bestandteile .....                        | 23  |
| 4.2 Überprüfung des Testtons .....            | 24  |
| 4.3 Überprüfung der Stille .....              | 25  |
| 4.4 Überprüfung des Sweeps .....              | 26  |
| 5 Auswertung .....                            | 29  |
| 5.1 Überprüfung der Routine .....             | 29  |
| 5.2 Messaufbau .....                          | 29  |
| 5.3 ROC-Analyse .....                         | 31  |

---

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 5.4 | Erkannte systematisch-systematische Fehler ..... | 32 |
| 5.5 | Erkannte systematisch-zufällige Fehler .....     | 33 |
| 5.6 | Erkannte zufällig-systematische Fehler .....     | 37 |
| 5.7 | Erkannte zufällig-zufällige Fehler .....         | 38 |
| 6   | Diskussion .....                                 | 41 |
| 6.1 | Fehlerbetrachtung .....                          | 41 |
| 6.2 | Vergleich zu anderen Projekten .....             | 41 |
| 6.3 | Vergleich zu der Zielstellung .....              | 42 |
| 7   | Fazit .....                                      | 43 |
|     | Literaturverzeichnis .....                       | 45 |
| A   | Messaufbau .....                                 | 49 |
| B   | Messergebnisse .....                             | 53 |
| C   | MatLab-Funktionen .....                          | 75 |

## II. Abbildungsverzeichnis

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Beispiel eines MLS-Signal der dritten Ordnung .....   | 4  |
| 2.2 | Beispiel eines IRS-Signal der dritten Ordnung mit der zu Grunde liegenden MLS .....   | 5  |
| 2.3 | Fehler einer Messung; [Farina (2000), Anhang] .....   | 7  |
| 2.4 | Ermittlung der SFM via Spektrogramm .....   | 9  |
| 3.1 | Nassi-Shneiderman-Diagramm zur Messumgebung .....   | 11 |
| 3.2 | Nassi-Shneiderman-Diagramm zur Aufnahmefunktion .....   | 12 |
| 3.3 | SFM eines optimalen Sweeps .....  | 15 |
| 3.4 | Ausgangsfunktion und SFM des Sweeps mit Stille .....  | 17 |
| 3.5 | Ausgangsfunktion mit Faktor $b$ und SFM des Sweeps mit Stille .....   | 18 |
| 3.6 | Ausgangsfunktion mit Faktor $b$ und $n$ und SFM des Sweeps mit Stille .....   | 19 |
| 3.7 | Ausgangsfunktion mit Faktor $b$ , $n$ und $m$ und SFM des Sweeps mit Stille .....   | 20 |
| 3.8 | Ausgangsfunktion mit Faktor $b$ , $n$ und $m$ mit Anzahl der Samples generiert und SFM<br>des Sweeps mit Stille .....                                   | 21 |
| 4.1 | Vergleich des ungefilterten Signales mit dem gefilterten Signal .....   | 23 |
| 4.2 | Aufbau der Umgebung der Überprüfungsroutine .....   | 24 |
| 4.3 | Überprüfung des Testtons .....  | 25 |
| 4.4 | Nassi-Shneiderman-Diagramm der Funktion, die Aufnahmen der Stille überprüft .....   | 26 |
| 5.1 | Anstieg der Lautstärke der Störgeräusche .....  | 29 |
| 5.2 | Nassi-Shneiderman-Diagramm zur Messroutine .....  | 30 |
| 5.3 | Nassi-Shneiderman-Diagramm der Auswertung und Überprüfung der Messroutine ...   | 30 |
| 5.4 | Fehlererkennung der systematisch-systematischen Fehler 0 Grad Drehung .....   | 32 |
| 5.5 | Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen<br>Rauschen bei 0 Grad Drehung .....                                    | 33 |
| 5.6 | Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind,<br>bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung ..... | 34 |
| 5.7 | Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad<br>Drehung .....  | 35 |

---

|   |    |
|---|----|
| 5.8 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung .....  | 35 |
| 5.9 Fehlererkennung der zufällig-systematischen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad Drehung .....   | 37 |
| 5.10 Fehlererkennung der zufällig-zufälligen Fehler bei 0 Grad Drehung.....   | 38 |
| 5.11 Fehlererkennung der zufällig-zufälligen Fehler, wenn diese lauter oder gleich laut sind, bei 0 Grad Drehung .....  | 39 |
| A.1 Skizze des Messaufbaus, Draufsicht .....  | 49 |
| A.2 Skizze des Messaufbaus, Frontalansicht; D und C liegen unter den zugehörigen Lautsprechern und B repräsentiert den Ursprung des Systems, A liegt zwischen den Ohren ..... | 50 |
| A.3 Skizze des Messaufbaus, Kopf auf Drehteller .....   | 50 |
| B.1 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 63-125 Hz .....  | 53 |
| B.2 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 125-250 Hz.....  | 54 |
| B.3 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 250-500 Hz.....  | 54 |
| B.4 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 500-1000 Hz .....  | 55 |
| B.5 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 1000-2000 Hz .....   | 55 |
| B.6 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 2000-4000 Hz .....   | 56 |
| B.7 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 4000-8000 Hz .....   | 56 |
| B.8 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 8000-16000 Hz.....   | 57 |
| B.9 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 63-125 Hz.....            | 58 |

---

|   |    |
|---|----|
| B.10 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind,<br>bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 125-250 Hz .....  | 59 |
| B.11 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind,<br>bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 250-500 Hz .....  | 59 |
| B.12 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind,<br>bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 500-1000 Hz ..... | 60 |
| B.13 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind,<br>bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 1000-2000 .....   | 60 |
| B.14 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind,<br>bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 2000-4000 Hz..... | 61 |
| B.15 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind,<br>bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 4000-8000 Hz..... | 61 |
| B.16 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind,<br>bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 8000-16000 .....  | 62 |
| B.17 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad<br>Drehung; 63 Hz.....   | 63 |
| B.18 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad<br>Drehung; 125 Hz .....   | 64 |
| B.19 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad<br>Drehung; 250 Hz .....   | 64 |
| B.20 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad<br>Drehung; 500 Hz .....   | 65 |
| B.21 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad<br>Drehung; 1000 Hz .....  | 65 |
| B.22 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad<br>Drehung; 2000 Hz .....  | 66 |
| B.23 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad<br>Drehung; 4000 Hz .....  | 66 |
| B.24 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad<br>Drehung; 8000 Hz .....  | 67 |

---

|   |    |
|---|----|
| B.25 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 16000 Hz .....                                    | 67 |
| B.26 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 63 Hz .....    | 69 |
| B.27 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 125 Hz.....    | 70 |
| B.28 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 250 Hz.....    | 70 |
| B.29 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 500 Hz.....    | 71 |
| B.30 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 1000 Hz .....  | 71 |
| B.31 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 2000 Hz .....  | 72 |
| B.32 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 4000 Hz .....  | 72 |
| B.33 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 8000 Hz .....  | 73 |
| B.34 Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 16000 Hz ..... | 73 |
| C.1 Aufbau der Umgebung der Überprüfungsroutine .....   | 76 |
| C.2 Überprüfung des Testtons .....  | 78 |
| C.3 Nassi-Shneiderman-Diagramm der Funktion, die Aufnahmen der Stille überprüft .....   | 80 |
| C.4 Nassi-Shneiderman-Diagramm der flat_time Funktion.....  | 82 |
| C.5 Nassi-Shneiderman-Diagramm für die Generierung der Parameter $m_t$ und $m_s$ .....  | 84 |
| C.6 Nassi-Shneiderman-Diagramm für die Generierung des Parameter $k$ .....  | 85 |
| C.7 Nassi-Shneiderman-Diagramm für die Generierung der Zielfunktion $z(x)$ .....  | 85 |
| C.8 Nassi-Shneiderman-Diagramm für die Überprüfung der aufgenommenen Sweeps ...   | 86 |

---

## III. Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| 2.1 Bedeutung der Variablen .....                                    | 6  |
| 2.2 Bedeutung der Variablen .....                                    | 7  |
| 2.3 Optimaler Signal-Rausch-Abstand jeder Methode in dB .....        | 8  |
| 2.4 Optimaler Schalldruckpegel am Mikrofon jeder Methode in dB ..... | 8  |
| A.1 Messgeräte .....   | 51 |
| B.1 Maximaler Youden-Index samt Abweichung .....                     | 57 |
| B.2 Maximaler Youden-Index samt Abweichung .....                     | 62 |
| B.3 Maximaler Youden-Index samt Abweichung .....                     | 68 |
| B.4 Maximaler Youden-Index samt Abweichung .....                     | 74 |



# 1 Einleitung

In der Vergangenheit gab es verschiedene Untersuchungen zu akustischen Simulationen von Räumen. Grundlage dieser sind immer Raumimpulsantworten [Böhm (2015)]. Möchte man einen Raum an die auditive Wahrnehmung von Klangereignissen anpassen, werden binaurale Raumimpulsantworten benötigt. Eine Raumimpulsantwort beschreibt das Verhalten eines Raumes, der als lineares zeitinvariantes System betrachtet werden kann, wenn es durch einen Dirac-Impuls angeregt wird [Keesman (2011), Kap. 2.1]. Diese kann entweder aus omnidirektional gemessenen Raumimpulsantworten mittels HRTF generiert werden [Pörschmann und Wiefeling (2015)] oder direkt mittels einem Kunstkopf gemessen werden. HRTF sind Head Related Transferfunctions und beinhalten alle Informationen zu Beugungs- und Reflexionseffekten, die benötigt werden um eine Lokalisation von Schallquellen zu ermöglichen [Lins u. a. (2016)].

An der TU Ilmenau werden die erforderlichen Impulsantworten mittels Kunstkopf aufgezeichnet. Dieser steht auf einem Drehteller, welcher den Kunstkopf rotieren lässt, um so Schallereignisse aus verschiedenen Richtungen aufzeichnen zu können. Dadurch wird eine große Zeitspanne für die Messung beansprucht. Darüber hinaus können Aufnahmen beeinträchtigt werden, was jedoch nicht direkt erkennbar ist.

In dieser Arbeit soll ein Weg gefunden werden, wie sich mittels eines MatLab-Skriptes während der Messung die Aufnahmen überprüfen lassen. Dazu sollen zunächst mögliche Fehlerquellen evaluiert werden, um diese durch Funktionen zu ermitteln und um so einen besseren Datensatz an Aufnahmen zu erhalten.



## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Raumimpulsantworten

Betrachtet man Schall, der sich in einem Raum ausbreitet, so kann man dies in den meisten Fällen mit einem linearen zeitinvarianten System (LTI-System) vergleichen [Lindau und Weinzierl (2006), Kap. 4.1.1]. Dadurch lässt sich der Raum mit einer Raumimpulsantwort  $h(t)$  charakterisieren [Giese (2009), Kap. 1.3.1]. Diese beschreibt das Verhalten eines Dirac-Impulses, wenn es durch das LTI-System Raum verändert wird [Dietze und Frank (2008), S. 6]. Dadurch lässt sich hinreichend genau betrachten, wie sich jede Frequenz in dem System des Raumes verhält. Bedeutung hat dies für die Akustik um so beispielsweise die Nachhallzeit eines Raumes zu berechnen oder um Klangergebnisse in einem Raum zu simulieren.

Betrachtet man ein Ausgangssignal  $g(t)$ , welches durch das System Raum verändert wird  $s(t)$ , so gilt für die Beziehung zur Raumimpulsantwort  $h(t)$  die folgende Gleichung, Vgl. s. [Böhm (2015), Kap. 2.2.1].

$$g(t) = h(t) * s(t) \quad (2.1)$$

#### 2.1.1 Erzeugung von Raumimpulsantworten

Um eine Raumimpulsantwort zu erzeugen gibt es verschiedene Aufnahmeverfahren. Diese sollen kurz vorgestellt und verglichen werden.

##### **Abgeschaltetes weißes Rauschen**

Eine Methode, welche lange Zeit üblich war, ist die Generierung einer Raumimpulsantwort mittels weißen Rauschens. Weißes Rauschen ist ein stochastisches (zufällig generiertes) Signal bei denen die Amplituden aller Frequenzen gleich sind. Hierbei wird das Signal über Lautsprecher wiedergegeben und über ein Mikrofon aufgezeichnet. Mittels Kreuzkorrelation des Eingangs- und des Ausgangssignals kann daraus eine Raumimpulsantwort bestimmt werden. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass die Bandbreite des Rauschens viel größer ist, als die Bandbreite des zu untersuchenden Systems [Girod u. a. (2003), Kap. 18.2.7].

## MLS-Methode

Diese Methode stellt eine Variation der Methodik mit abgeschalteten weißen Rauschen dar. Hierbei wird mit einem fest definierten Signal gearbeitet. MLS meint Maximum Length Sequence, Vgl. s. [Hee (2003)], und lässt sich als binäre Pseudozufallsfolge beschreiben, mit einer Länge von  $L = 2^m - 1$  Samples.  $m$  beschreibt hierbei die Ordnung der Folge.

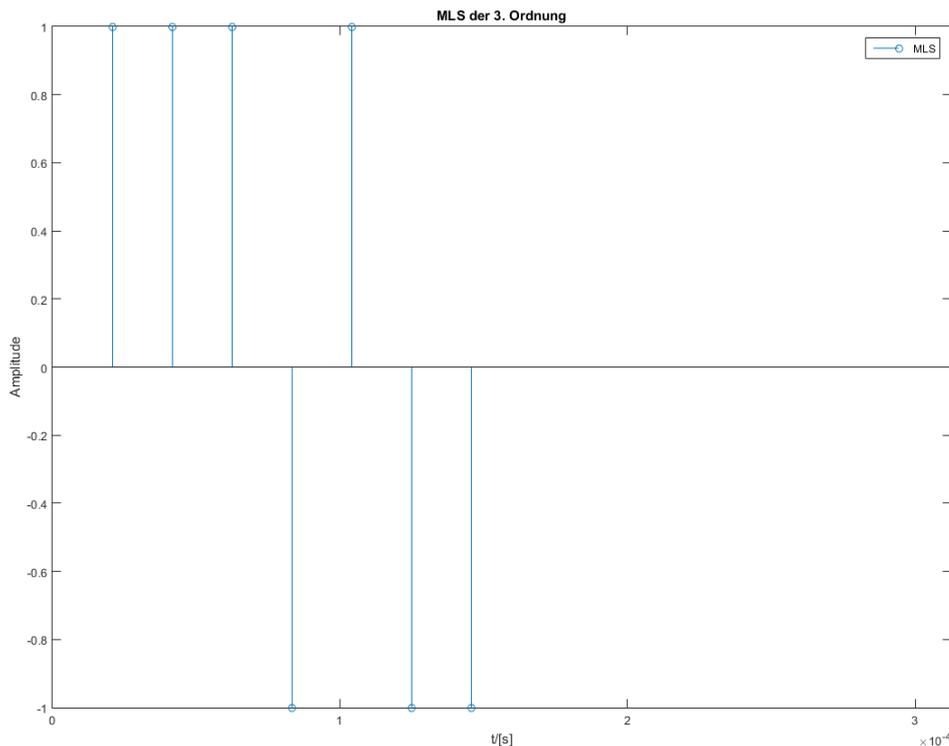


Abbildung 2.1: Beispiel eines MLS-Signal der dritten Ordnung

Mittels einer Kreuzkorrelation erhält man eine periodische Raumimpulsantwort [Dietze und Frank (2008), Seite 10].

$$r_{xy}(n) = \frac{1}{L+1} \cdot \sum_{i=0}^{L-1} [(x[i-n] \bmod L) \cdot y(i)] \quad (2.2)$$

## IRS-Methode

IRS steht für Inverse Repeatet Sequence und ergibt sich aus der MLS-Methode Vgl. s. [Torrás-Rosell (2009), Kap. 2.5]. Diese Sequenz hat die doppelte Länge ihrer MLS, durch die sie wie folgt determiniert ist:

$$irs(n) = \begin{cases} mls(n) & \text{wenn } n \bmod 2 = 0; 0 < n < 2L \\ -mls(n) & \text{wenn } n \bmod 2 = 1; 0 < n < 2L \end{cases} \quad (2.3)$$

Visualisiert man dies, so würde sich zum Beispiel aus der oberen Reihe dieses Bild ergeben:

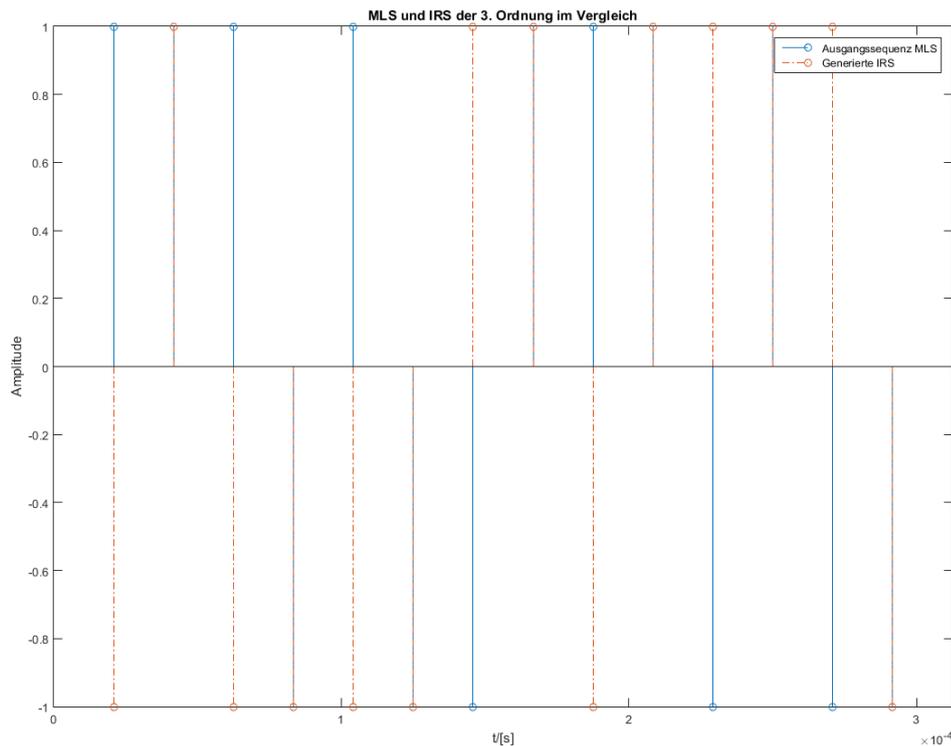


Abbildung 2.2: Beispiel eines IRS-Signal der dritten Ordnung mit der zu Grunde liegenden MLS

Auch hier erfolgt die Ermittlung der Raumimpulsantwort mittels Kreuzkorrelation, Vgl. s. [Torrás-Rosell (2009), Kap. 3.3].

### Stretched-Pulse-Methode

Ein Problem der anderen Methoden sind lineare Verzerrungen, die durch Lautsprecher entstehen können. Ein möglicher Weg dies zu umgehen ist die Stretched-Pulse-Methode. Diese bedient sich eines linearen Sweeps [Müller und Massarani (2001), Kap. 4]. Da dieses Signal denselben Frequenzgang wie ein Dirac-Impuls besitzt, wird dieses Signal als Stretched-Pulse bezeichnet. Dies wird durch eine Aneinanderreihung von Sinussignalen unterschiedlicher Perioden erreicht. Die Formel hierfür lautet nach [Meng u. a. (2008), Kap. 2.1]:

$$x(t) = \sin \left( \omega_1 \cdot t + \frac{\omega_2 - \omega_1}{T} \cdot \frac{t^2}{2} \right) \quad (2.4)$$

Tabelle 2.1: Bedeutung der Variablen

| Variable | $\omega_1$           | $\omega_2$         | $t$           | $T$              |
|----------|----------------------|--------------------|---------------|------------------|
| Größe    | Kreisfrequenz Anfang | Kreisfrequenz Ende | Aktuelle Zeit | Länge des Sweeps |
| Einheit  | Hz                   | Hz                 | Sek.          | Sek.             |

Betrachtet man die Gleichung 2.1 so lässt sich folgende Beziehung herstellen:

$$g(t) = h(t) * s(t) \quad (2.5)$$

Da eine Faltung im Zeitbereich eine Multiplikation im Frequenzbereich meint [Meyer (2017), Kap. 2.3.2], lässt sich daraus folgende Schlussfolgerung ziehen:

$$\mathcal{F}(g(t)) = \mathcal{F}(h(t)) \cdot \mathcal{F}(s(t)) \quad (2.6)$$

$$\Rightarrow \mathcal{F}(h(t)) = \frac{\mathcal{F}(g(t))}{\mathcal{F}(s(t))} \Rightarrow H(t) = \frac{G(t)}{S(t)} \quad (2.7)$$

Das bedeutet für diesen Fall, dass man mittels einer Division der Transformierten des Aus- und Eingangssignals eine Transformierte der Raumimpulsantwort ermitteln kann. Führt man eine inverse Transformation durch, so erhält man die Raumimpulsantwort:

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1}(H(t)) = \mathcal{F}^{-1} \left( \frac{G(t)}{S(t)} \right) \quad (2.8)$$

### Farina-Sweep-Methode

Diese Methode wurde von einem Team um A. Farina 2000 vorgestellt [Farina (2000)]. Dabei wird mit einem logarithmischen Sinus-Sweep gearbeitet, Vgl. s. [Farina (2007)], wodurch der Frequenzgang dieses Signals mit einem Rosa-Rauschen vergleichbar ist. Die Formel für die Bildung dieses Signales lautet:

$$x(t) = \sin \left[ \frac{\omega_1 \cdot T}{\ln \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} \cdot \left( e^{\frac{t}{T} \cdot \ln \frac{\omega_2}{\omega_1}} - 1 \right) \right] \quad (2.9)$$

Tabelle 2.2: Bedeutung der Variablen

| Variable | $\omega_1$           | $\omega_2$         | $t$           | $T$              |
|----------|----------------------|--------------------|---------------|------------------|
| Größe    | Kreisfrequenz Anfang | Kreisfrequenz Ende | Aktuelle Zeit | Länge des Sweeps |
| Einheit  | Hz                   | Hz                 | Sek.          | Sek.             |

In einer älteren Abhandlung wird folgendes Bild des zu messenden Systemes gezeichnet:

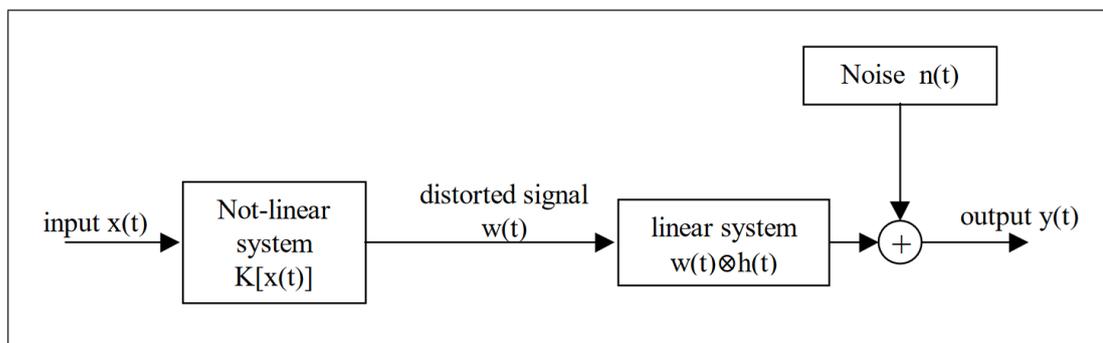


Abbildung 2.3: Fehler einer Messung; [Farina (2000), Anhang]

Um die Verzerrungen zu berücksichtigen wird eine Faltung nach Gleichung 2.8 vorgenommen.

So erhält man eine Raumimpulsantwort frei von linearen Verzerrungen durch die Verwendung eines Sinus-Sweeps nach Farina et al.

### 2.1.2 Vergleich der Aufnahmeverfahren

Aus einer Veröffentlichung der De Montfort University aus Leicester, Großbritannien, geht hervor, dass die Methode mit abgeschaltetem weißen Rauschen zu viele Probleme mit sich bringen kann, als das diese für den Gebrauch geeignet sei. Insbesondere wird hier deutlich gemacht, dass es sich bei weißem Rauschen um ein stochastisches Signal handelt. Dadurch werden insbesondere Phasenbetrachtungen erschwert [Picinali (2006), Kap. 3.2].

Eine Untersuchung aus dem Jahre 2002 ergab, dass die Nutzung des Farina-Sweeps die beste Möglichkeit sei um eine Raumimpulsantwort zu generieren, sofern im Raum keine nennenswerten Störgeräusche vorliegen [Stan u. a. (2002), Kap. 5]. Verglichen wurden in der Abhandlung die MLS-Methode, IRS-Methode, Stretched-Pulse-Methode

und die Farina-Sweep-Methode. Um analytisch zu verifizieren welche Methode die bestmögliche sei, wurde mit dem Signal-Rausch-Verhältnis argumentiert (signal-to-noise-ratio - SNR) [Stan u. a. (2002), Kap. 4.2].

Tabelle 2.3: Optimaler Signal-Rausch-Abstand jeder Methode in dB

| Methode  | MLS  | IRS  | Streched-Pulse | Sinus-Sweep |
|----------|------|------|----------------|-------------|
| SNR/[dB] | 60.5 | 63.2 | 77.0           | 80.1        |

Man sieht, dass die Methode nach Farina den bestmöglichen SNR ermöglicht. Allerdings wird ein anderes Problem in der Abhandlung aufgezeigt. Die Methode mit dem Sweep bedarf im Vergleich eines höheren Schalldruckpegels am Empfänger (Mikrophon). Dies wird in der folgenden Tabelle deutlich [Stan u. a. (2002), Kap. 4].

Tabelle 2.4: Optimaler Schalldruckpegel am Mikrophon jeder Methode in dB

| Methode     | MLS  | IRS  | Streched-Pulse | Sinus-Sweep |
|-------------|------|------|----------------|-------------|
| $L_p$ /[dB] | 75.5 | 75.5 | 83.9           | 92.5        |

Auf der anderen Seite können mit einem Sinus-Sweep und der Faltung des Eingangs- und Ausgangsignals lineare Verzerrungen vermieden werden. Da die Messumgebung im Idealfall ruhig ist, empfiehlt sich die Verwendung der Farina-Sweep-Methode, um so Verzerrungen zu vermeiden. Mit diesem Signal wird im Laufe der Abhandlung weitergearbeitet.

## 2.2 Binaurale Raumimpulsantworten

Um räumlichen Klang aufzunehmen gibt es verschiedene Möglichkeiten. So wurde das Aufnahmeverfahren Ambisonics entwickelt [Power u. a. (2013)]. Um das Signal hier an das menschliche Gehör anzupassen, bedarf es der Außenohrübertragungsfunktion des menschlichen Gehörgangs (HRTF) [Vennerød (2014)]. Abhilfe schafft eine Aufnahme mittels eines Kunstkopfes. Dabei handelt es sich um ein hochgradig richtungsabhängiges Mikrophon-Array. Durch die Nachbildung eines menschlichen Kopfes und dem dazugehörigen Rumpf können Raumeindrücke sehr genau aufgezeichnet werden [Møller u. a. (1995)]. Wie oben gezeigt, lassen sich mittels Raumimpulsantworten Reaktionen eines Systems synthetisieren. Selbiges gilt für binaural aufgezeichnete Raumimpulsantworten (BRIR). Diese werden genauso generiert, jedoch wird hier bei der Aufnahme ein Kunstkopf genutzt. Zeichnet man BRIR an verschiedenen Stellen im Raum auf, so kann ein kompletter Raum akustisch simuliert werden [Böhm (2015)].

## 2.3 Die spektrale Ebenheit (SFM)

Wenn in einem Signal eine Frequenz innerhalb eines Frequenzbandes mindestens 5 dB lauter ist, so nennt man dies ein tonales Ereignis [ANSI S12.9-2005/Part 4, Kap. Annex C]. Um analytisch zu zeigen, dass vorrangig eine einzelne Frequenz besonders präsent ist, bedient man sich der Messung der spektralen Ebenheit. Diese ist definiert als:

$$SFM(num\_band) = \frac{(\prod_{k \in num\_band} a(k))^{\frac{1}{K}}}{\frac{1}{K} \sum_{k \in num\_band} a(k)} \quad (2.10)$$

Dabei sei  $a(k)$  die Amplitude des Frequenzbandes und  $K$  die Anzahl der Frequenzbänder [Peeters (2004), Kap. 9.1].

Es handelt sich also um das Verhältnis des geometrischen Mittelwertes zu dem arithmetischen Mittelwert der Amplituden der Frequenzbänder [Johnston (1988), Kap. 4.3].

Bildet man über den zeitlichen Verlauf eines Signals die spektrale Ebenheit ab, so kann diese Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je kleiner der Wert, desto präsenter ist eine einzelne Frequenz - das Signal ist ein tonales Ereignis.

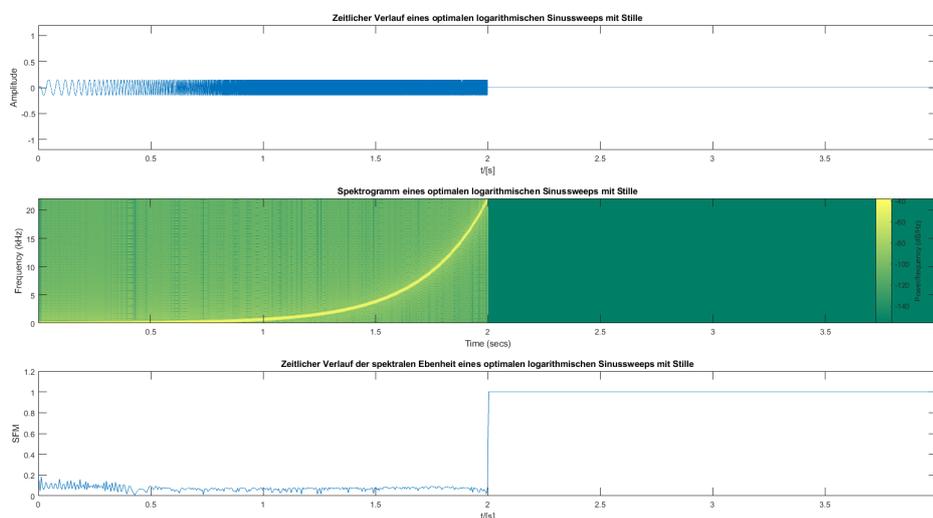


Abbildung 2.4: Ermittlung der SFM via Spektrogramm

Man sieht, im Vergleich zur Stille am Ende des Signals, nimmt der Sweep bei der Messung der spektralen Ebenheit einen signifikant kleineren Wert an. Diese Information wird später noch benötigt.



### 3 Vorüberlegung

#### 3.1 Bestehendes Skript

Diese Arbeit wurde auf einem MatLab-Skript der TU Ilmenau aufgebaut, welches eine Raumimpulsantwort mittels eines logarithmischen Sinus-Sweep und playrec ermittelt. Diese Funktion für MatLab kann sowohl binaurale Aufnahmen verarbeiten als auch herkömmliche Aufnahmen, mit einem Messmikrophon. Ziel soll es sein, innerhalb dieses Skriptes einige Funktionen einzuführen, welche die Aufnahmen der Sweeps überprüfen und gegebenenfalls Warnungen ausgeben, wenn das System nicht mehr ordnungsgemäß arbeitet.

Zunächst wird das System initialisiert. Die verwendete Soundkarte wird festgelegt, die Kanäle für die Aus- und Eingangssignale werden bestimmt und die Abtastrate wird abgefragt. Zudem wird ein Speicherplatz für die Raumimpulsantwort und für die Aufnahmen bestimmt. Im Anschluss wird die Art der Raumimpulsantwort festgelegt. Dabei kann zwischen der Aufnahme einer binauralen Impulsantwort (BRIR) und einer Impulsantwort mittels Kopfhörer ausgewählt werden (HPIR). Letzteres soll jedoch nicht Bestandteil der Betrachtung sein. In Abhängigkeit zu der festgelegten Art werden die Antworten aufgezeichnet und abgespeichert. Dies ist im folgenden Diagramm zusammengefasst:

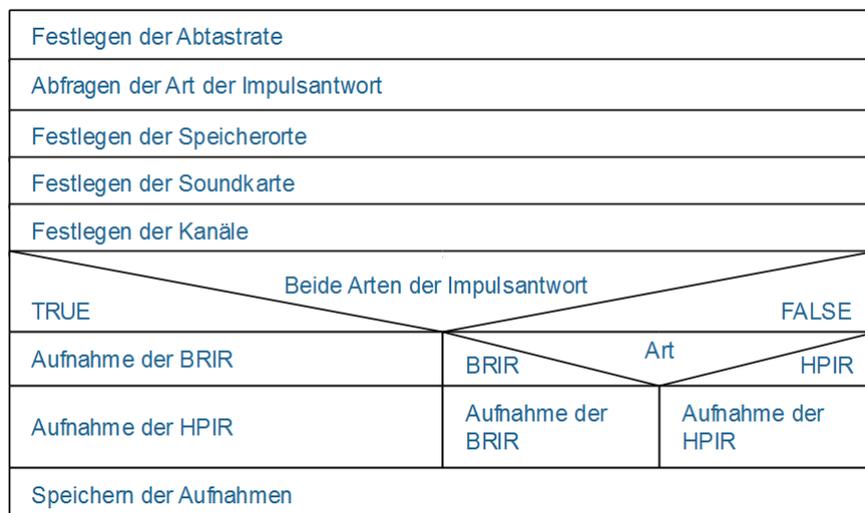


Abbildung 3.1: Nassi-Shneiderman-Diagramm zur Messumgebung

Die Erstellung der Impulsantwort erfolgt mit einem eigenen Skript. Zunächst wird ein logarithmischer Sinus-Sweep angelegt. Das System wird mit playrec initialisiert. Der Sweep wird mehrmals ausgespielt und aufgezeichnet und im Anschluss werden die Aufnahmen gemittelt. Dies erhöht den SNR [Tagare (2000), Kap. 9.1]. Mittels der Formel 2.1

wird dann aus der Mittelung der Aufnahmen eine Impulsantwort erstellt. Im Anschluss wird die Gleichspannung der Aufnahme mit einem Butterworth-Filter entfernt. Ein mögliches Verfahren wird in der Abhandlung [Murphy und Robertson (1994)] beschrieben. Als letztes wird die Funktion playrec beendet.

|  |
|--|
| Logarithmischen Sweep anlegen  |
| playrec initialisieren   |
| Mehrmaliges Aufnehmen der Sweeps   |
| Mittelung der Aufnahmen der Sweeps   |
| Ermittlung der Impulsantwort mittels Rücktransformation                      |
| Gleichspannungsoffset der Impulsantwort entfernen mittels Butterworth-Filter |
| playrec schließen  |

Abbildung 3.2: Nassi-Shneiderman-Diagramm zur Aufnahmefunktion

## 3.2 Fehleranalyse

Zunächst wurden bestimmte Fehlerarten in Klassen zusammengefasst. Dies ermöglicht zum einen die Abstimmung der zu programmierenden Funktionen in Hinblick auf diese Fehler, zum anderen dient es im späteren Verlauf dieser Arbeit der gezielten Überprüfung. Diese Klassen sollen hier aufgezeigt und erläutert werden. Dabei wurde die Fehlereinschätzung eines Protokolls genutzt. Dort unterteilt man in systematische und zufällige Fehler. Dieser Ansatz lässt sich auch auf dieses Problem übertragen.

### 3.2.1 Systematische Fehler

Systematische Fehler sollen all jene sein, die sich auf alle Aufnahmen auswirken. Näher sollen diese noch einmal in systematische und zufällige Fehler unterteilt werden.

#### Systematisch-systematische Fehler

Hierunter sollen alle Fehler verstanden werden, die sich aus einem Fehler in der Messanordnung ergeben. Ist zum Beispiel ein Interface defekt, oder funktioniert der Kunstkopf nicht richtig, so soll das hierunter erfasst werden.

#### Systematisch-zufällige Fehler

Systematisch-zufällig sollen all die Fehler sein, welche sich durch stationäre Geräusche ergeben. Diese Fehler sind also stochastisch auf allen Aufnahmen verteilt. Als Beispiel

könnte hier das Geräusch eines Lüfter im Messraum genannt werden.

### **Zusammenfassung**

Bei systematischen Fehlern handelt es sich um eine Fehlergruppe, die alle Aufnahmen beeinträchtigt. Insofern erscheint es sinnvoll eine Funktion zu finden, die nicht auf Unterschieden zwischen verschiedenen Aufnahmen basiert.

### **3.2.2 Zufällige Fehler**

Zufällige Fehler sollen all jene sein, die stochastisch auf den Aufnahmen zu finden sind.

#### **Zufällig-systematische Fehler**

Hierunter sind alle Fehler zu verstehen, die sich auf Fehler im Messaufbau zurückführen lassen, jedoch nicht auf allen Aufnahmen zu finden sind. Dies kann ein kurzfristiger Ausfall der Phantomspannung sein, oder ein plötzlicher Pegelabfall während der Aufnahme. Insofern treten diese Fehler zufällig auf, sind jedoch systematischer Natur.

#### **Zufällig-zufällige Fehler**

Dies sollen alle Fehler sein, die sich aus vorübergehenden Geräuschen ergeben. Wird zum Beispiel während des Versuchs eine Tür im Raum geöffnet, so kann dies zu einer veränderten Aufnahme führen. Diese Fehler treten also zufällig auf, sind jedoch nicht durchgehend zu finden.

### **Zusammenfassung**

Es handelt sich hierbei um Fehler, die wahllos in der Messung auftreten können. Deshalb lassen sich diese Fehler durch Vergleiche der Messungen detektieren.

### **3.2.3 Ausblick**

Es scheint sinnvoll zwei Skripte zu erstellen. Dabei sollte das eine Skript alle systematischen Fehler ermitteln, das andere dann alle zufälligen. Ebenso sollte das Skript bei den zufälligen Fehlern Differenzen zwischen Aufnahmen der Sweeps und einer zu bestimmenden Zielfunktion ermitteln. Aus diesen kann man erkennen, wo vorübergehende

Fehler auftreten. Ein möglicher Ansatz könnte hierbei das Spektrogramm der Aufnahme sein. Ausgehend von dieser mathematischen Zerlegung, mittels einer Fast Fourier Transformation (FFT) gegenüber der Zeit, kann eine Zielfunktion gefunden werden.

Auf der anderen Seite ist interessant zu untersuchen, was bei Stille im System passiert. Sollte dort eine ausreichende Abweichung von einem Threshold auftreten, dann könnte man daraus schließen, dass ein Fehler vorliegt. Entweder überschreitet das stationäre Geräusch einen Schwellwert oder durch ein tieffrequentes Störgeräusch, wie zum Beispiel einem nicht ordnungsgemäß angeschlossenen Kabel, kommt mehr Energie in das System. Sollte jedoch gar kein Signal vorliegen, also eine Aufnahme nur aus Nullen bestehen, dann könnte man auch auf einen Fehler im Aufbau des Systemes schließen.

Invers dazu lohnt es sich zu untersuchen, was passiert, wenn das System einen vordefinierten Sinus aufzeichnen soll. Dieser muss bei der Aufnahme dem Ausgangssignal entsprechen. Tritt dies nicht ein, so liegt ebenfalls ein Fehler im System vor.

Im Folgenden soll nun untersucht werden, wie man die Skripte zu erstellen hat.

## 3.3 Ermittlung der Zielfunktion

### 3.3.1 Ansatz

Betrachtet man einen Sinus-Sweep mit Stille am Ende (Array aus Nullen) mit der Messung der spektralen Ebenheit, so ergibt sich folgendes Bild. Der Sweep wurde nach der Formel 2.9 erstellt mit  $\omega_1 = 20\text{Hz}$  und  $\omega_2 = 22000\text{Hz}$  bei einer Samplerate von  $44100\text{Hz}$  über einer Länge  $T = 2\text{s}$ .

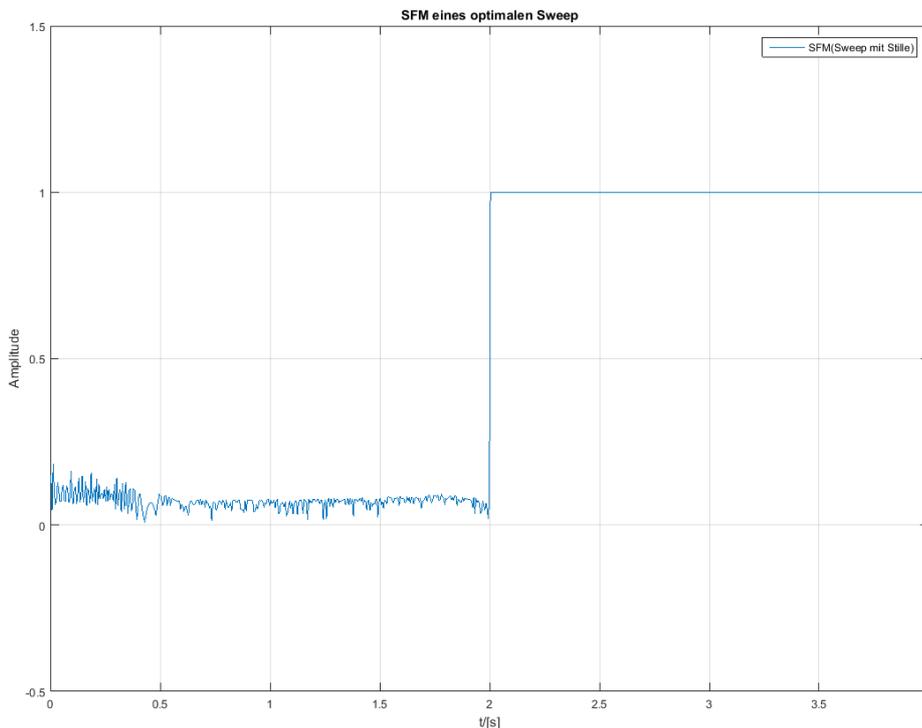


Abbildung 3.3: SFM eines optimalen Sweeps

Die Darstellung ist insofern inkorrekt, als dass es sich um eine ideale Stille handelt. Das bedeutet, dass es ein Array aus Nullen ist. Dies würde eine Lautstärke von  $-\infty$  dBFS oder 0 dB über alle Frequenzen bedeuten. Da MatLab im Spektrogramm mit dB arbeitet, wäre das geometrische Mittel über alle Frequenzen 0 dB, genauso wie das arithmetische Mittel. So würde also eine Berechnung von  $\frac{0}{0}$  erfolgen, welche nicht definiert ist. Deshalb wird sich einer physikalisch zulässigen Überlegung bedient. So gilt, dass das geometrische Mittel gleich dem arithmetischen ist, sofern alle Elemente einer Matrix gleich sind, Vgl. s. [Schmidt (2009), Kap. 2.1]. Da dies hier gegeben ist, kann also davon ausgegangen werden, dass der Bruch in dem Falle den Wert 1 annehmen wird. Für die realen Aufnahmen ist das aber irrelevant, da ein Ausschlag, bedingt durch ein Rauschen, immer vorhanden sein wird.

Es sei die SFM des Sweeps  $SFM(Sweep)$  und die der Stille  $SFM(Stille)$ . Möchte man daraus eine Zielfunktion entwickeln, so müsste diese folgende Eigenschaften besitzen:

1. Streng monoton wachsend
2. Wertebereich:  $SFM(Sweep) < f(x) < SFM(Stille)$
3. Asymptoten
  - $x \rightarrow -\infty : f(x) \rightarrow SFM(Sweep)$
  - $x \rightarrow \infty : f(x) \rightarrow SFM(Stille)$
4. Stetig
5. Keine Sprungstellen, Extrema oder Polstellen

Dazu gibt es eine passende Funktion, die diese Kriterien bedient. Diese wäre der Tangens hyperbolicus ( $\tanh$ ) und besitzt folgende Eigenschaften:

1. Streng monoton wachsend
2. Wertebereich:  $-1 < f(x) < 1$
3. Asymptoten
  - $x \rightarrow -\infty : f(x) \rightarrow -1$
  - $x \rightarrow \infty : f(x) \rightarrow 1$
4. Stetig
5. Keine Sprungstellen, Extrema oder Polstellen

Um aus dem Tangens hyperbolicus nun die Zielfunktion zu ermitteln wurde davon ausgegangen, dass sich die Zielfunktion abgewandelt darstellen lässt. Im Folgenden sei die Zielfunktion  $z(x)$  und die Ausgangsfunktion  $f(x) = \tanh(x)$ .

$$z(x) = b \cdot f(x - m) + n \quad (3.1)$$

$$z(x) = b \cdot \tanh(x - m) + n \quad (3.2)$$

Die Ausgangsfunktion muss entlang der Ordinate verschoben werden. Dies geschieht durch den Parameter  $n$ . Darüber hinaus muss die Zielfunktion entlang der Abszisse verschoben werden, repräsentiert durch  $m$ . Zusätzlich muss die Funktion gestaucht sein. Dies passiert mit  $b$ .

### 3.3.2 Bestimmung der Parameter

Um die Parameter zu bestimmen werden zwei weitere Aufnahmen nötig: die Aufnahme der Stille im Raum und die Aufnahme einer einzelnen Frequenz (Testton), zum Beispiel 1000 Hz. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass sich diese Aufnahmen einfach überprüfen lassen und darüber hinaus stationäre Geräusche erfasst werden können. Gleichzeitig kann auch erfasst werden, ob Fehler im Aufbau vorliegen.

Mittels der Aufnahme der Stille kann ein Mittelwert der  $SFM(Stille)$  ermittelt werden. Dieser sei  $m_s = \overline{SFM_{Stille}}$ . Mittels der Aufnahme des Testtons kann auch dafür ein Mittelwert der  $SFM(Testton)$  ermittelt werden:  $m_t = \overline{SFM_{Testton}}$ .

Da es sich bei einem Sweep um eine Vielzahl von einzelnen zeitlich angeordneten Frequenzen handelt, wird also die SFM der Aufnahme während des Sweeps gegen  $m_t$  gehen, während beim Ausklingen der Wert der SFM gegen  $m_s$  laufen wird. Dies sollen also die Grenzen, Asymptoten, der Zielfunktion sein.

Um die folgenden Schritte zu visualisieren wurde ein Array aus Nullen über die doppelte Sweeplänge generiert. Danach wird die erste Hälfte des Arrays mit einem Sweep nach Formel 2.9 ersetzt.

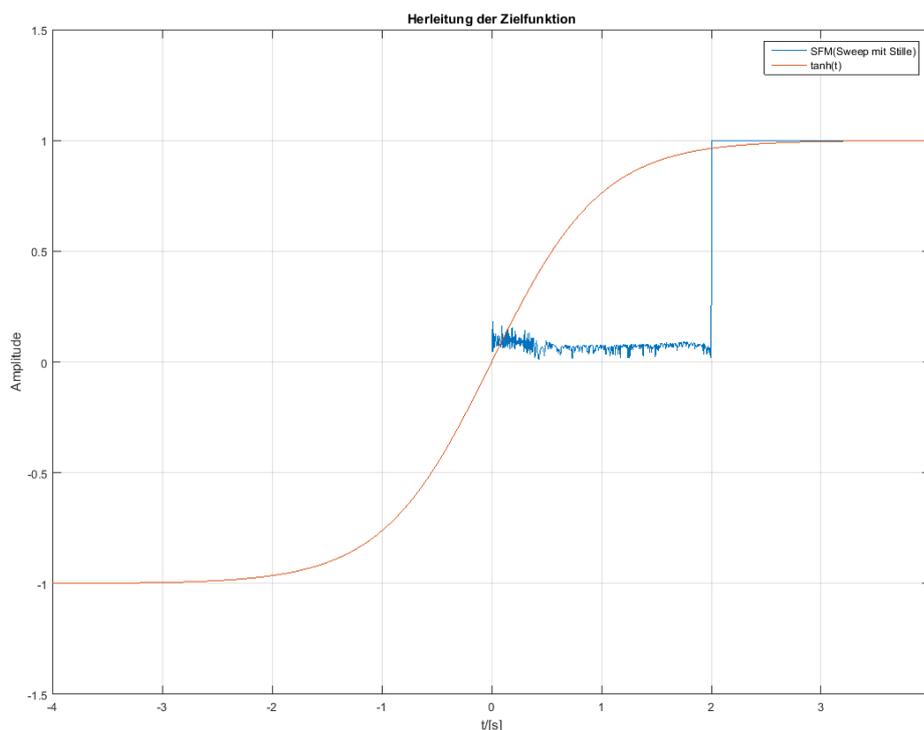


Abbildung 3.4: Ausgangsfunktion und SFM des Sweeps mit Stille

Hierbei wurde dieselbe Änderung der SFM vorgenommen, wie bereits oben gezeigt.

### Der Parameter $b$

Um die Funktion zu stauchen wird sich folgender Überlegung bedient. Die Differenz der oberen und der unteren Asymptote von  $f(x)$  ist  $2$  ( $1 - (-1) = 2$ ). Deshalb muss es einen Parameter  $b$  geben, für den gilt:

$$b \cdot (\max(f(x)) - \min(f(x))) = \max(z(x)) - \min(z(x)) \quad (3.3)$$

$$\Rightarrow b = \frac{\max(z(x)) - \min(z(x))}{\max(f(x)) - \min(f(x))} \quad (3.4)$$

$$\Rightarrow b = \frac{\max(z(x)) - \min(z(x))}{2} \quad (3.5)$$

$$\Rightarrow b = \frac{m_s - m_t}{2} \quad (3.6)$$

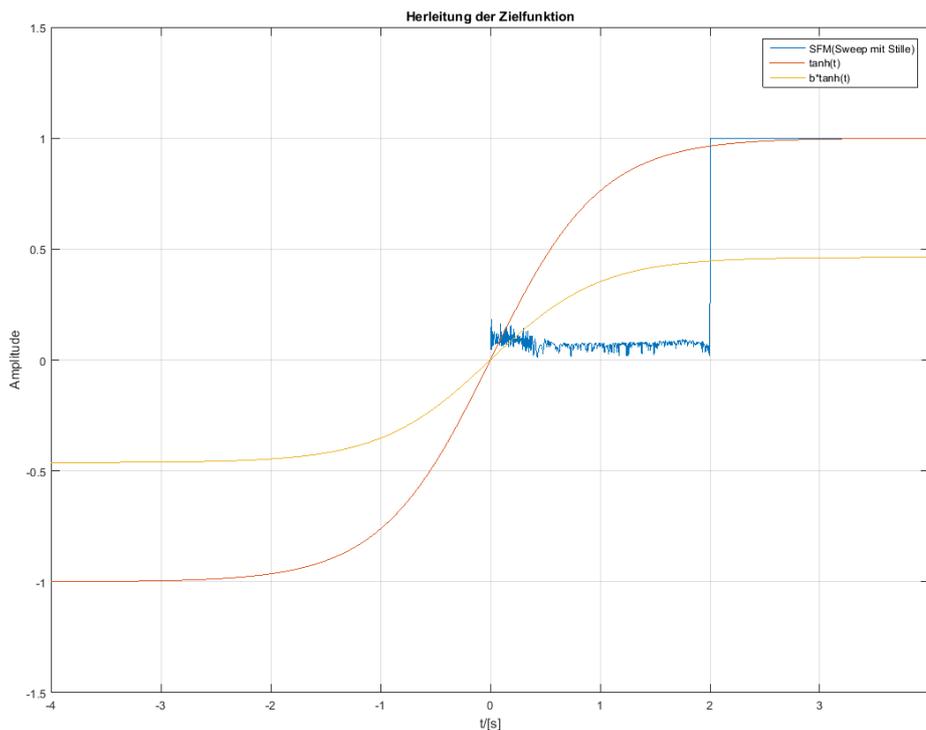


Abbildung 3.5: Ausgangsfunktion mit Faktor  $b$  und SFM des Sweeps mit Stille

### Der Parameter $n$

Der Schnittpunkt der Ausgangsfunktion mit der Abszisse ist gleichzeitig der Wendepunkt. Der Wendepunkt der Zielfunktion soll in der Mitte der Asymptoten liegen, dem Mittelwert. Um also die Ausgangsfunktion entlang der Ordinate zu verschieben, damit

der y-Wert gleich dem Mittelwert ist, muss  $f(x)$  mit dem Wert von  $n$  addiert werden. Dabei sei  $n$  der Mittelwert der Asymptoten der Zielfunktion:

$$n = \frac{\max(z(x)) + \min(z(x))}{2} = \frac{m_t + m_s}{2} \quad (3.7)$$

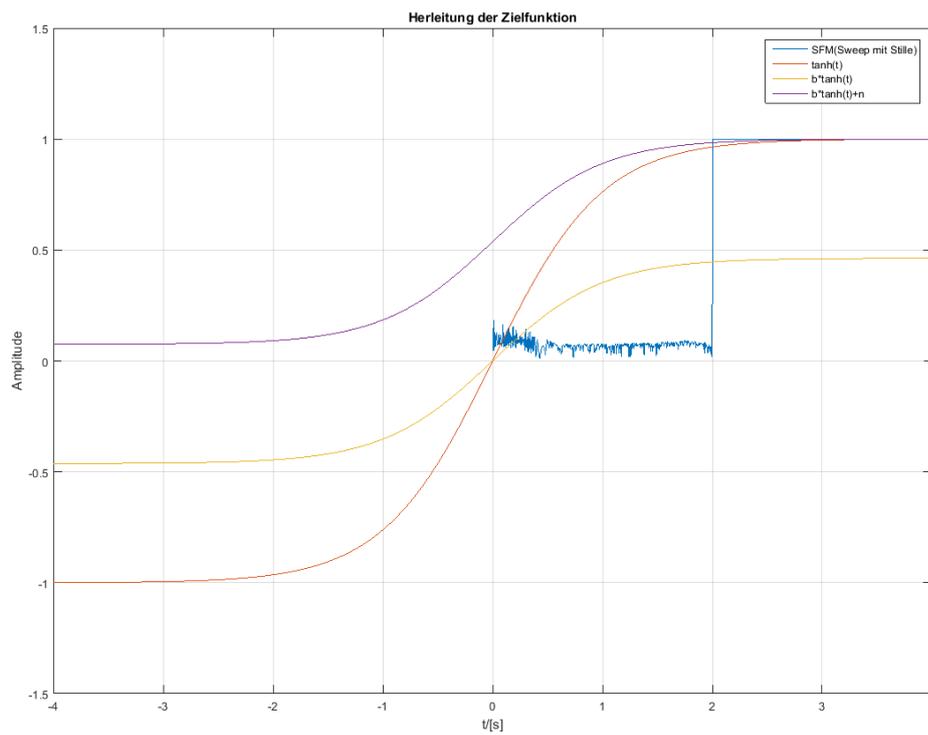


Abbildung 3.6: Ausgangsfunktion mit Faktor  $b$  und  $n$  und SFM des Sweeps mit Stille

### Der Parameter $m$

Da im Moment stets über die doppelte Zeit des Sweeps gemessen wird, entsteht ein Anstieg der SFM nach der Hälfte der Aufnahmezeit. Der Sweep endet und somit auch die tonalen Ereignisse der Aufnahme. Dies hat einen Anstieg zur Folge. Also muss  $m$  die Hälfte der Anzahl der Samples der Aufnahme sein.

$$m = \frac{\text{length}(\text{Sweep})}{2} \quad (3.8)$$

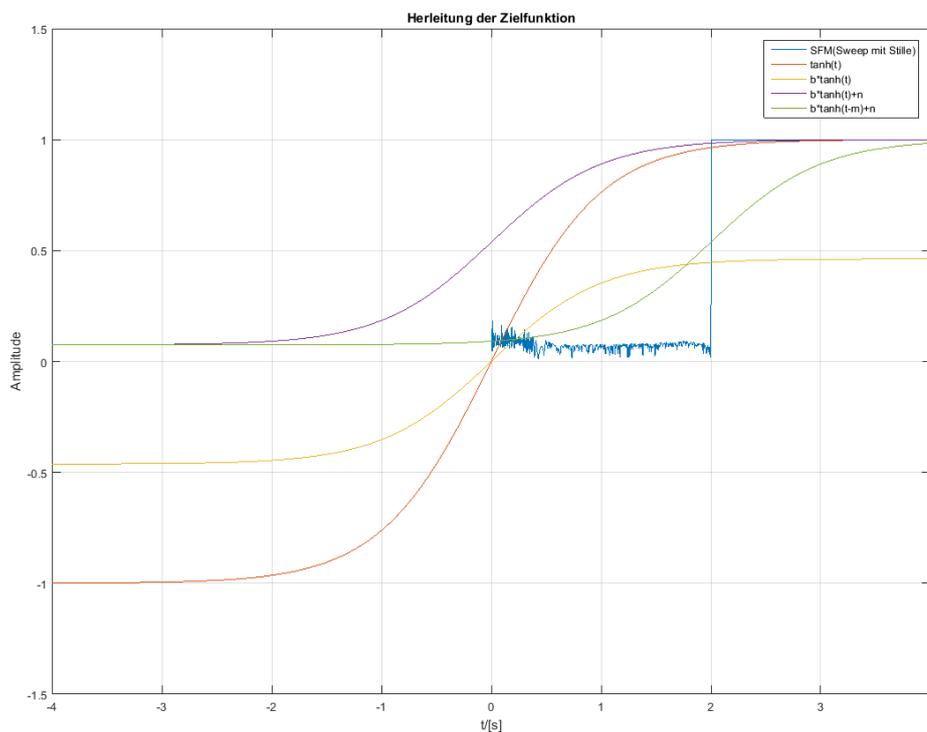


Abbildung 3.7: Ausgangsfunktion mit Faktor  $b$ ,  $n$  und  $m$  und SFM des Sweeps mit Stille

Es fällt auf, dass die derzeitige Zielfunktion nicht mit der Vorgabe übereinstimmt. Dies liegt daran, dass die Funktion mit Zeitvariablen gebildet wurde. Diese verhältnismäßig kleinen Werte sorgen dafür, dass der  $\tanh$  einen gemäßigten Anstieg hat. Da man jedoch die Asymptoten in der Zielfunktion erreichen möchte, erscheint es sinnvoll die Funktion mittels der Anzahl der Samples zu generieren. Dadurch werden die  $x$ -Werte größer und die Funktion nähert sich eher ihren Asymptoten an.

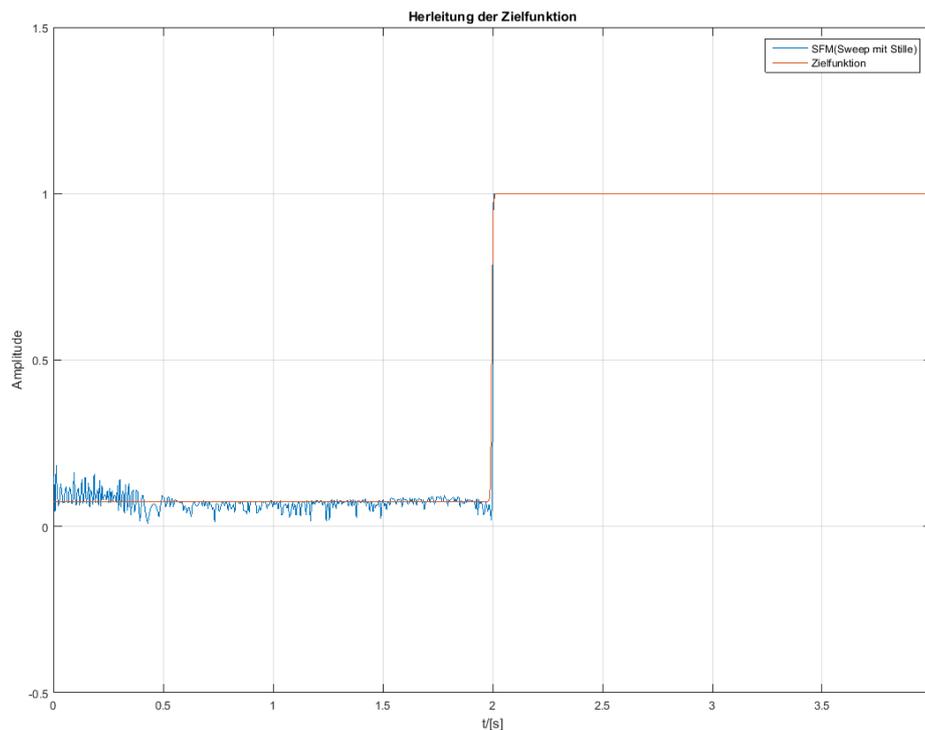


Abbildung 3.8: Ausgangsfunktion mit Faktor  $b$ ,  $n$  und  $m$  mit Anzahl der Samples generiert und SFM des Sweeps mit Stille

**Zusammenfassung**

Mit den gefundenen Parameter kann man nun folgende Zielfunktion aufstellen:

$$z(x) = b \cdot \tanh(x - m) + n$$

$$\Rightarrow z(x) = \frac{m_s - m_t}{2} \cdot \tanh\left(x - \frac{\text{length}(\text{Sweep})}{2}\right) + \frac{m_t + m_s}{2} \quad (3.9)$$

## 4 Umsetzung in MatLab

### 4.1 Bestandteile

Der Aufbau der Funktion zur Überprüfung der Aufnahmen ist dem Nassi-Shneiderman-Diagramm 4.2 zu entnehmen. Es werden zunächst Signale ausgespielt und aufgezeichnet um diese im Anschluss mit eigenen Funktionen zu überprüfen. Zusätzlich werden die Aufnahmen gefiltert, um Fehler durch einen Offset zu verhindern. Dieser Unterschied ist in Abbildung 4.1 zu sehen.

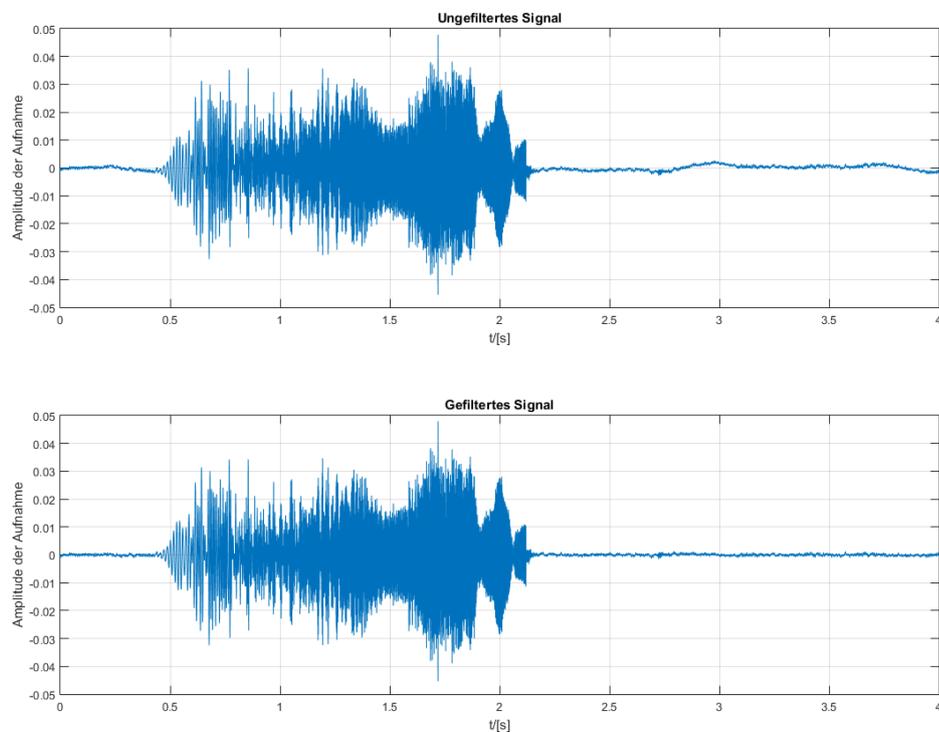


Abbildung 4.1: Vergleich des ungefilterten Signales mit dem gefilterten Signal

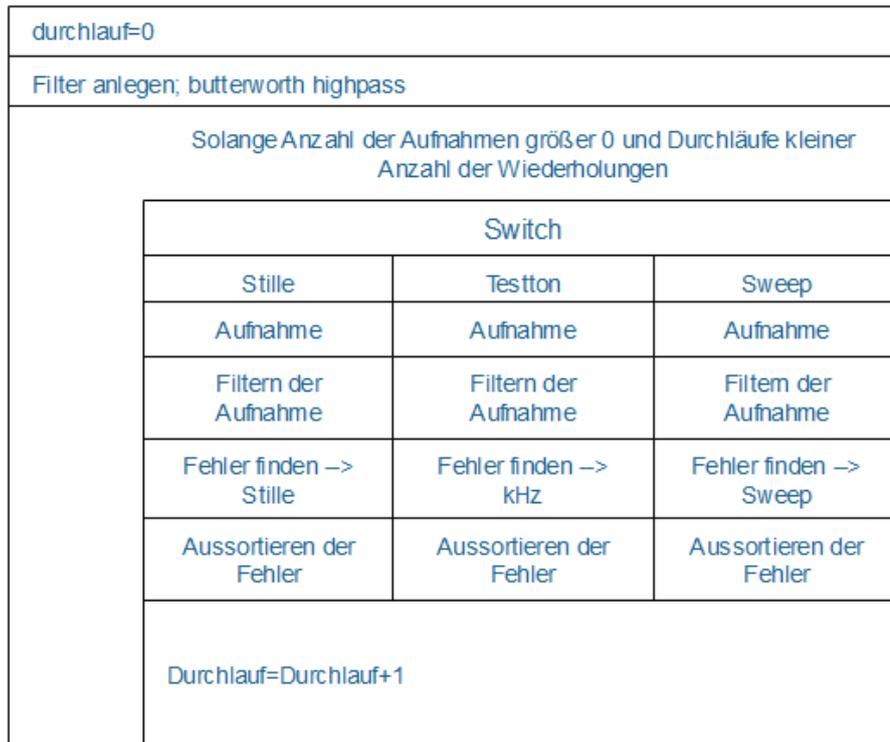


Abbildung 4.2: Aufbau der Umgebung der Überprüfungsroutine

Der Parameter *Wiederholungen* soll verhindern, dass die Funktion in eine Endlosschleife übergeht, wenn nicht die gewünschte Anzahl an Aufnahmen erreicht wird.

## 4.2 Überprüfung des Testtons

Für jeden Kanal jeder Aufnahme des Testtons wird ein Spektrogramm angelegt. Dabei wird ein Hamming-Fenster der Länge von 256 Samples verwendet, bei einem Overlap von 32 Samples sowie 2048 Punkten der DFT. Die Samplerate wird durch Übergabe an die Funktion definiert. So erhält man bei geringer Rechenzeit eine hinreichende Auflösung. Aus diesem Spektrogramm kann nun für jeden Zeitabschnitt die Frequenz mit der höchsten Lautstärke ermittelt werden. Am Ende werden die Frequenzen gemittelt. Liegt die Frequenz innerhalb einer Abweichung so ist die Aufnahme fehlerfrei. Diese Routine ist im Nassi-Shneiderman-Diagramm 4.3 dargestellt.

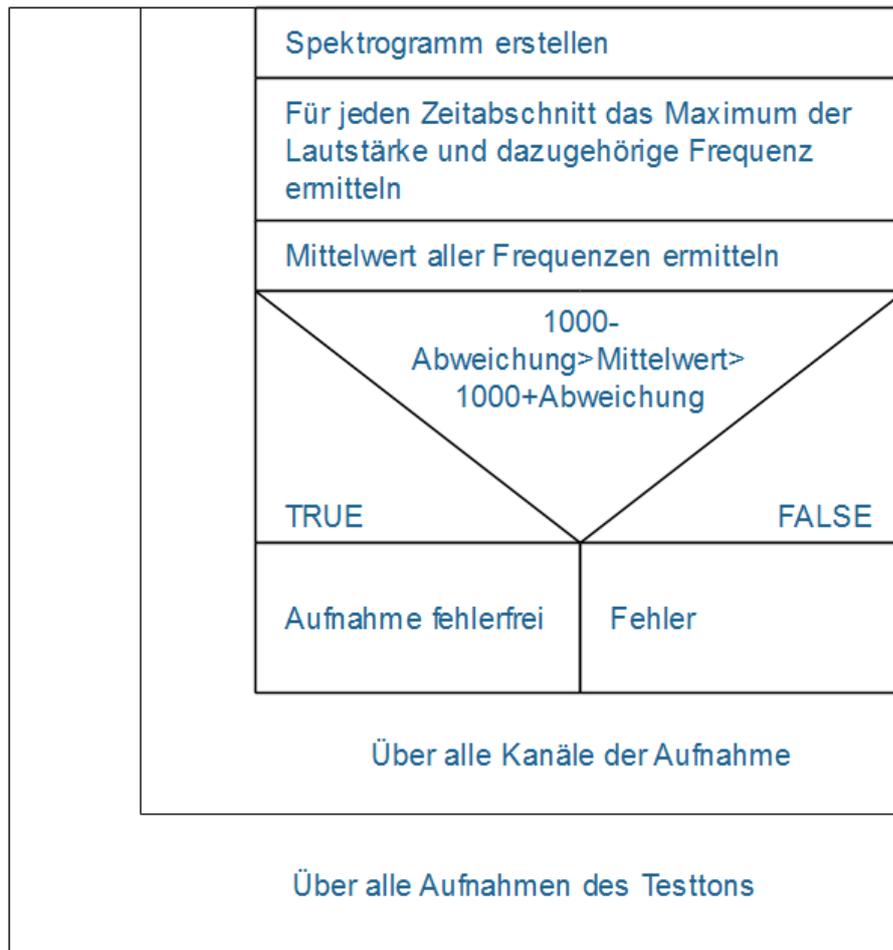


Abbildung 4.3: Überprüfung des Testtons

### 4.3 Überprüfung der Stille

Wie bei der Routine zur Überprüfung des Testtons wird zunächst ein Spektrogramm erstellt. Im Diagramm 4.4 passiert dies mit der Funktion `flat_time`. Daraus wird eine SFM über die Zeit gebildet, die mittels linearer Regression nachgebildet wird. Dadurch erhält man einen Parameter des Anstiegs der Funktion. Dieser muss sehr klein sein und gegen 0 laufen. Ist der Wert kleiner als ein Threshold, so ist die Aufnahme fehlerfrei.

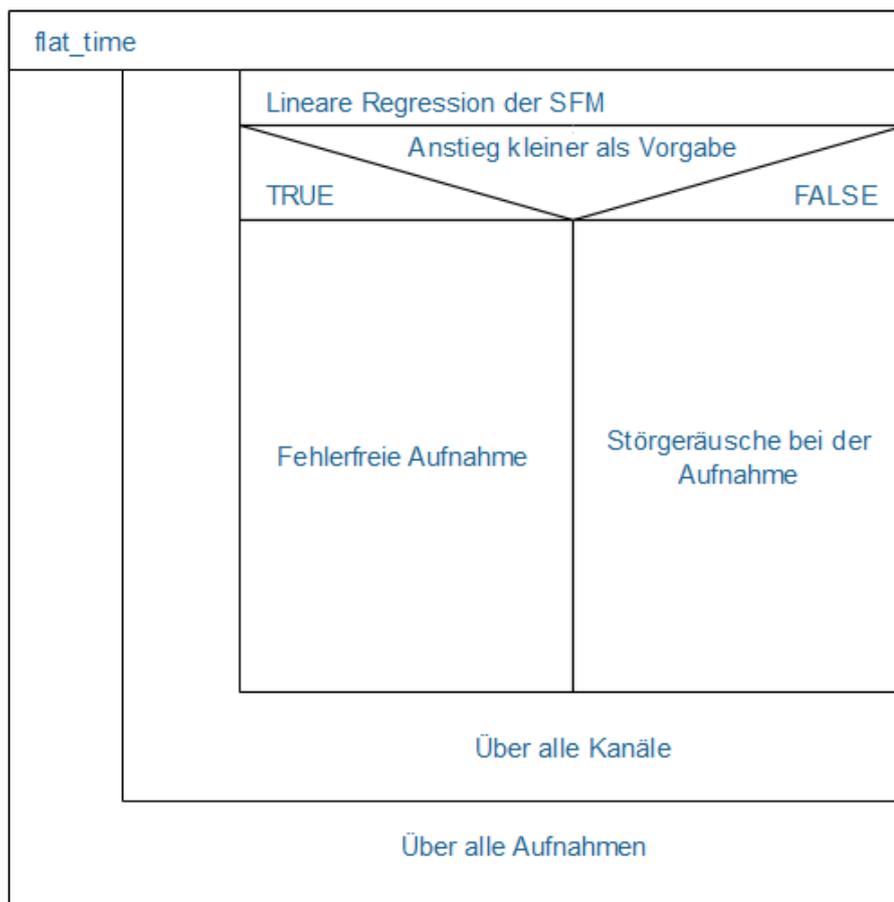


Abbildung 4.4: Nassi-Shneiderman-Diagramm der Funktion, die Aufnahmen der Stille überprüft

Zudem kann über einen zusätzlichen Threshold im Spektrogramm erfasst werden, ob ein stationäres Geräusch vorliegt. Dies passiert in der Funktion `flat_time`. Dabei wird für jeden Zeitabschnitt des Spektrogramms die lauteste Frequenz ermittelt, die über einer vordefinierten Frequenz liegt. So soll gewährleistet werden, dass nicht das Eigenrauschen des Systems detektiert wird. Sind alle Frequenzen gleich, also ist die Varianz gering, so handelt es sich um ein stationäres Geräusch.

## 4.4 Überprüfung des Sweeps

Nun liegen bereits zwei fehlerfreie Signale vor. Die Aufnahme eines Testtons und die Aufnahme der Stille im Raum. Aus diesen beiden werden die Parameter  $m_t$  und  $m_s$  generiert.

Im Gegensatz zu der Theorie, in der eine Aufnahme immer mit einem Sweep beginnt, startet eine Aufnahme gewöhnlich mit Aufnahmen der Stille des Raumes. Dies lässt sich mit einer Latenz im Messsystem erklären. Diese kann durch die Programmoberfläche MatLab entstehen, da ein Buffer angelegt werden muss. Zusätzlich können Glieder in der Messkette Laufzeiten aufweisen und der Schall benötigt auch Zeit um von den

Sendern zum Empfänger zu gelangen. Also muss dies auch in der Zielfunktion berücksichtigt werden.

Deshalb wird ein weiterer Parameter eingeführt,  $k$ . Die SFM des aufgezeichneten Sweeps wird erstellt und schrittweise abgeglichen, ob die Differenz zu  $m_s$  kleiner ist, als zu  $m_t$ . Ist die Differenz gleich, so beginnt dort der Sweep in der Aufnahme, dies entspricht  $k$ .

Der Parameter  $m$  aus Kapitel 3.3.2 bleibt bestehen. Die Bildung der Formel muss nun lauten:

$$z(x) = \begin{cases} -b \cdot \tanh(x - k) + n & \text{wenn } x < 2 \cdot k \\ b \cdot \tanh(x - m) + n & \text{wenn } x \geq 2 \cdot k \end{cases}$$

Nun wird die SFM der Aufnahme mit der Zielfunktion abgeglichen. Der Mittelwert der Differenz wird als Parameter für jeden Kanal jeder Aufnahme abgespeichert. Die geringste Abweichung ist theoretisch charakteristisch für die Aufnahme, die keine Fehler enthält. Nun muss ein Parameter für die Toleranz der Abweichung ermittelt werden.



## 5 Auswertung

### 5.1 Überprüfung der Routine

Um die Routine zu überprüfen, wurden verschiedene Aufnahmen angefertigt. Dabei wurden über zwei Lautsprecher zwei verschiedene Signale wiedergegeben. Auf dem einem Kanal war das fehlerfreie Signal, welches aufgezeichnet und überprüft werden sollte. Auf dem anderen Kanal war ein Störgeräusch. Dies hatte den Vorteil, dass man das Störsignal unterschiedlich laut ausspielen konnte, ohne das eigentliche Signal (Sweep) zu verändern. Darauf aufbauend wurden verschiedene Signale genutzt um die Routine zu testen.

### 5.2 Messaufbau

Es wurden also nun verschiedene Aufnahmen angefertigt, jeweils mit einem logarithmischen Sinus-Sweep mit der Lautstärke des Scheitelwertes von -16 dBFS und einem Störgeräusch mit variabler Lautstärke. Begonnen wurde mit einem Scheitelwert von -40 dBFS und dieser schrittweise um 3 dBFS bis -31 dBFS erhöht. Im Anschluss daran wurde ab -30 dBFS der Scheitelwert um 1 dBFS erhöht, um bei zunehmender Lautstärke eine bessere Auflösung zu erhalten. Dies ist in diesem Plot graphisch dargestellt:

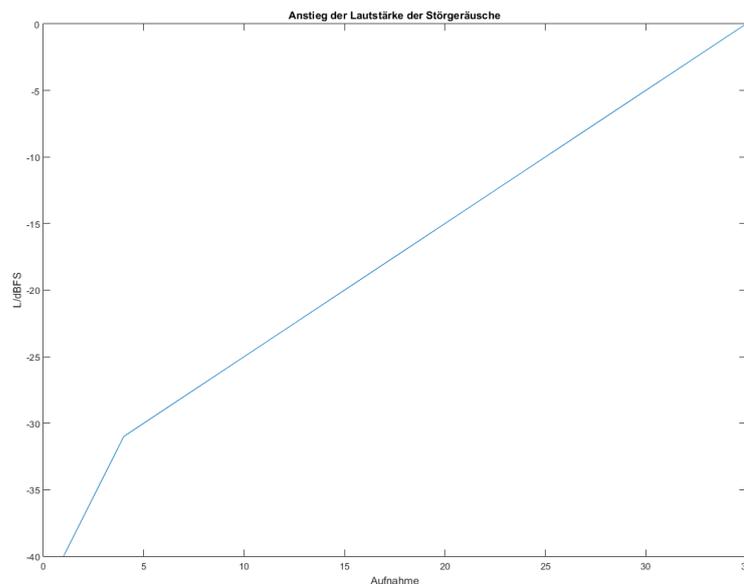


Abbildung 5.1: Anstieg der Lautstärke der Störgeräusche

Es wurde also zuerst ein Sweep der definierten Lautstärke angelegt, danach eine Schleife begonnen, welche Störgeräusche in den Lautstärken anlegt und aufzeichnet. Dies soll hier in dem Nassi-Shneiderman-Diagramm dargestellt sein.



Abbildung 5.2: Nassi-Shneiderman-Diagramm zur Messroutine

Nach 35 Aufnahmen, wurden die fehlerbehafteten Aufnahmen zusammen mit 20 fehlerfreien Aufnahmen von der geschriebenen Routine ausgewertet. So soll gewährleistet werden, dass zum einen Aufnahmen ohne Fehler erkannt wurden und auch untersucht werden, ob möglicherweise auch Fehler fälschlicherweise als fehlerfreie Aufnahmen erkannt wurden.

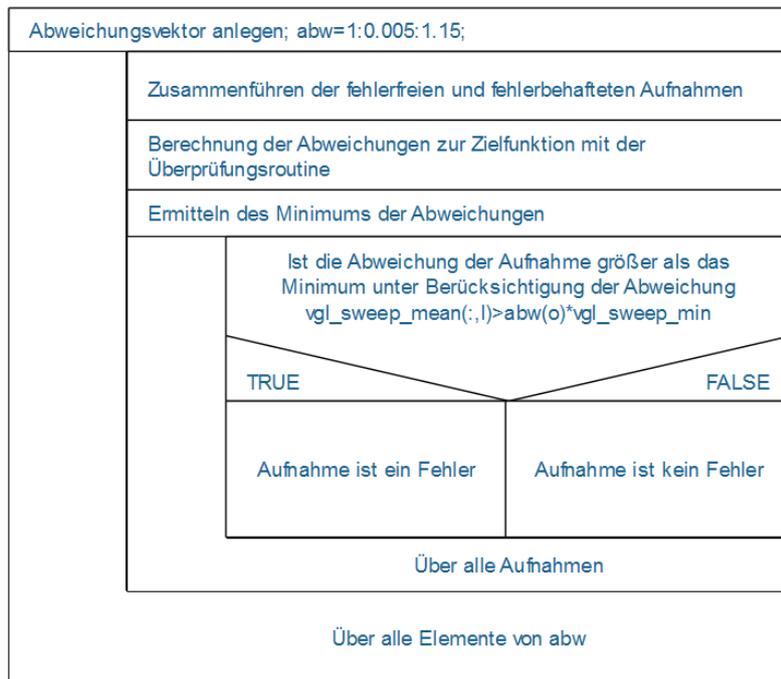


Abbildung 5.3: Nassi-Shneiderman-Diagramm der Auswertung und Überprüfung der Messroutine

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Messungen dargestellt werden.

### 5.3 ROC-Analyse

Um zu überprüfen, wie zuverlässig die Funktion bei der Erkennung von Fehlern funktioniert, wird sich der Receiver-Operating-Characteristics-Kurve (ROC) bedient. Dieses Modell findet Anwendung in der Signal-Detection-Theorie [Swets u. a. (2000)]. Übertragen auf die vorliegenden Messdaten ergeben sich vier Fälle:

1. Signal beinhaltet Fehler und wurde auch als solcher erkannt - richtig positiv;  $TP$
2. Signal beinhaltet Fehler und wurde nicht als solcher erkannt - falsch positiv;  $FP$
3. Signal beinhaltet keine Fehler und wurde als Fehler erkannt - falsch negativ;  $FN$
4. Signal beinhaltet keine Fehler und wurde als kein Fehler erkannt - richtig negativ;  $TN$

Aus diesen Überlegungen lassen sich zwei Werte für jede Messung bilden:

1. True-Positive-Rate

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5.1)$$

2. False-Positive-Rate

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (5.2)$$

Trägt man die  $TPR$  gegen die  $FPR$  auf, so erhält man einen ROC-Graphen. Ist dabei die  $TPR$  größer als die  $FPR$ , so spricht das für die zu untersuchende Routine, da im Verhältnis mehr Fehler als solche identifiziert wurden [Fawcett (2006)].

Ein weiteres Maß ist der Youden-Index ( $J$ ), benannt nach W. J. Youden [Youden (1950)]. Dieser gibt an, wie gut sich die Gruppen der fehlerfreien Aufnahmen und der fehlerbehafteten voneinander unterscheiden lassen und nimmt Werte zwischen -1 und 1 an [Moosbrugger und Kelava (2012), Kap. 8]. Er ist wie folgt definiert:

$$J = \frac{TP}{TP + FN} + \frac{TN}{TN + FP} - 1 \quad (5.3)$$

## 5.4 Erkannte systematisch-systematische Fehler

Um zu überprüfen, ob Fehler dieser Gruppe erkannt werden, wurde ein Signal in Mat-Lab erstellt. Dabei handelte es sich um eine dreidimensionale Matrix, die aus Nullen bestand. Dies soll repräsentieren, dass kein Signal aufgezeichnet wird, weil zum Beispiel kein Interface angeschlossen ist. Dabei wurden auch 35 nicht vorhandene Aufnahmen mit 20 realen fehlerfreien Aufnahmen verglichen:

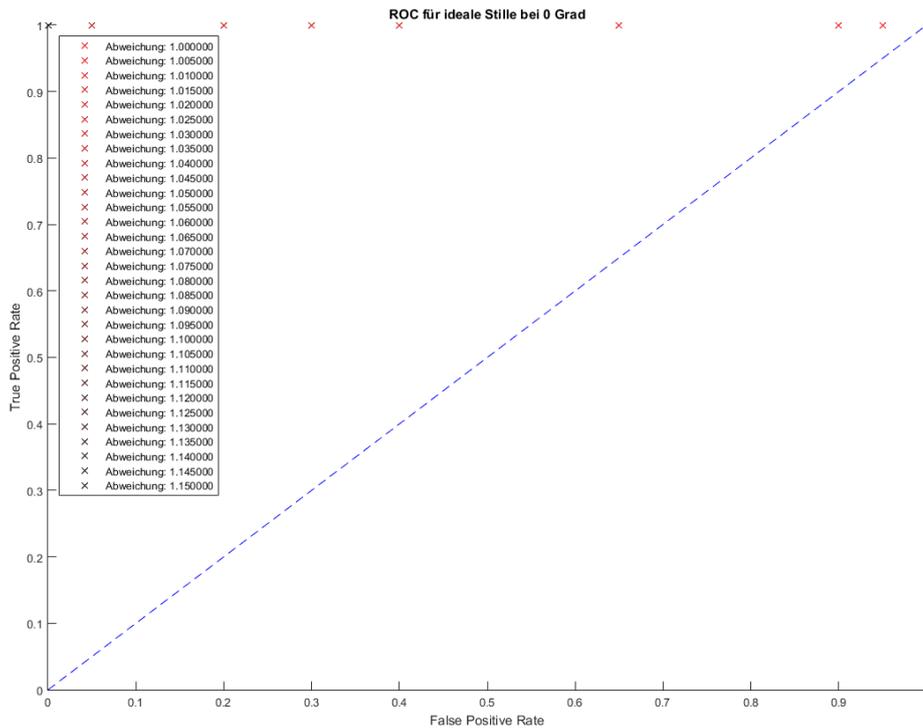


Abbildung 5.4: Fehlererkennung der systematisch-systematischen Fehler 0 Grad Drehung

Bei einer Abweichung von 1,045 werden alle Fehler als Fehler erkannt und alle störfreien Aufnahmen auch als solche eingeschätzt. Dies zeigt sich auch durch den Youden-Index. Dieser liegt dann bei 1.

## 5.5 Erkannte systematisch-zufällige Fehler

Um die Erkennung von systematisch-zufälligen Fehlern auszuwerten, wurden zwei verschiedene Arten von Signalen als Störgeräusche genutzt. Ein Testton, mit unterschiedlicher Frequenz, und gefiltertes weißes Rauschen, mit konstanter relativer Bandbreite und unterschiedlicher Mittenfrequenz. Beide wurden normalisiert. Deren Scheitelwerte wurden an die oben genannten Werte angepasst.

Im Folgenden soll beispielhaft immer nur eines der Signale betrachtet werden, die anderen sind in der Anlage aufgeführt.

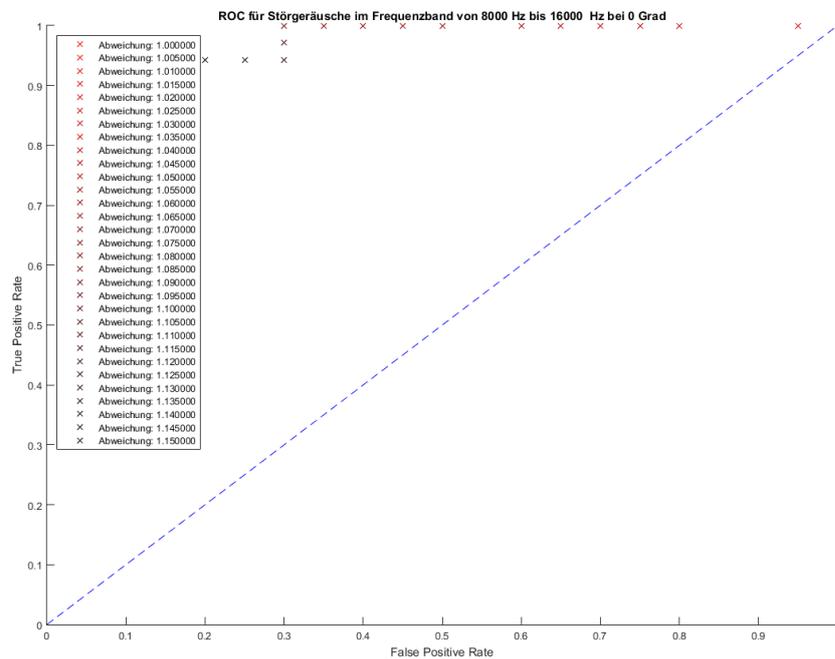


Abbildung 5.5: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung

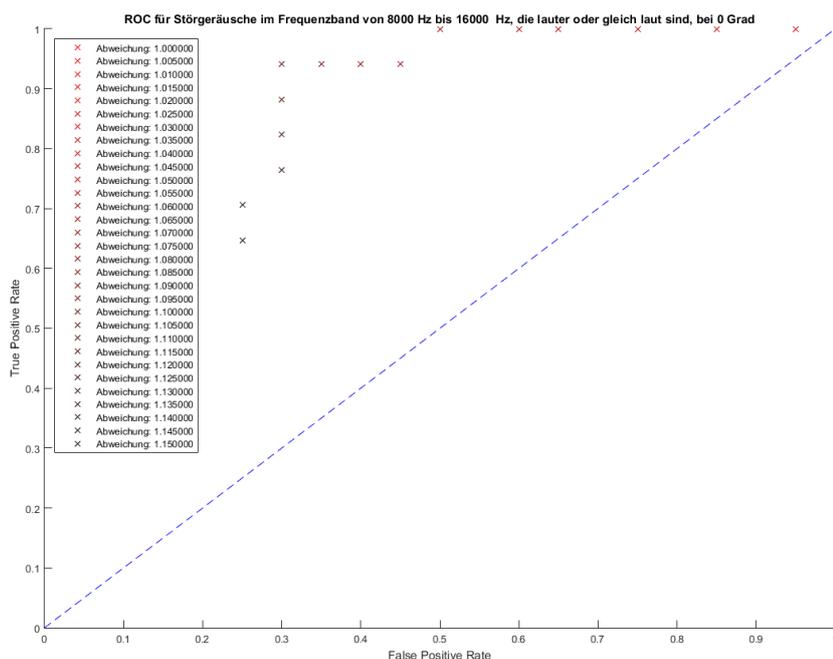


Abbildung 5.6: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung

Bei Betrachtung der gleich lauten und lauterer Störgeräusche verbesserte sich nicht das Maximum des Youden-Index bei der Betrachtung der lauterer beziehungsweise gleich lauten Störgeräusche. Aber der Threshold-Wert der Abweichung wurde kleiner. War er vorher bei 1,145 am größten ( $J = 0,7428571$ ), so lag er nun bei 1,075 ( $J = 0,6411765$ ). Jedoch wurde stets eine hohe TPR erreicht.

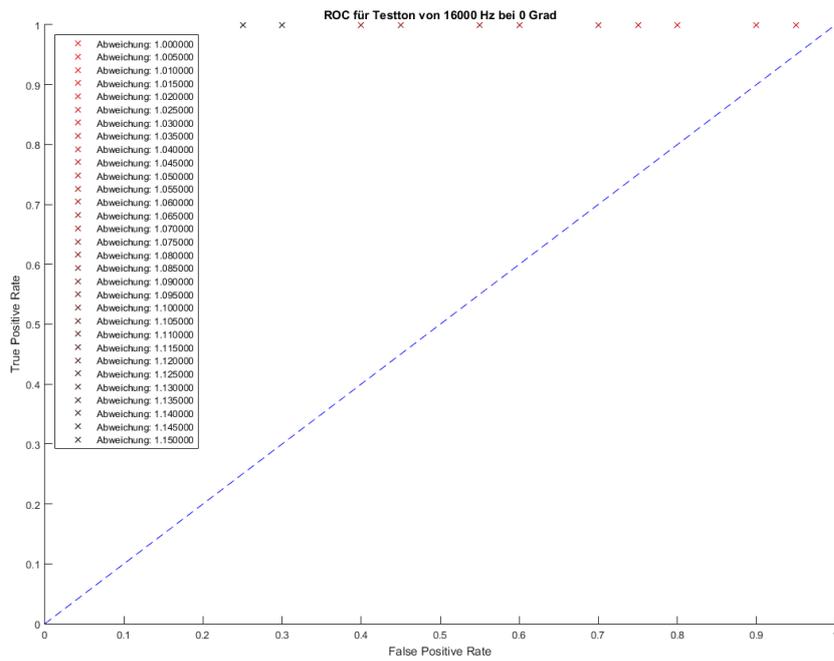


Abbildung 5.7: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad Drehung

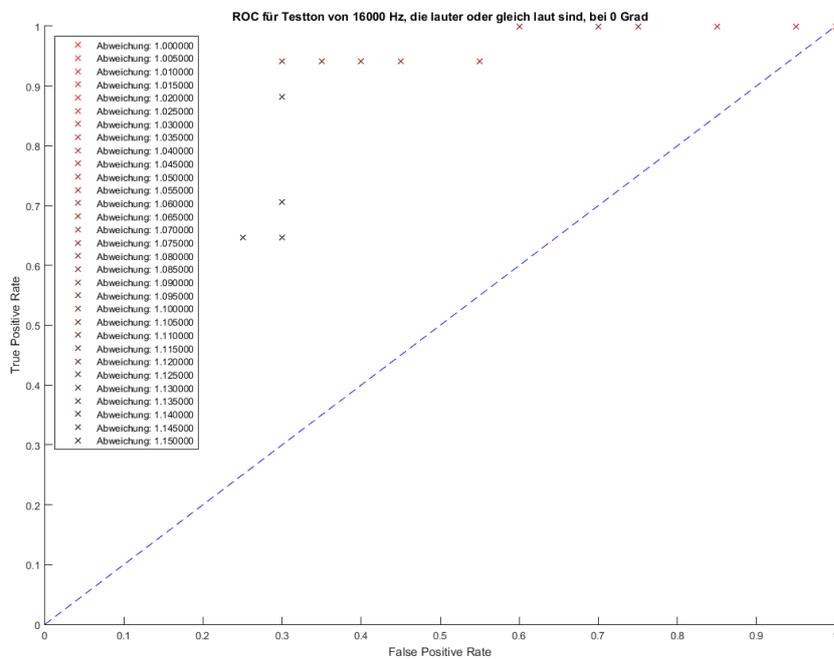


Abbildung 5.8: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung

Auch hier sank das Maximum des Youden-Index bei Minderung des Thresholds. So betrug  $J$  zunächst 0.75 (Abweichung: 1.14) und bei den lauterer Geräuschen 0,6411765 (Abweichung: 1.09).

## 5.6 Erkannte zufällig-systematische Fehler

Um die Erkennung dieser Fehlergruppe zu überprüfen, wurde ein aufgenommener Sweep genommen, und dieser mit MatLab sukzessiv leiser gerechnet (Simulation). Durch Multiplikation mit den oben genannten 35 dBFS-Werten (s. Kap. 5.2) entstand so ein neuer Datensatz aus falschen Aufnahmen.

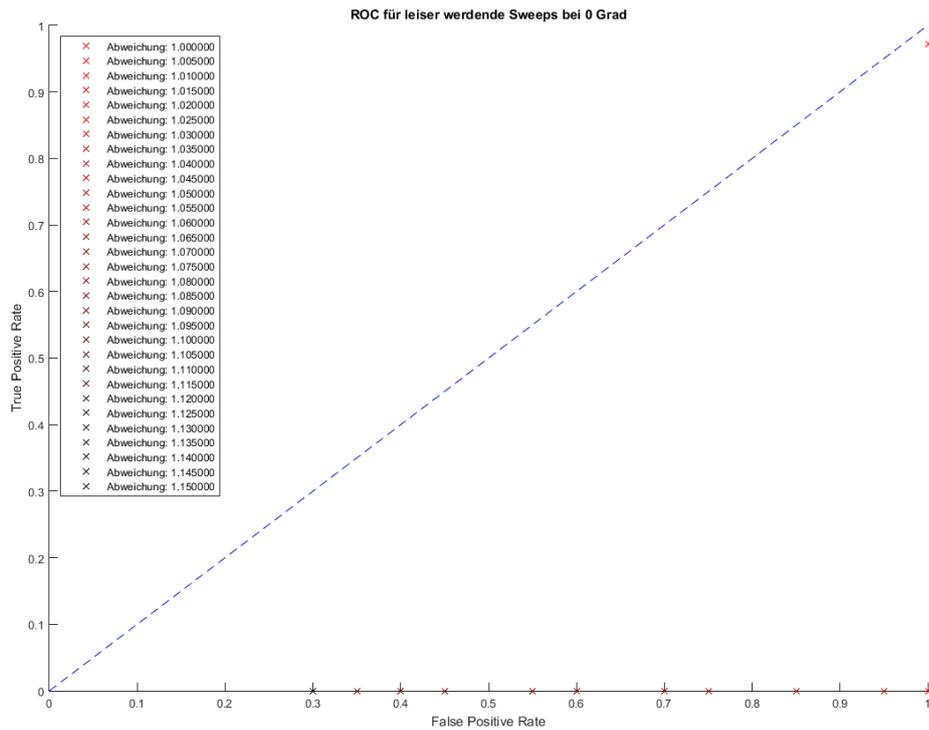


Abbildung 5.9: Fehlererkennung der zufällig-systematischen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad Drehung

Es zeigt sich, dass die Routine diese Aufnahmen nicht als Fehler einstuft. Zusätzlich sieht man dies am Youden-Index, der sein Maximum bei einer Abweichung von 1 mit  $-0,02857143$  erreicht.

## 5.7 Erkannte zufällig-zufällige Fehler

Um die Funktion zu überprüfen wurde als Störgeräusch ein aufgezeichnetes Klatschen genutzt. Dieses Signal lässt sich als Transient klassifizieren. Damit führt es zu einer kurzfristigen Störung im System. Im Vergleich zum oberen Nassi-Shneiderman-Diagramm (5.2), wird also dieses Klatschen als Störsignal betrachtet. Um die Lautstärke zu berücksichtigen wurde das Signal zunächst normalisiert. Dies bedeutet, dass das Signal durch das Maximum des Signals geteilt wurde, sodass der Modalwert des Signals bei der Amplitude 1 liegt oder 0 dBFS. Mittels Multiplikation kann nun das Signal gleichmäßig skaliert werden. Das bedeutet, dass der Anstieg der Lautstärke sich nicht auf den Effektivwert, sondern auf den Scheitelwert des Störgeräusches bezieht.

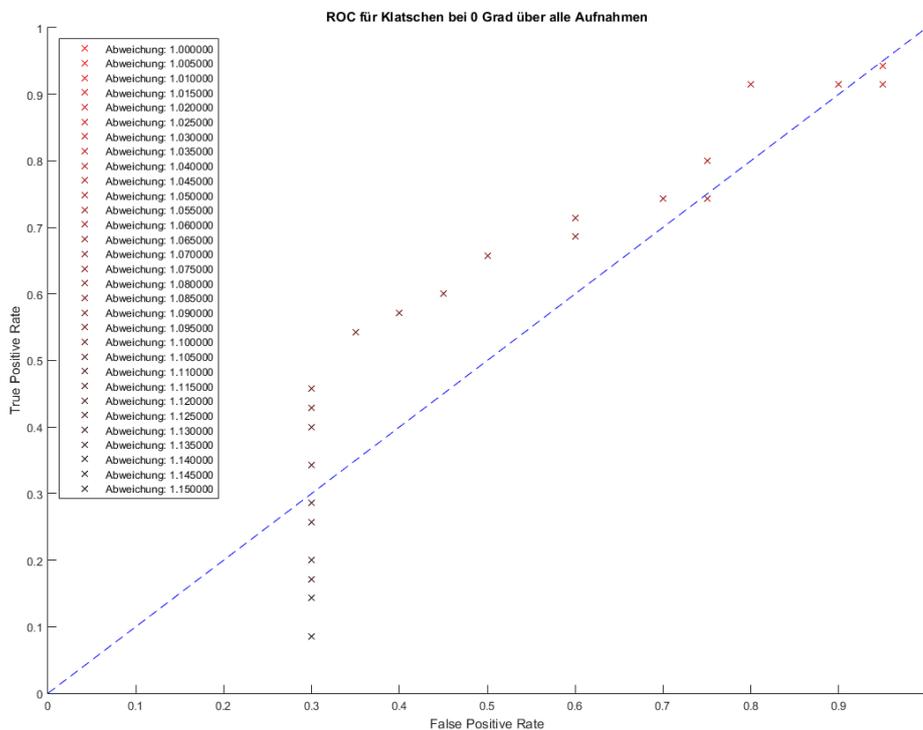


Abbildung 5.10: Fehlererkennung der zufällig-zufälligen Fehler bei 0 Grad Drehung

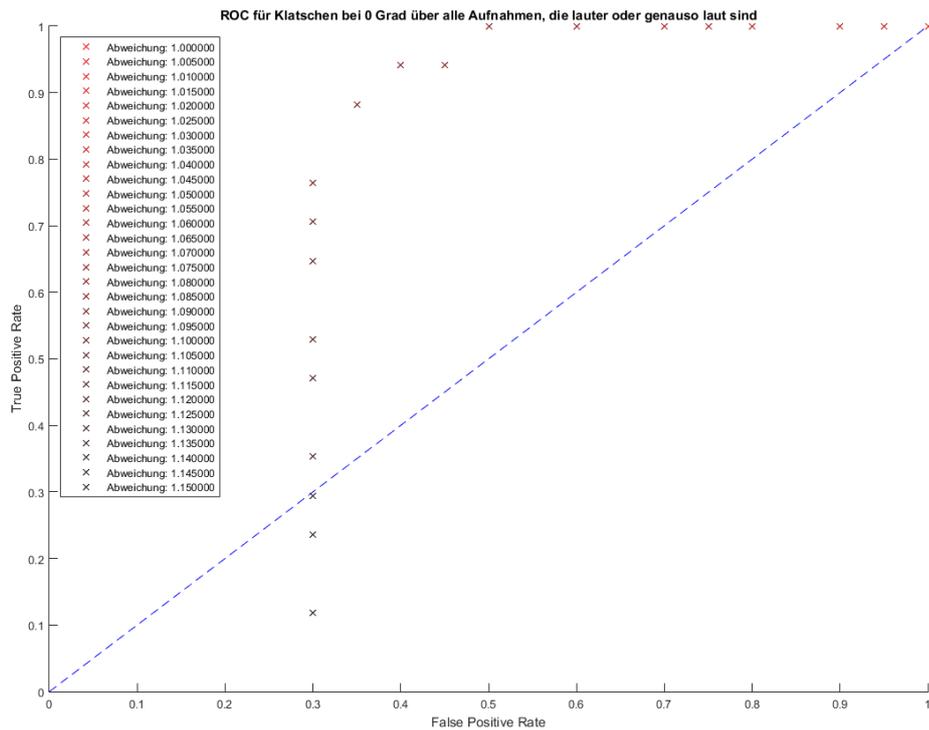


Abbildung 5.11: Fehlererkennung der zufällig-zufälligen Fehler, wenn diese lauter oder gleich laut sind, bei 0 Grad Drehung

Es zeigt sich, dass für den Fall bei 0 Grad Drehung, die Aufnahme, die die geringste Abweichung zur Zielfunktion hat, eine der fehlerhaften sein muss. Also lohnt es sich einen höheren Threshold anzulegen. Dies zeigt sich auch im J-Wert, der bei einer Abweichung von 1,09 den größten Wert von 0,1928571 aufweist.

Diese Werte erhöhen sich, wenn man nur die Störgeräusche betrachtet, die lauter oder genauso laut sind, wie der aufzuzeichnende Sweep. Dabei beträgt der J-Wert 0.5411765, bei einer Abweichung von 1,085.



## 6 Diskussion

### 6.1 Fehlerbetrachtung

Während der Messung entstanden Fehler. Diese kamen über einen Offset zustande, der immer wieder auftauchte und konnten, wie bereits gezeigt, durch Anwendung eines Butterworth-Filters wieder ausgeglichen werden. Somit lagen Aufnahmen vor, die erst bearbeitet werden mussten, dann jedoch der Untersuchung dienlich waren.

Auf der anderen Seite muss auch die Anordnung der Lautsprecher betrachtet werden. Diese waren in einem Dreieck angeordnet. So ist der Direktschall essentiell bei der Betrachtung. Während sich der Schall der Störgeräusche bei realen Messungen meist diffus im Raum ausbreitet, wird dieser hier im Direktfeld gemessen. Dadurch sind die Aufnahmen zur Überprüfung nicht zwingend auf reale Probleme übertragbar. Dennoch bestehen diese Geräusche aus mehreren Frequenzen, woraus sich eine Veränderung der SFM ergeben würde, was wiederum durch die Funktion erfasst werden würde.

Jedoch wären hier weitere Messungen mit Lautsprechern mit einer Kugelschallcharakteristik (Dodekaeder) erforderlich um diese Hypothese vernünftig zu validieren.

### 6.2 Vergleich zu anderen Projekten

Die Untersuchung von Stan et al (Vgl. s. 2.1.2) beschäftigte sich unter anderem auch mit der Frage, wie sich die Messungen von Impulsantworten verändern, sofern Störgeräusche auftreten. Wie bereits vermerkt, wird bei vorhandenen Umgebungsgeräuschen die MLS/IRS-Methode präferiert. Dabei sind Umgebungsgeräusche jedweder Art tolerierbar [Stan u. a. (2002), Kap. 5]. Jedoch bringen diese Methoden andere Probleme mit sich, wie oben gezeigt.

Ein anderes Teilgebiet der Signalerkennung ist die Restauration von Audiosignalen. Diese Untersuchungen beschäftigen sich jedoch meist mit der Wiederherstellung von Signalen aus beschädigten Aufnahmen [Esquef u. a. (2001)]. Darunter kann auch Click-Detection fallen, eine Methode um kurzzeitige Störgeräusche (Impulse) in Aufnahmen zu erkennen und mithilfe von Wahrscheinlichkeitsvorhersagen zu korrigieren [Godsill und Rayner (1992)]. Jedoch besteht hier der Unterschied, dass immer bekannt ist, welche Signale gesucht werden. Somit können diese Untersuchungen nur bedingt auf die anfangs aufgestellten Fehlergruppen bezogen werden. Lediglich für Wackelkontakte im Messaufbau könnte sich hieraus ein zu betrachtender Ansatz ergeben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein anderer Ansatz verfolgt wurde. Während

vorangegangene Untersuchungen stets die zu untersuchenden Fehler definierten, wurde hierbei versucht eine möglichst universelle Funktion der Fehlerfindung zu entwickeln. Dadurch ist ein Vergleich nur bedingt möglich.

### 6.3 Vergleich zu der Zielstellung

Es wurde ein MatLab-Skript erstellt, welches Fehler erkennt. Problematisch ist, dass oftmals auch Fehler fälschlicherweise als fehlerfreie Aufnahmen eingeschätzt wurden. Jedoch wurden oftmals auch Aufnahmen ohne Störungen als solche erkannt, mit Ausnahme der zufällig-systematischen Fehler. Dies lässt sich mit dem verfolgten Ansatz erklären. Während andere Ansätze von einer Veränderung der Lautstärke ausgehen, wird hier versucht mit der spektralen Zusammensetzung des aufgenommenen Signales zu arbeiten. Diese bleibt trotz Abklingen der Lautstärke der Aufnahme dennoch gleich. So ist diese Methode also bei Fehlern zu empfehlen, die zu zusätzlichen Geräuschen in der Messung führen.

Zwingend ist auch notwendig, dass eine Aufnahme des Testtons und der Stille zu erfolgen hat, was eine Verlängerung der Messung bedeutet. Jedoch kann dadurch ermittelt werden, ob das System ordnungsgemäß arbeitet und auch ob stationäre Geräusche vorliegen. So liegt es im Ermessen des Nutzers, inwieweit die Routine Anwendung findet.

Insofern ist zu sagen, dass eine Routine gefunden wurde, die mit leicht zu überprüfenden Messungen eine schwierig zu überprüfende Messung untersuchen kann. Dabei funktioniert sie besser, je lauter das Störgeräusch gegenüber dem zu messenden Geräusch ist. Einzig ein Abfall der Lautstärke der Aufnahmen im System kann nicht hinreichend betrachtet werden.

## 7 Fazit

Im Laufe der Arbeit wurden verschiedene Fehlergruppen klassifiziert um diese durch eine Funktion in MatLab zu erkennen. Dabei wurden die Gruppen systematisch-systematische Fehler (z. B. nicht ordnungsgemäß angeschlossenes Interface) und systematisch-zufällige Fehler (z. B. stationäres Geräusch) aufgestellt, die die Gruppe der systematischen Fehler bildet. Außerdem wurden die Gruppen der zufällig-systematischen Fehler (z. B. Wackelkontakt) und der zufällig-zufälligen Fehler (z. B. Klatschen) aufgestellt, die die Gruppe der zufälligen Fehler bildet.

Die Funktion arbeitet dabei unter Nutzung der Messung der spektralen Ebenheit der Aufnahme (SFM). Gegenüber anderen Methoden, die im Zeitbereich arbeiten stellt dies einen anderen Ansatz dar. Zusätzlich wurde vor Beginn der Messung die Stille im Raum aufgezeichnet, um etwaige vorhandene stationäre Geräusche zu ermitteln, und ein Testton, um die Funktionsweise der Messanordnung zu überprüfen. Diese beiden Aufnahmen lassen sich verhältnismäßig leicht überprüfen, wodurch jedoch die Fehlergruppe der systematischen Fehler erfasst werden können. Mittels einer Zielfunktion, die im Laufe der Abhandlung hergeleitet wurde, können Differenzen zwischen den Messungen und der Zielfunktion hergestellt werden. Dabei werden die Aufnahmen der Stille und des Testtons genutzt.

Mittels der definierten Fehlergruppen konnte eine Überprüfung der Funktion vorgenommen werden. Dabei wurde ein ROC-Kurve und aufbauend darauf der Youden-Index ( $J$ ) genutzt, um so die Zuverlässigkeit der Fehlererkennung abschätzen zu können. Dabei zeigte sich, dass die Routine am besten bei einer Abweichung zwischen 1,045 und 1,10 gegenüber der Aufnahme mit der geringsten Abweichung zu der Zielfunktion, die besten Ergebnisse brachte. So konnten viele Fehler identifiziert werden, mit Ausnahme der zufällig-systematischen.

Insofern besteht noch Optimierungsbedarf bei der Funktion. So könnten noch weitere Argumente wie Lautstärke oder RMS der Aufnahmen berücksichtigt werden. Ein möglicher Ansatz wäre ein Abgleich des Anstiegs der SFM und der Lautstärke. Steigt die Lautstärke bei gleichzeitigem Anstieg der SFM, so bedeutet dies, dass ein zufälliger Fehler vorliegt. Sinkt die Lautstärke bei gleichbleibender SFM, so liegt ein zufällig-zufälliger Fehler, in Form eines Spannungsabfalls, vor. Jedoch bleibt die Überprüfung eines Signals, ohne genaue Vorgaben durch eine Referenzmessung oder ähnliches, ein komplexes Thema.

Abschließend ist zu sagen, dass ein neuer Ansatz zur Detektion von Störungen einer Messung vorgestellt wurde, der grobe Fehler bei der Aufnahme erfasst und besser funktioniert, je präsenter die Störungen sind.



## Literaturverzeichnis

- [ANSI S12.9-2005/Part 4] *Quantities and Procedures for Description and Measurement of Environmental Sound – Part 4: Noise Assessment and Prediction of Long-term Community Response*. 2015. – URL [https://www.leg.state.mn.us/docs/2015/other/150681/PFEISref\\_1/ANSI%202005.pdf](https://www.leg.state.mn.us/docs/2015/other/150681/PFEISref_1/ANSI%202005.pdf)
- [Böhm (2015)] BÖHM, Christoph: *Entwicklung einer Versuchsumgebung zur Auralisation von virtuellen Konzerträumen für Musiker*, Technische Universität Berlin, Diplomarbeit, 2015. – URL [https://www2.ak.tu-berlin.de/~akgroup/ak\\_pub/abschlussarbeiten/2015/BoehmChristoph\\_MasA.pdf](https://www2.ak.tu-berlin.de/~akgroup/ak_pub/abschlussarbeiten/2015/BoehmChristoph_MasA.pdf)
- [Dietze und Frank (2008)] DIETZE, Benjamin ; FRANK, Christoph: *Parametrierung von Raumimpulsantworten*. 2008. – URL [https://iaem.at/kurse/sommer-08/aac2/Dokumentation\\_v2.pdf](https://iaem.at/kurse/sommer-08/aac2/Dokumentation_v2.pdf). – Kunst Universität Graz
- [Esquef u. a. (2001)] ESQUEF, Paulo A. ; VÄLIMÄKI, Vesa ; KARJALAINEN, Matti: *Audio Restoration Using Sound Source Modeling*, 06 2001
- [Farina (2000)] FARINA, Angelo: *Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique*. In: *Audio Engineering Society Convention 108*, URL <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10211>, Feb 2000
- [Farina (2007)] FARINA, Angelo: *Advancements in impulse response measurements by sine sweeps*. (2007), 09
- [Fawcett (2006)] FAWCETT, Tom: *An introduction to ROC analysis*. In: *Pattern Recognition Letters* 27 (2006), jun, Nr. 8, S. 861–874
- [Giese (2009)] GIESE, André: *Ein Optimiertes Messverfahren für Raumimpulsantworten*, Technische Universität Berlin, Diplomarbeit, 2009
- [Girod u. a. (2003)] GIROD, B. ; RABENSTEIN, R. ; STENGER, A.: *Einführung in die Systemtheorie: Signale und Systeme in der Elektrotechnik und Informationstechnik*. Teubner, 2003 (Lehrbuch: Teubner). – URL <https://books.google.de/books?id=33dHPgAACAAJ>. – ISBN 9783519161943
- [Godsill und Rayner (1992)] GODSILL, S.J. ; RAYNER, P.J.W.: *A Bayesian approach to the detection and correction of error bursts in audio signals*. In: *[Proceedings] ICASSP-92: 1992 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, IEEE, 1992

- [Hee (2003)] HEE, Jens: Impulse response measurements using MLS. (2003)
- [Johnston (1988)] JOHNSTON, J.D.: Transform coding of audio signals using perceptual noise criteria. In: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 6 (1988), Nr. 2, S. 314–323
- [Keesman (2011)] KEESMAN, Karel J.: System Response Methods. In: *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*. Springer London, 2011, S. 17–27
- [Lindau und Weinzierl (2006)] LINDAU, Alexander ; WEINZIERL, Stefan: FABIAN - An instrument for software-based measurement of binaural room impulse responses in multiple degrees of freedom, 01 2006
- [Lins u. a. (2016)] LINS, Marcia ; BOMHARDT, Ramona ; FELS, Janina: Individualisierung der HRTF: Ein Ellipsoidmodell zur Anpassung von interauralen Pegeldifferenzen, 03 2016
- [Meng u. a. (2008)] MENG, Q. ; SEN, D. ; WANG, S. ; HAYES, L.: Impulse response measurement with sine sweeps and amplitude modulation schemes. In: *2008 2nd International Conference on Signal Processing and Communication Systems*, IEEE, dec 2008
- [Meyer (2017)] MEYER, Martin: Analoge Signale. In: *Signalverarbeitung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, S. 14–70
- [Murphy und Robertson (1994)] MURPHY, Stephen D.; ROBERTSON, Douglas: Construction of a High-Pass Digital Filter from a Low-Pass Digital Filter. In: *Journal of applied biomechanics* 10 (1994), 11
- [Møller u. a. (1995)] MØLLER, Henrik ; HAMMERSHØI, Dorte ; JENSEN, Clemen B. ; SØRENSEN, Michael F.: Transfer Characteristics of Headphones Measured on Human Ears. In: *J. Audio Eng. Soc* 43 (1995), Nr. 4, S. 203–217. – URL <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=7954>
- [Müller und Massarani (2001)] MÜLLER, Swen ; MASSARANI, Paulo: Transfer-Function Measurement with Sweeps. In: *J. Audio Eng. Soc* 49 (2001), Nr. 6, S. 443–471. – URL <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10189>
- [Moosbrugger und Kelava (2012)] MOOSBRUGGER, Helfried (Hrsg.) ; KELAVA, Augustin (Hrsg.): *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. Springer Berlin Heidelberg, 2012
- [Peeters (2004)] PEETERS, Geoffroy: A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project. (2004), 01

- [Picinali (2006)] PICINALI, Lorenzo: Techniques for the extraction of the impulse response of a linear and time-invariant system., 2006
- [Power u. a. (2013)] POWER, Paul ; DUNN, Chris ; DAVIES, William ; HIRST, Jos: *Localisation of Elevated Sources in Higher-Order Ambisonics*. 01 2013
- [Pörschmann und Wiefling (2015)] PÖRSCHMANN, Christoph ; WIEFLING, Stephan: Dynamische Binauralsynthese auf Basis gemessener einkanaliger Raumimpulsantworten, 03 2015
- [Schmidt (2009)] SCHMIDT, Birgit V.: *Einführung zu Ungleichungen (Skript)*. 2009
- [Stan u. a. (2002)] STAN, Guy-Bart ; EMBRECHTS, Jean J. ; ARCHAMBEAU, Dominique: Comparison of different impulse response measurement techniques. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 50 (2002), 04, S. 249–262
- [Swets u. a. (2000)] SWETS, John A.; DAWES, Robyn M.; MONAHAN, John: Better Decisions Through Science. In: *Scientific American* 283 (2000), 11, S. 82–7
- [Tagare (2000)] TAGARE, Pradeep: Signal Averaging, 2000
- [Torras-Rosell (2009)] TORRAS-ROSELL, Antoni: Methods of Measuring Impulse Responses in Architectural Acoustics. In: *Master's Thesis* (2009), 10
- [Vennerød (2014)] VENNERØD, Jakob: *Binaural Reproduction of Higher Order Ambisonics A Real-Time Implementation and Perceptual Improvements*, Dissertation, 07 2014
- [Youden (1950)] YODEN, W. J.: Index for rating diagnostic tests. In: *Cancer* 3 (1950), Nr. 1, S. 32–35



## Anhang A: Messaufbau

Die Messung wurde an der TU Ilmenau vorgenommen. Dazu wurden zwei Genelec 1029A als Lautsprecher verwendet (Links  $L_1$  und Rechts  $L_2$ ). Diese wurden mittels eines Behringer Interfaces (UMC202HD) bei einer Samplerate von 44100 Hz betrieben und waren über herkömmliche XLR-Kabel mit dem Interface verbunden. Der Kunstkopf, G.R.A.S. - Head and Torso Type 45BA, trug zusätzlich ein Hemd und hatte  $\frac{1}{2}$ " Mikrophone, ebenfalls von G.R.A.S. (Type 40AO), eingesetzt. Dieser stand auf einem Drehteller der Firma Outline. Die Position der Ohren in der Skizze sind  $K_1$  (Links) und  $K_2$  (Rechts). Die Mikrophone wurden über BNC-Kabel abgenommen. Ein Computer mit Windows 10 und MatLab 2017 führte die Messung durch.

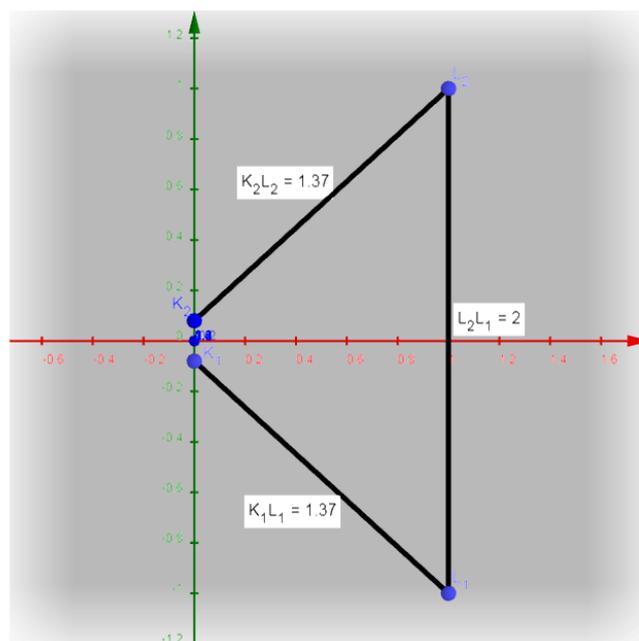


Abbildung A.1: Skizze des Messaufbaus, Draufsicht

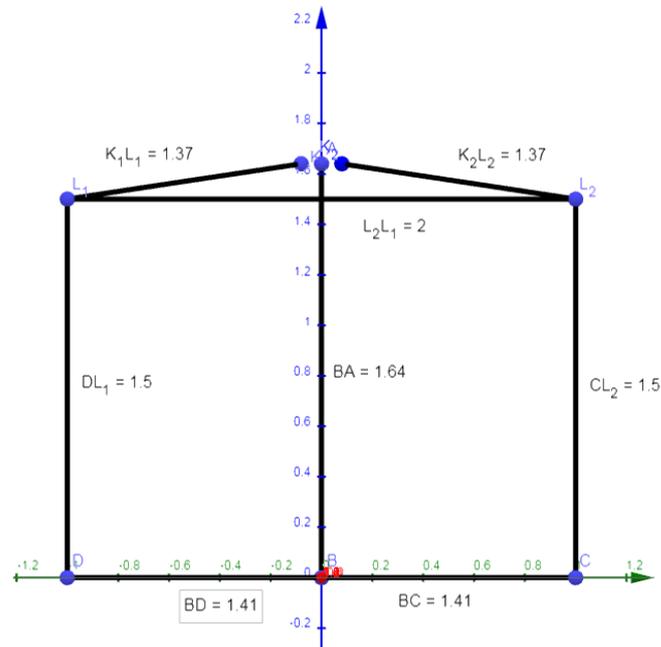


Abbildung A.2: Skizze des Messaufbaus, Frontalansicht; D und C liegen unter den zugehörigen Lautsprechern und B repräsentiert den Ursprung des Systems, A liegt zwischen den Ohren

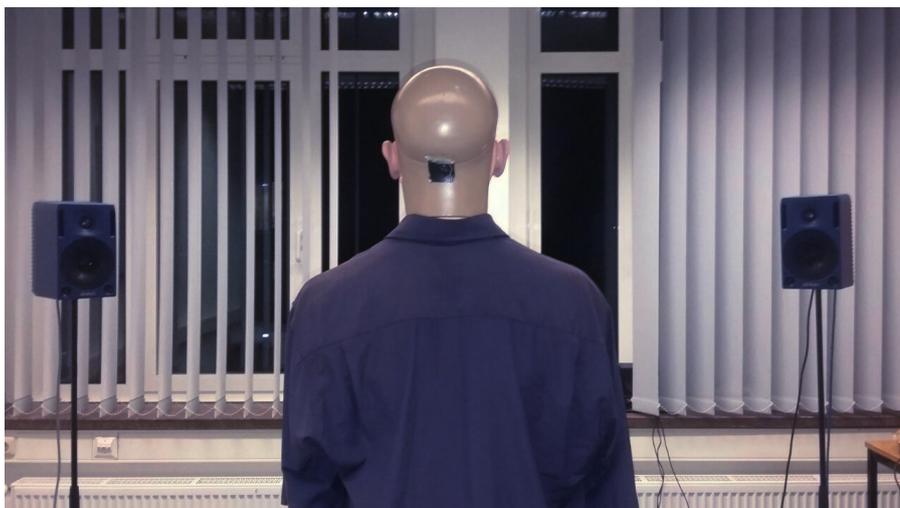


Abbildung A.3: Skizze des Messaufbaus, Kopf auf Drehteller

Tabelle A.1: Messgeräte

| Gerät                         | Hersteller | Typ                       |
|-------------------------------|------------|---------------------------|
| Lautsprecher                  | Genelec    | 1029A                     |
| Interface                     | Behringer  | UMC202HD                  |
| Kunstkopf                     | G.R.A.S.   | Head and Torso Type 45 BA |
| $\frac{1}{2}$ "Messmikrophone | G.R.A.S.   | Type 40AO                 |
| Drehteller                    | Outline    | ET250-3D                  |
| Computer mit MatLab           | Dell       | -                         |



## Anhang B: Messergebnisse

### Gefiltertes weißes Rauschen

#### Alle Störgeräusche

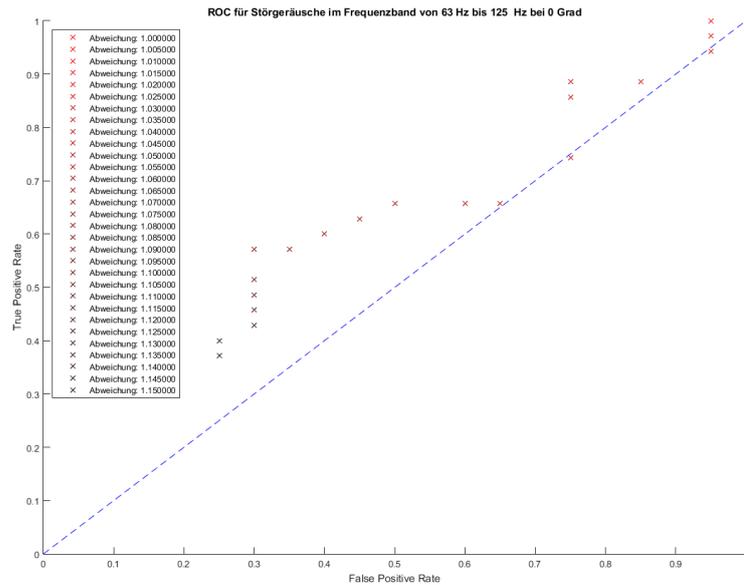


Abbildung B.1: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 63-125 Hz

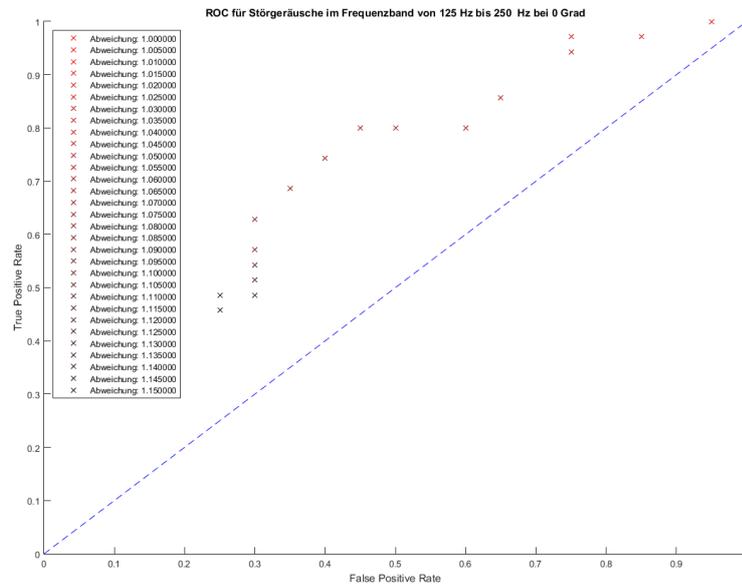


Abbildung B.2: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 125-250 Hz

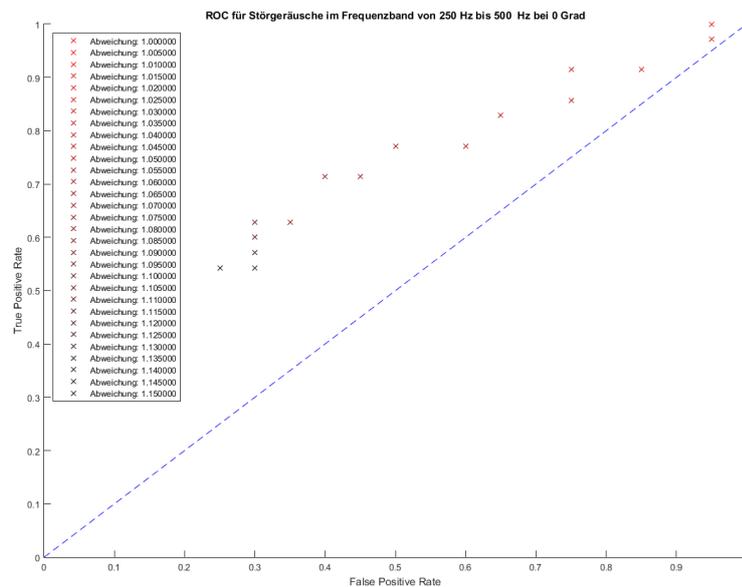


Abbildung B.3: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 250-500 Hz

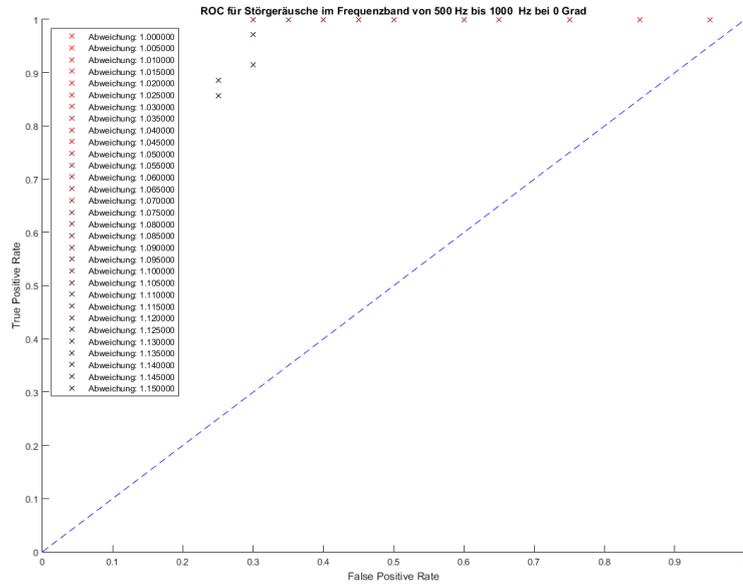


Abbildung B.4: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 500-1000 Hz

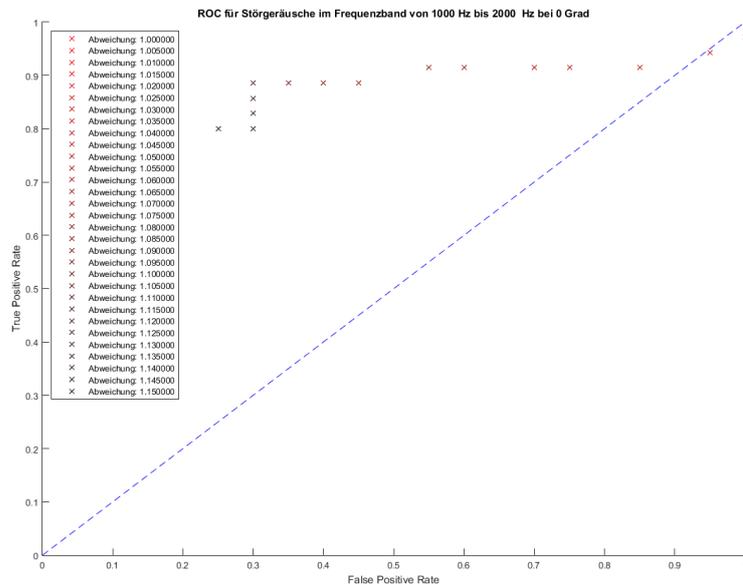


Abbildung B.5: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 1000-2000 Hz

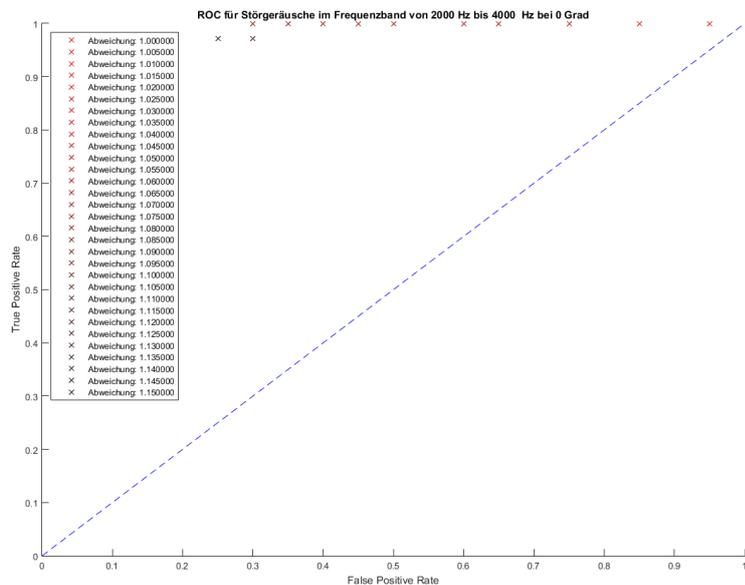


Abbildung B.6: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 2000-4000 Hz

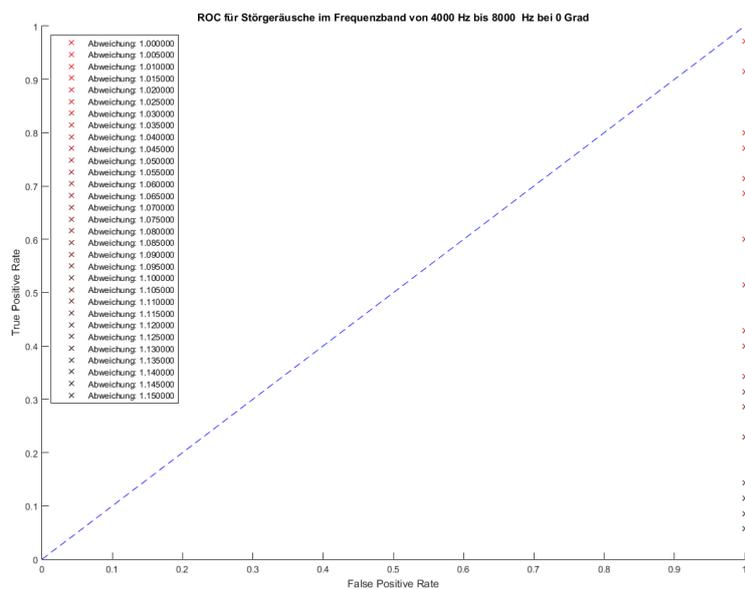


Abbildung B.7: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 4000-8000 Hz

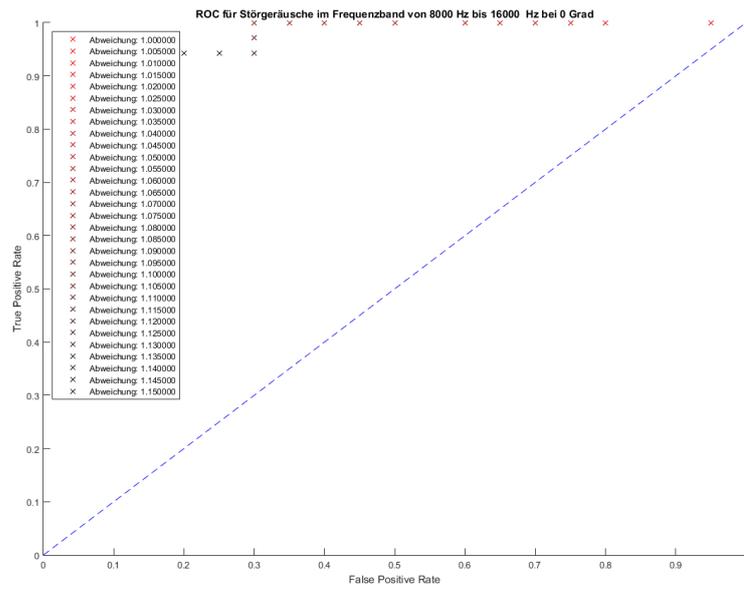


Abbildung B.8: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 8000-16000 Hz

Tabelle B.1: Maximaler Youden-Index samt Abweichung

| $f_u$ /[Hz] | $f_o$ /[Hz] | Abweichung | $J$     |
|-------------|-------------|------------|---------|
| 63          | 125         | 1,075      | 0,271   |
| 125         | 200         | 1,060      | 0,350   |
| 250         | 500         | 1,075      | 0,328   |
| 500         | 1000        | 1,075      | 0,700   |
| 1000        | 2000        | 1,090      | 0,585   |
| 2000        | 4000        | 1,135      | 0,721   |
| 4000        | 8000        | 1          | -0,0285 |
| 8000        | 16000       | 1,145      | 0,742   |

## Störgeräusche, die lauter oder gleich laut sind

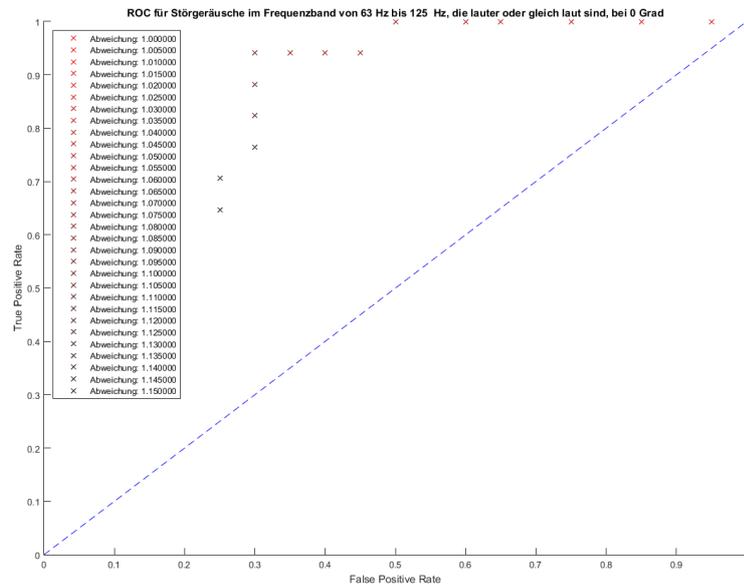


Abbildung B.9: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 63-125 Hz

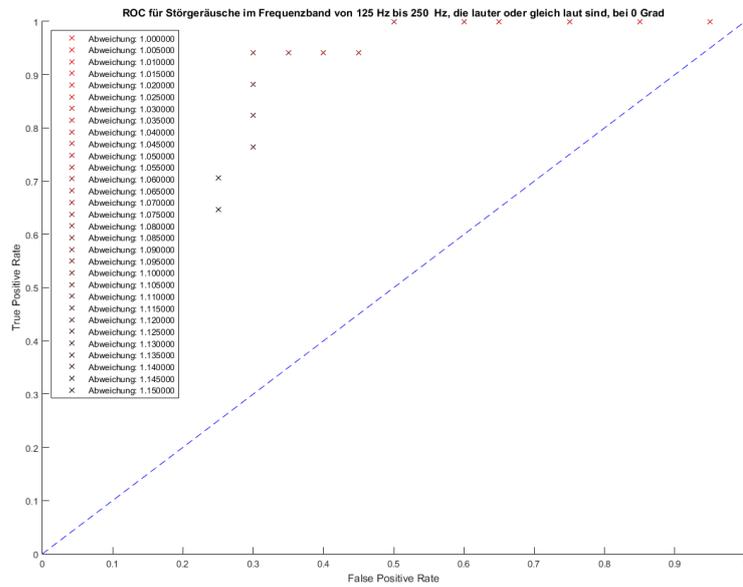


Abbildung B.10: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 125-250 Hz

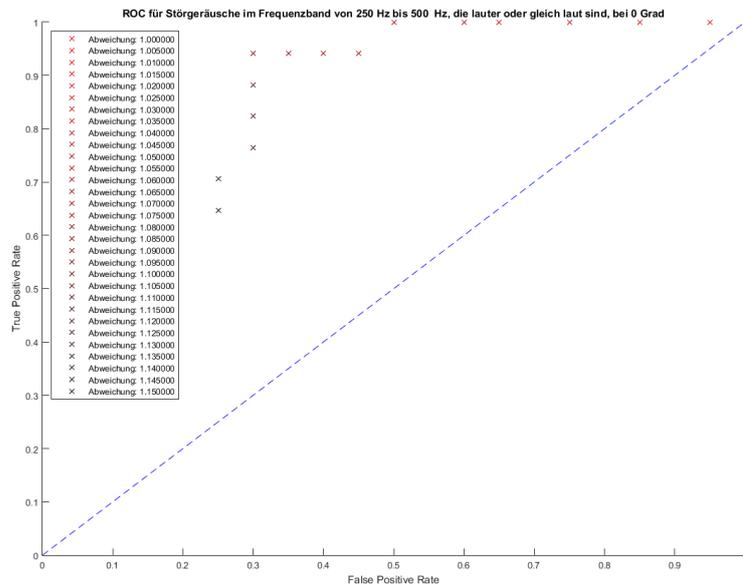


Abbildung B.11: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 250-500 Hz

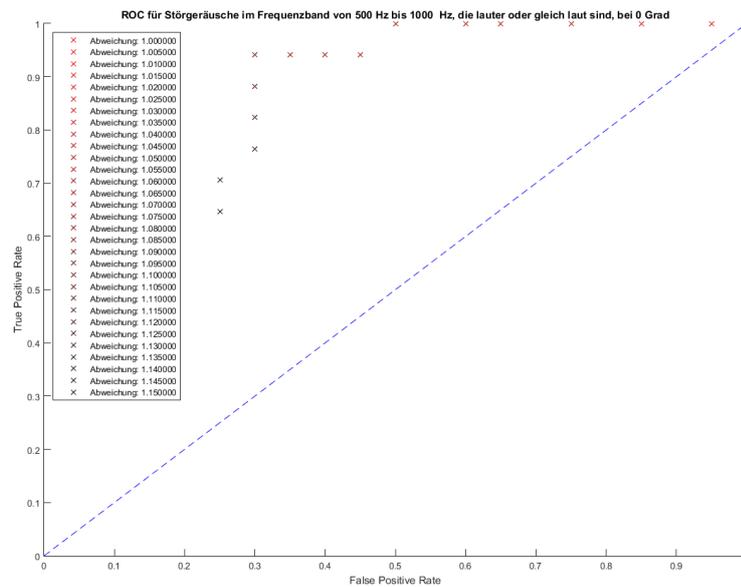


Abbildung B.12: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 500-1000 Hz

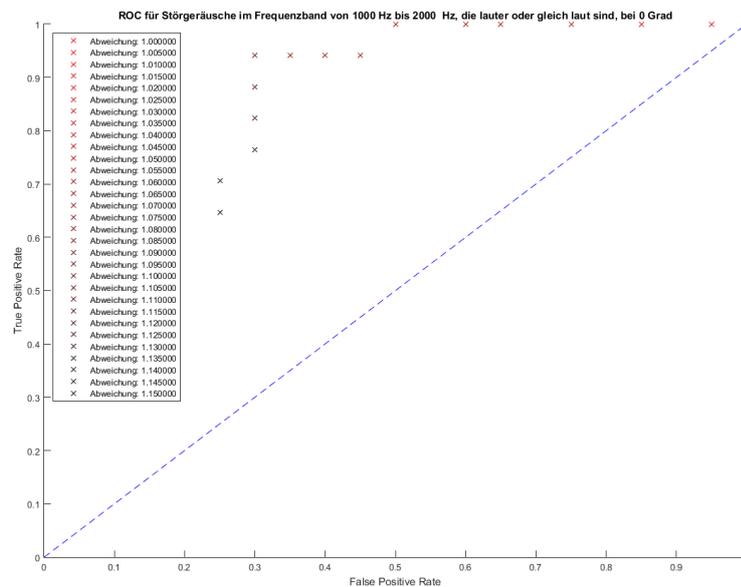


Abbildung B.13: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 1000-2000 Hz

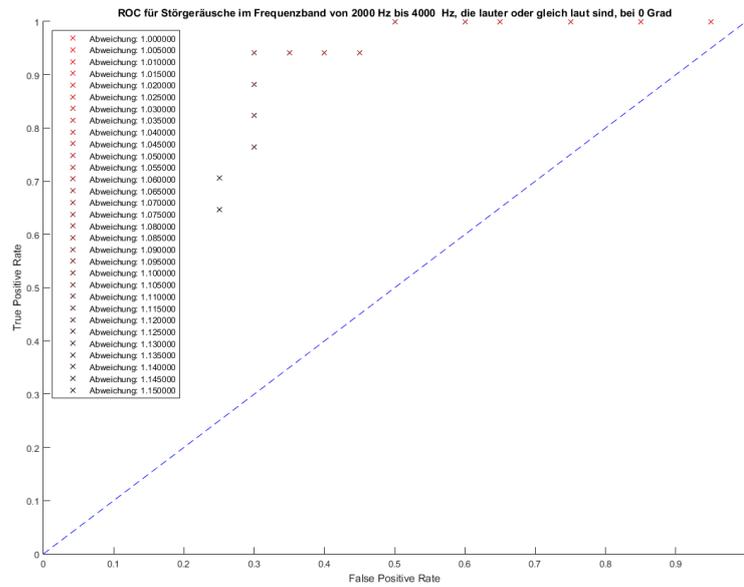


Abbildung B.14: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 2000-4000 Hz

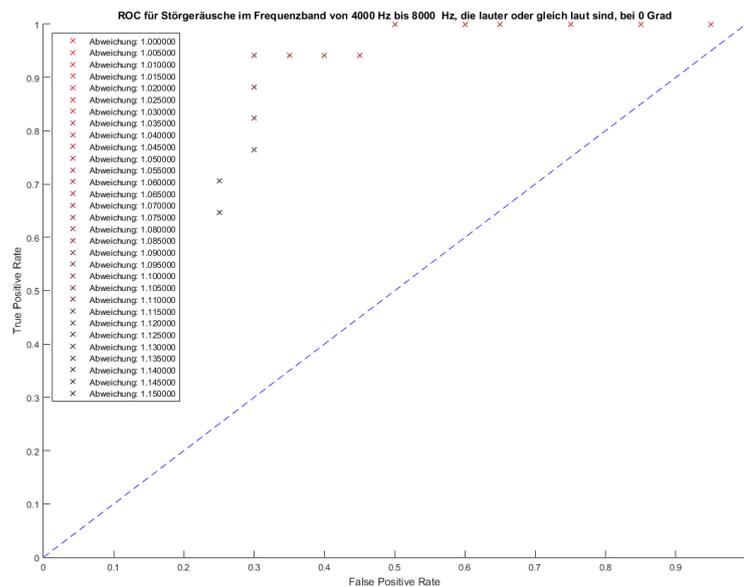


Abbildung B.15: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 4000-8000 Hz

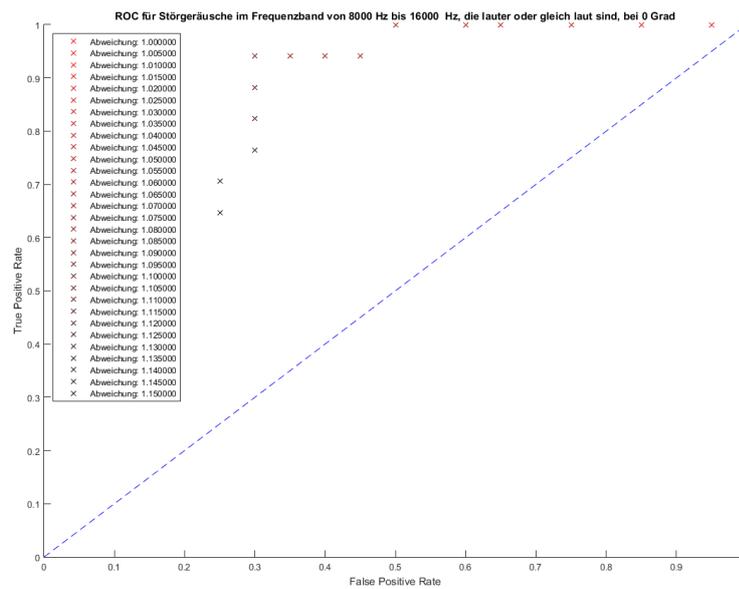


Abbildung B.16: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem gefilterten weißen Rauschen bei 0 Grad Drehung; 8000-16000

Tabelle B.2: Maximaler Youden-Index samt Abweichung

| $f_U$ /[Hz] | $f_O$ /[Hz] | Abweichung | $J$   |
|-------------|-------------|------------|-------|
| 63          | 125         | 1,075      | 0,641 |
| 125         | 200         | 1,075      | 0,641 |
| 250         | 500         | 1,075      | 0,641 |
| 500         | 1000        | 1,075      | 0,641 |
| 1000        | 2000        | 1,075      | 0,641 |
| 2000        | 4000        | 1,075      | 0,641 |
| 4000        | 8000        | 1,075      | 0,641 |
| 8000        | 16000       | 1,075      | 0,641 |

# Sinus

## Alle Störgeräusche

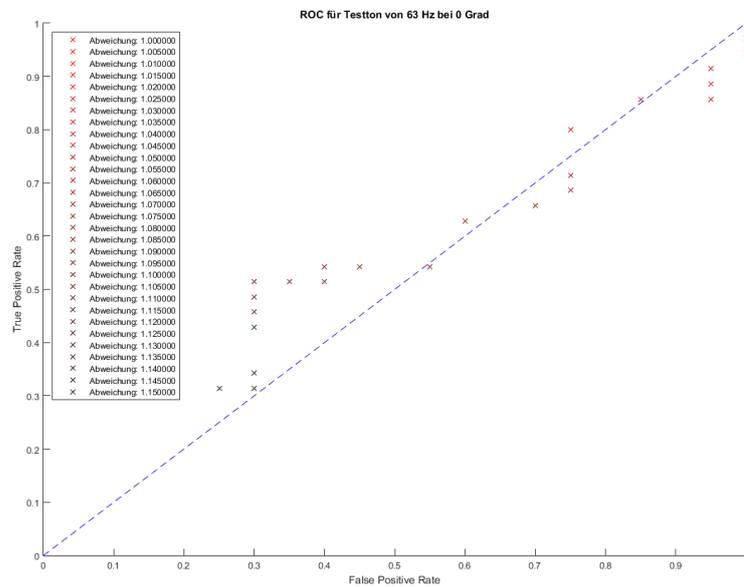


Abbildung B.17: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 63 Hz

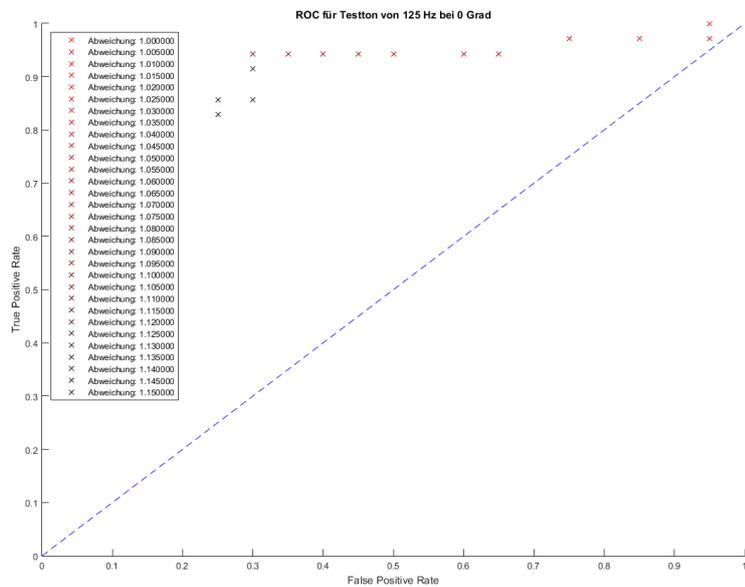


Abbildung B.18: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 125 Hz

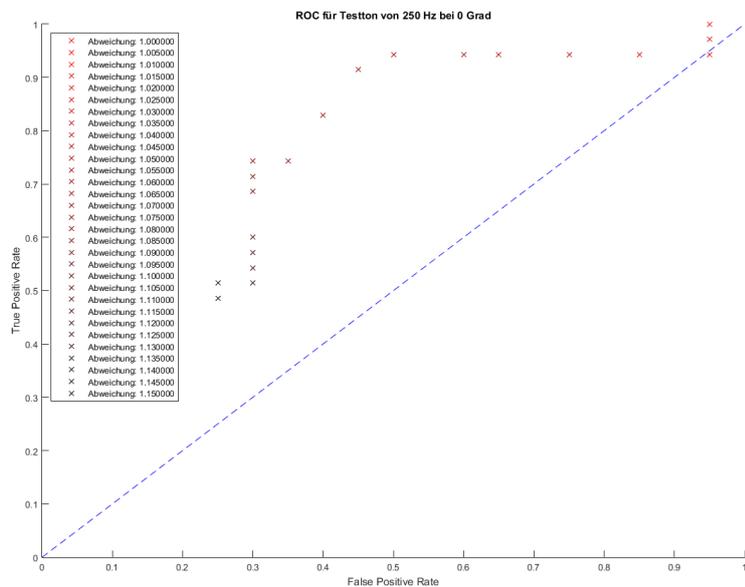


Abbildung B.19: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 250 Hz

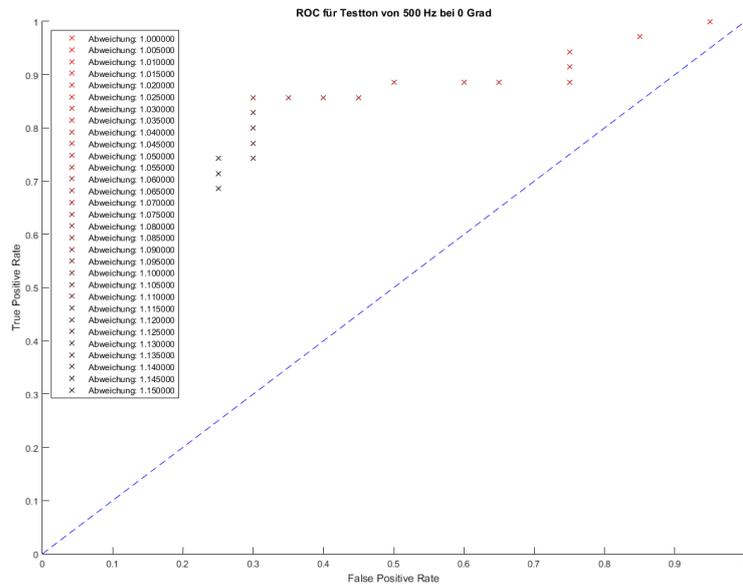


Abbildung B.20: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 500 Hz

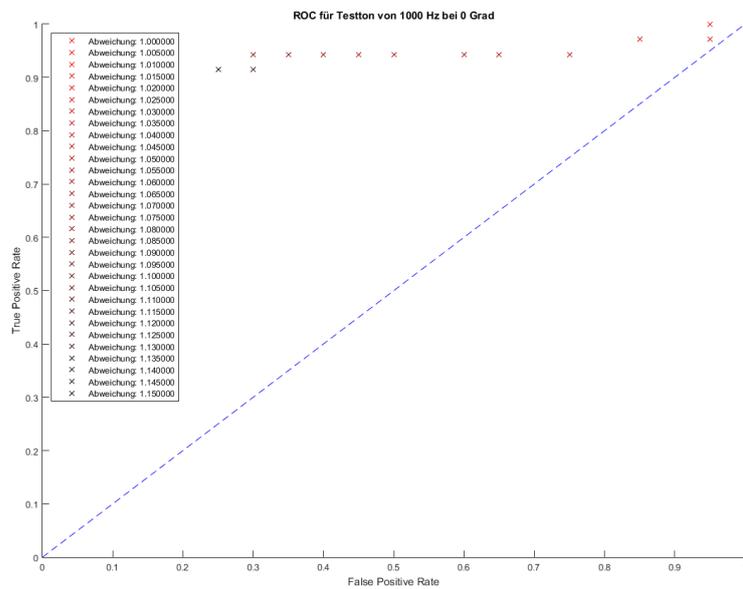


Abbildung B.21: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 1000 Hz

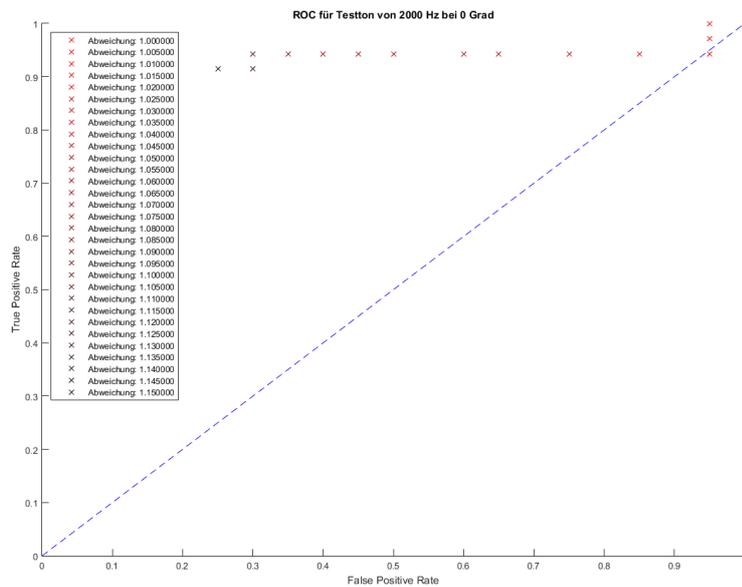


Abbildung B.22: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 2000 Hz

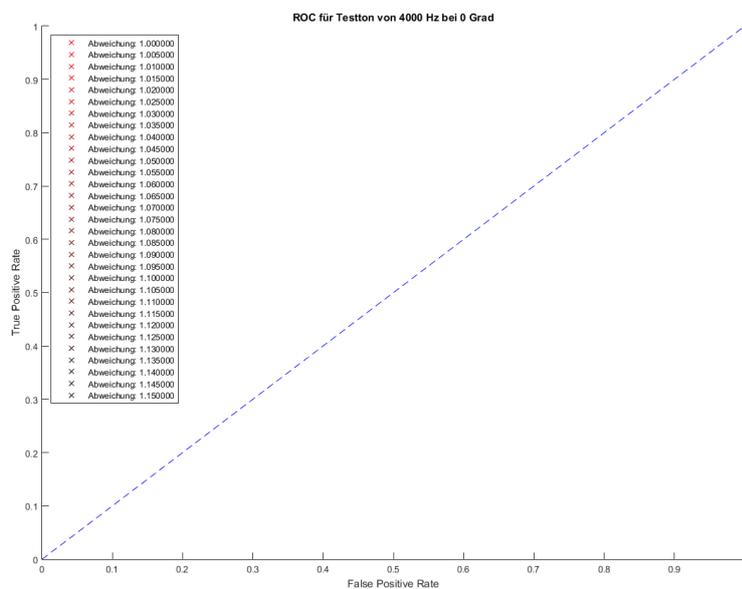


Abbildung B.23: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 4000 Hz

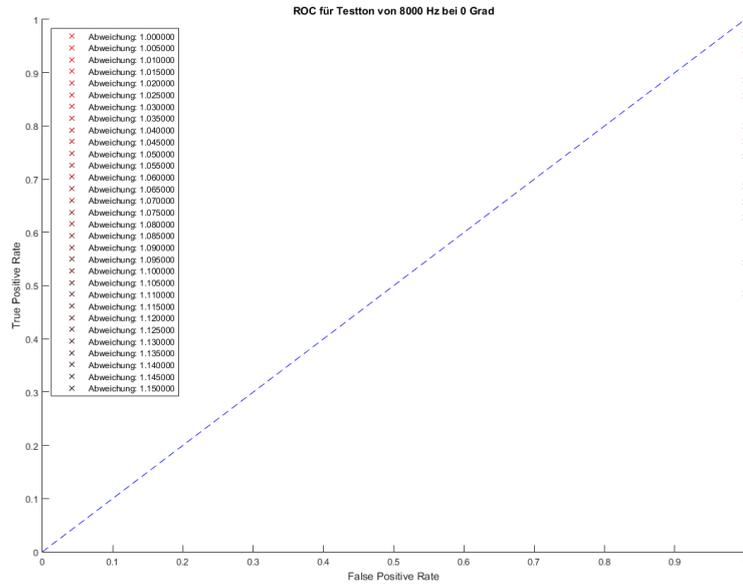


Abbildung B.24: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 8000 Hz

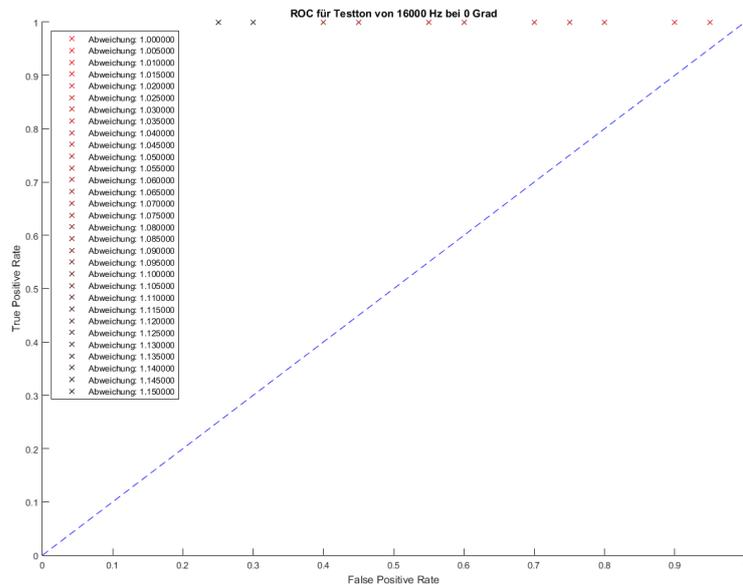


Abbildung B.25: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 16000 Hz

Tabelle B.3: Maximaler Youden-Index samt Abweichung

| f/[Hz] | Abweichung | $J$     |
|--------|------------|---------|
| 63     | 1,090      | 0,214   |
| 125    | 1,075      | 0,642   |
| 250    | 1,060      | 0,464   |
| 500    | 1,075      | 0,557   |
| 1000   | 1,135      | 0,664   |
| 2000   | 1,135      | 0,664   |
| 4000   | 1          | -0,0285 |
| 8000   | 1          | -0,0285 |
| 16000  | 1,140      | 0,750   |

## Störgeräusche, die lauter oder gleich laut sind

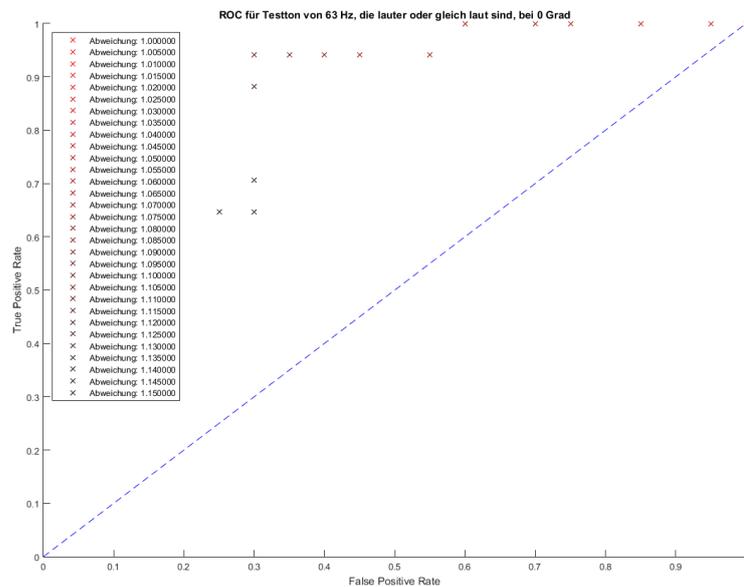


Abbildung B.26: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 63 Hz

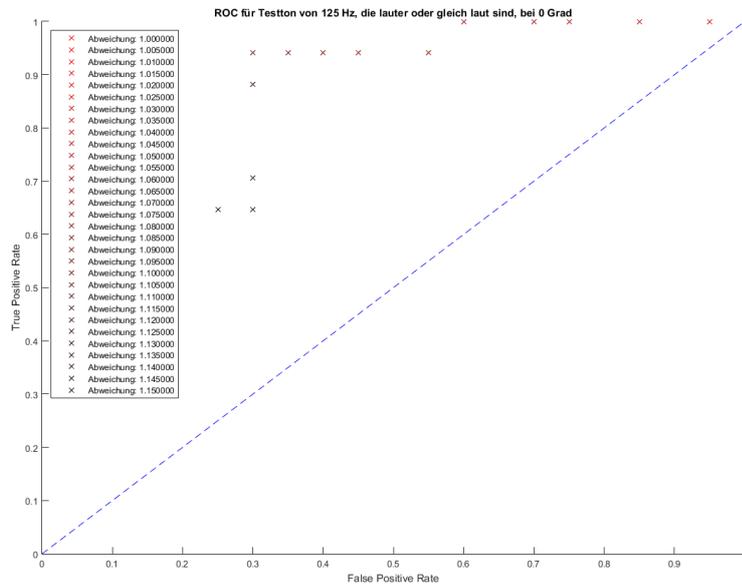


Abbildung B.27: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 125 Hz

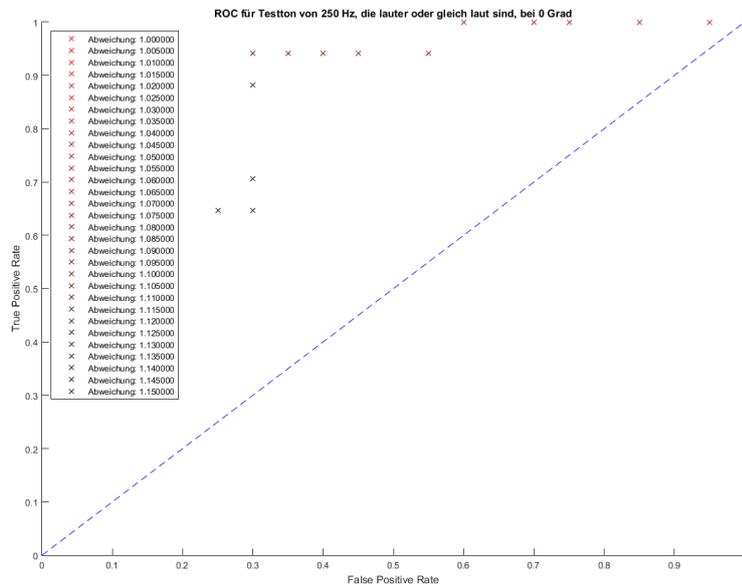


Abbildung B.28: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 250 Hz

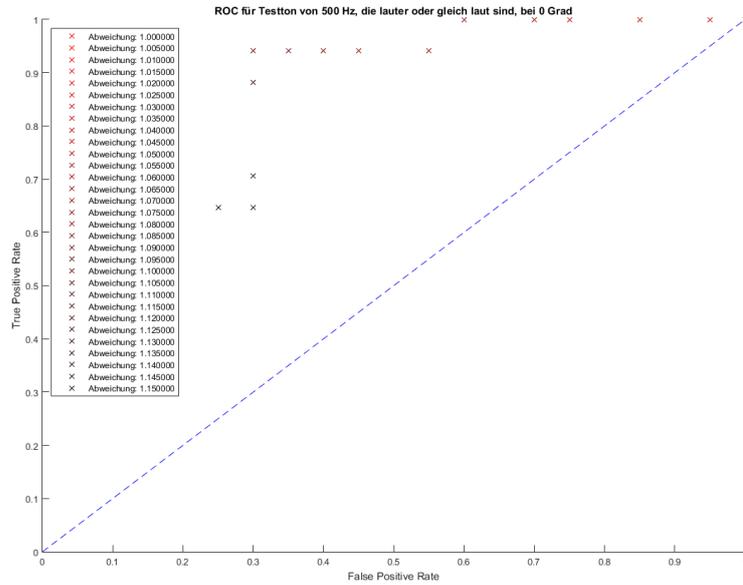


Abbildung B.29: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 500 Hz

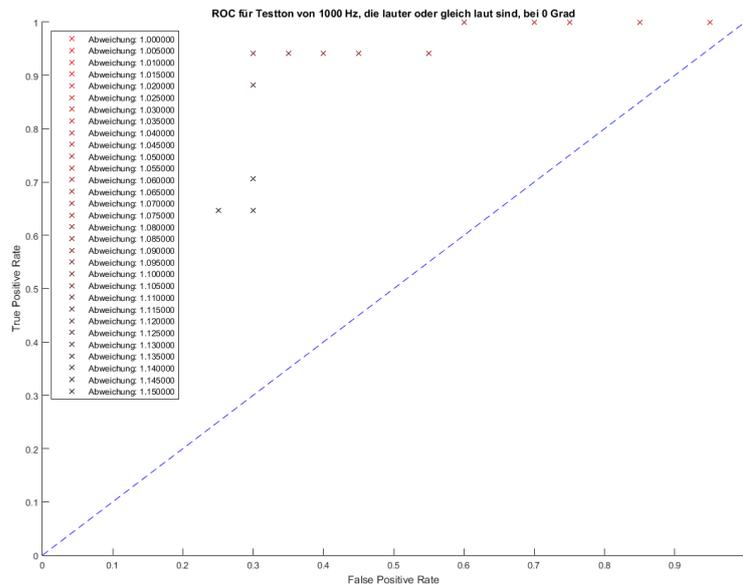


Abbildung B.30: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 1000 Hz

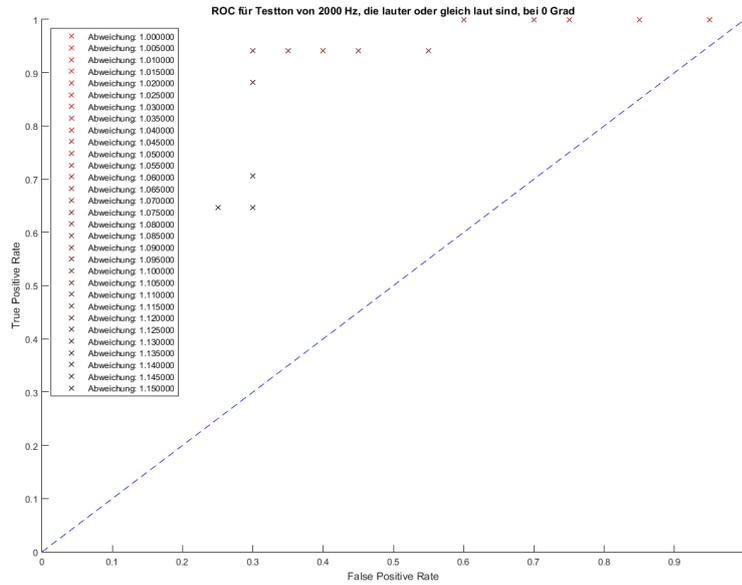


Abbildung B.31: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 2000 Hz

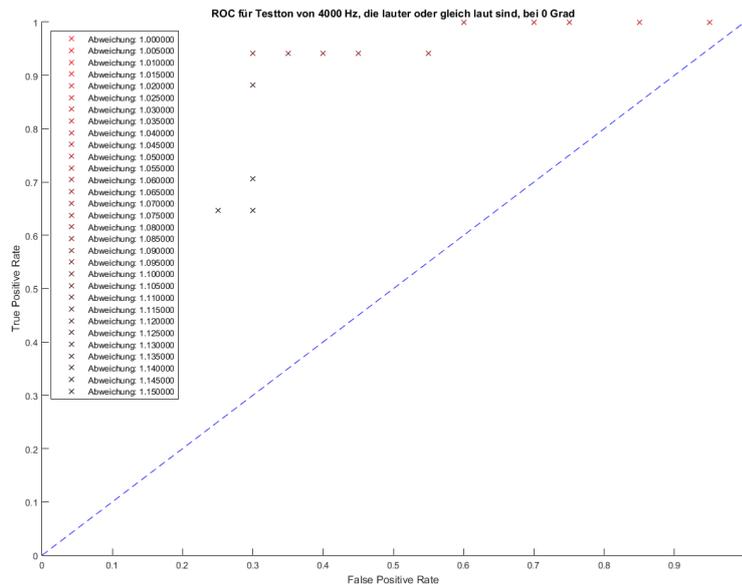


Abbildung B.32: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 4000 Hz

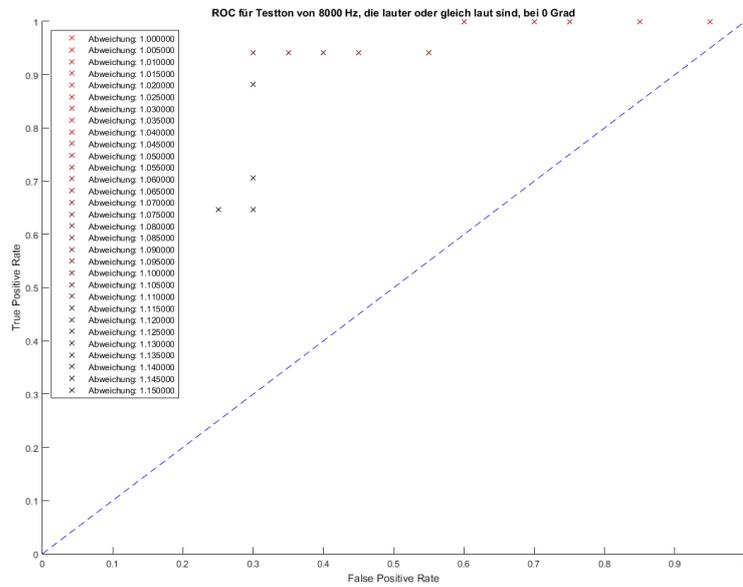


Abbildung B.33: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 8000 Hz

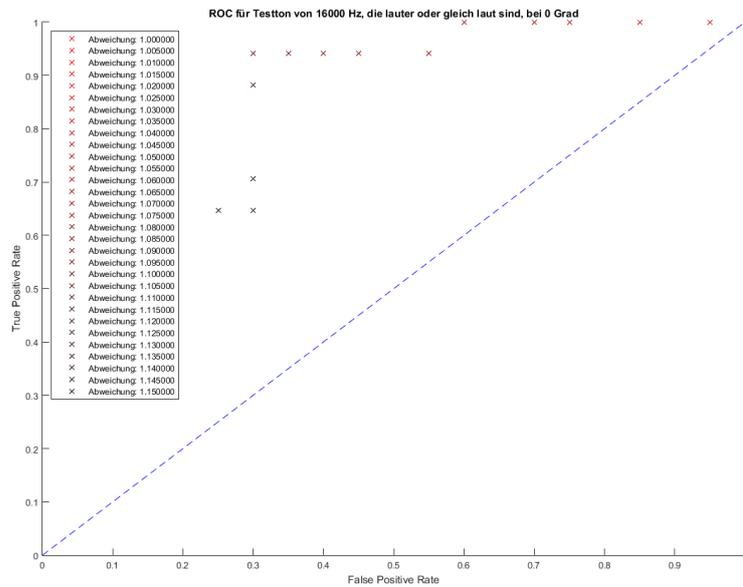


Abbildung B.34: Fehlererkennung der systematisch-zufälligen Fehler, die lauter oder gleich laut sind, bei einem Testton bei 0 Grad Drehung; 16000 Hz

Tabelle B.4: Maximaler Youden-Index samt Abweichung

| f/[Hz] | Abweichung | $J$   |
|--------|------------|-------|
| 63     | 1,090      | 0,641 |
| 125    | 1,090      | 0,641 |
| 250    | 1,090      | 0,641 |
| 500    | 1,090      | 0,641 |
| 1000   | 1,090      | 0,641 |
| 2000   | 1,090      | 0,641 |
| 4000   | 1,090      | 0,641 |
| 8000   | 1,090      | 0,641 |
| 16000  | 1,090      | 0,641 |

## Anhang C: MatLab-Funktionen

### kitsch - Kostenloser InTerner Sweep Check

#### Aufruf

`clean_final=kitsch(anz_aufn, wiederholung, struct, channels, recLength, fs, abweichung, stilleaufnahmen_final, kHzaufnahmen_final)`

#### Zweck

Umgebung zur Messung und Überprüfung der Aufnahmen.

#### Beschreibung der Parameter

- Input
  - `anz_aufn` - Anzahl der Aufnahmen, die am Ende vorliegen sollen
  - `wiederholung` - Anzahl der Wiederholung der Aufnahmen, falls Fehler erkannt wurden
  - `struct` - Struct mit zu messenden Signal und Art des Signals
    - \* `struct.name` - Art des Signal, 'stille', 'kHz', 'sweep'
    - \* `struct.sweep` - Zu messendes Signal (Stille, Sinus (1 kHz), Sweep)
  - `channels` - Ein- und Ausgangskanäle
  - `recLength` - Länge der Aufnahmen in sec
  - `abweichung` - Abweichung
    - \* Stille: Anstieg, meist  $10^{-3}$
    - \* kHz: Frequenz, meist 15 Hz
    - \* Sweep: Prozent, meist 1.07
  - `stilleaufnahmen_final` - Aufgenommene Stille, notwendig für Sweep, sonst leer
  - `kHzaufnahmen_final` - Aufgenommenen Testton, notwendig für Sweep, sonst leer
- Output
  - `clean_final` - Fehlerfreie Aufnahmen

## Nassi-Shneiderman-Diagramm

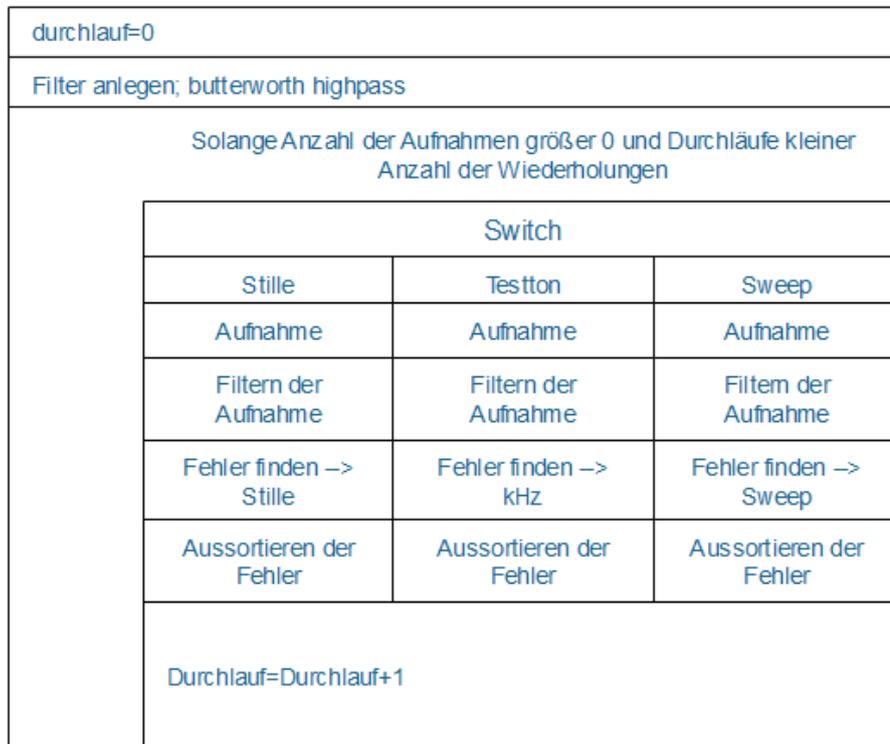


Abbildung C.1: Aufbau der Umgebung der Überprüfungsroutine

## **kitsch1**

### **Aufruf**

```
fail=kitsch1(data, fs, abweichung);
```

### **Zweck**

Überprüft einen gemessenen Testton, unter der Prämisse, dass dieser bei 1 kHz liegt.

### **Beschreibung der Parameter**

- Input
  - data - Zu untersuchende Aufnahmen
  - fs - Samplerate
  - abweichung - Abweichung in Hz
- Output
  - fail - Fehlervektor

## Nassi-Shneiderman-Diagramm

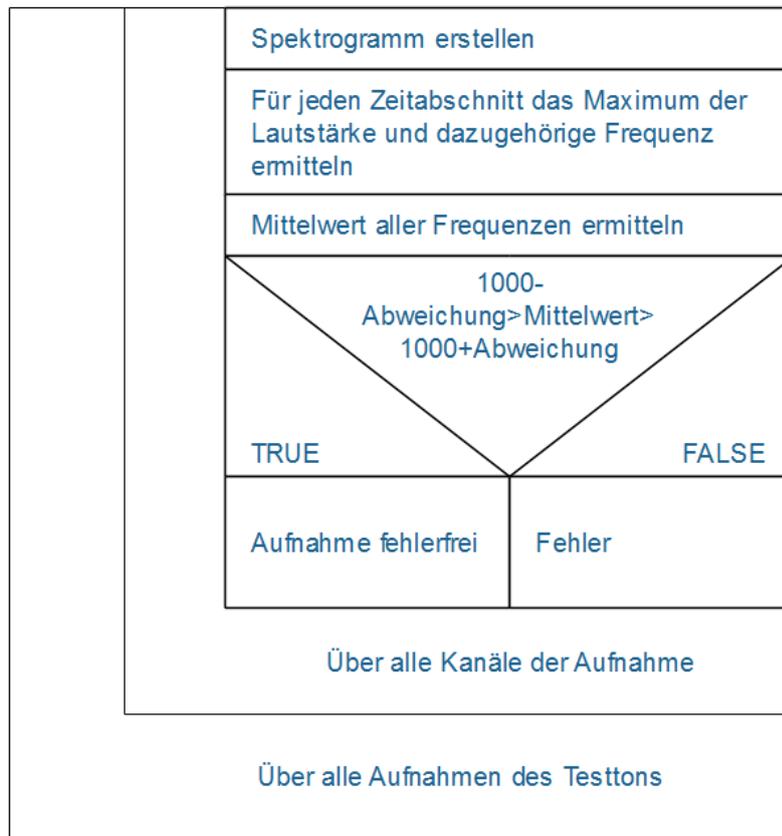


Abbildung C.2: Überprüfung des Testtons

## **stillecht**

### **Aufruf**

```
fails=stillecht(data, fs, abweichung);
```

### **Zweck**

Ermittelt fehlerhafte Aufnahmen der Stille.

### **Beschreibung der Parameter**

- Input
  - data - Zu untersuchende Aufnahmen
  - fs - Samplerate
  - abweichung - Toleranz des Anstiegs der SFM, ohne Einheit
- Output
  - fails - Fehlervektor

## Nassi-Shneiderman-Diagramm

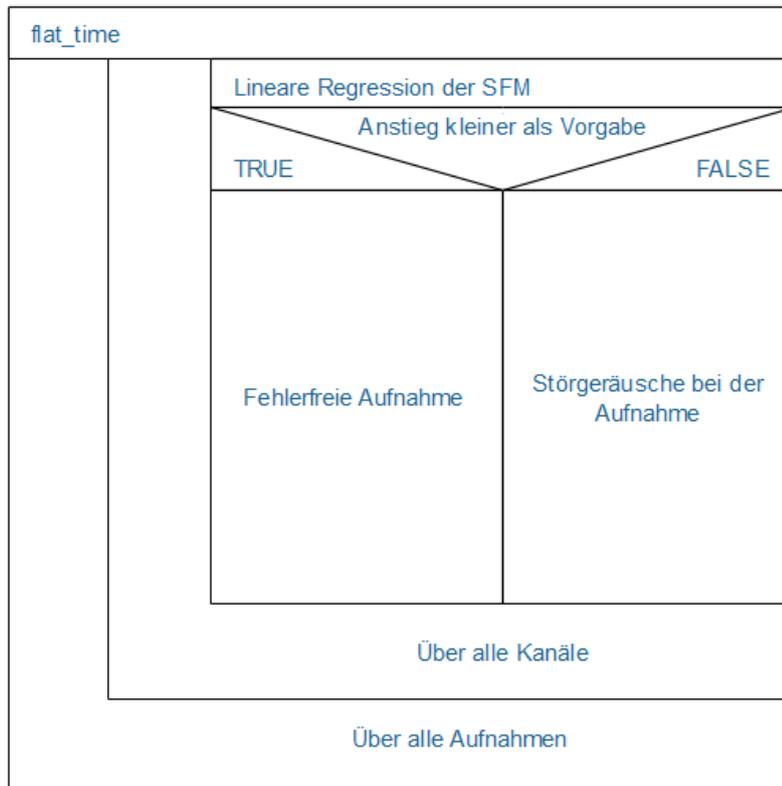


Abbildung C.3: Nassi-Shneiderman-Diagramm der Funktion, die Aufnahmen der Stille überprüft

## **flat\_time**

### **Aufruf**

```
[out,t,fail]=flat_time(data, freq_band, inv_threshold, fs, plot_on);
```

### **Zweck**

Erstellt eine SFM und ermittelt stationäre Geräusche.

### **Beschreibung der Parameter**

- Input
  - data - Zu untersuchende Aufnahmen
  - freq\_band - Grenze, über der stationäre Geräusche gesucht werden in Hz
  - inv\_threshold - Grenze, die überschritten werden muss, um als stationäres Geräusch entdeckt zu werden, in dB
  - fs - Samplerate
  - abweichung - Abweichung, z.B 1.03
  - plot\_on - Wenn 1 wird ein Plot erstellt
- Output
  - out - SFM der zu untersuchenden Aufnahmen
  - t - Zugehörige Zeitabschnitte
  - fail - Fehlervektor

## Nassi-Shneiderman-Diagramm

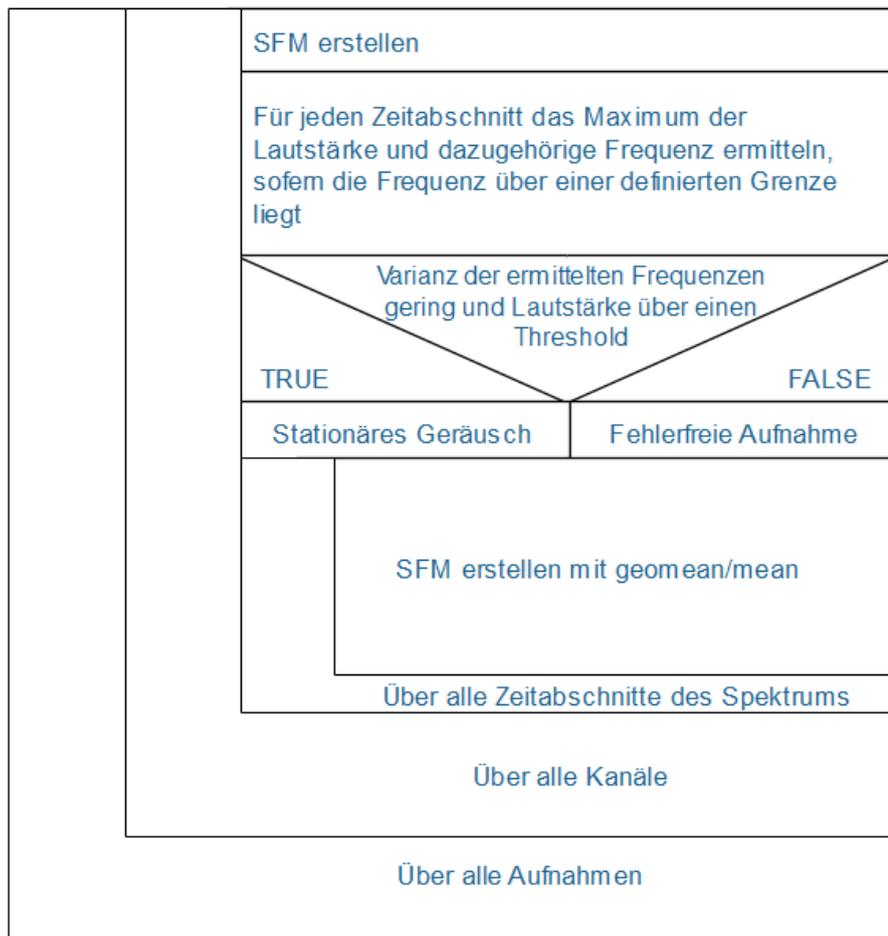


Abbildung C.4: Nassi-Shneiderman-Diagramm der flat\_time Funktion

## **flat\_spek**

### **Aufruf**

```
out=flat_spek(data);
```

### **Zweck**

Erstellt aus einem Zeitabschnitt eines Spektrogramms die SFM.

### **Beschreibung der Parameter**

- Input
  - data - s des Spektrogramms, s. Dokumentation zu spectrogram in MatLab
- Output
  - out - SFM des Zeitabschnitts

## microcheck

### Aufruf

```
fehler=microcheck(stille, khz, data, fs, abweichung, plot_on);
```

### Zweck

Ermittelt fehlerhafte Aufnahmen der Sweeps.

### Beschreibung der Parameter

- Input
  - stille - Aufgenommene Stille des Raumes
  - khz - Aufgenommener Testton
  - data - Zu untersuchende Aufnahmen der Sweeps
  - fs - Samplerate
  - abweichung - Abweichung, z.B 1.03
  - plot\_on - Wenn 1, dann wird für jede Aufnahme des Sweeps ein Plot erstellt
- Output
  - fehler - Fehlervektor

### Nassi-Shneiderman-Diagramme



Abbildung C.5: Nassi-Shneiderman-Diagramm für die Generierung der Parameter  $m_t$  und  $m_s$

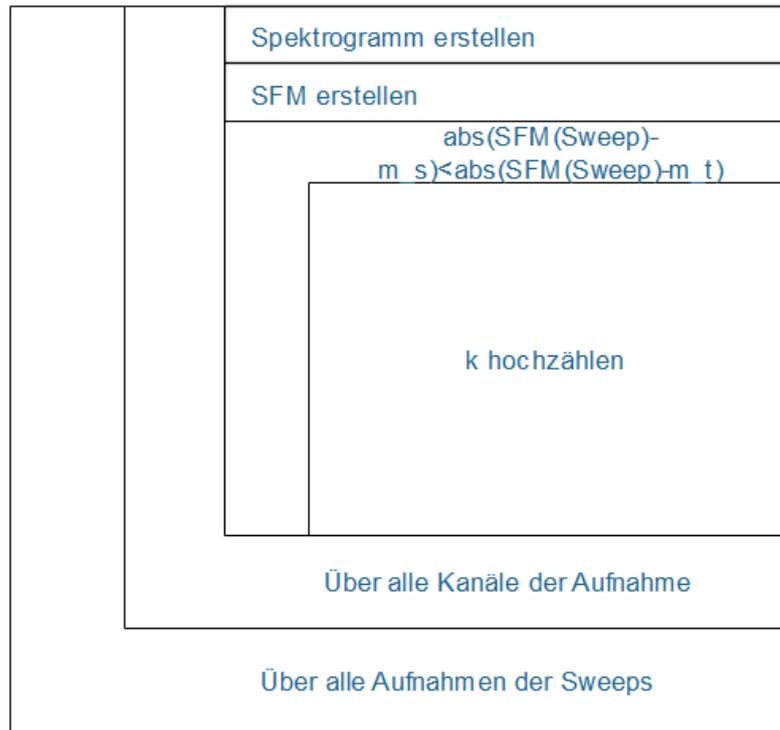


Abbildung C.6: Nassi-Shneiderman-Diagramm für die Generierung des Parameter  $k$

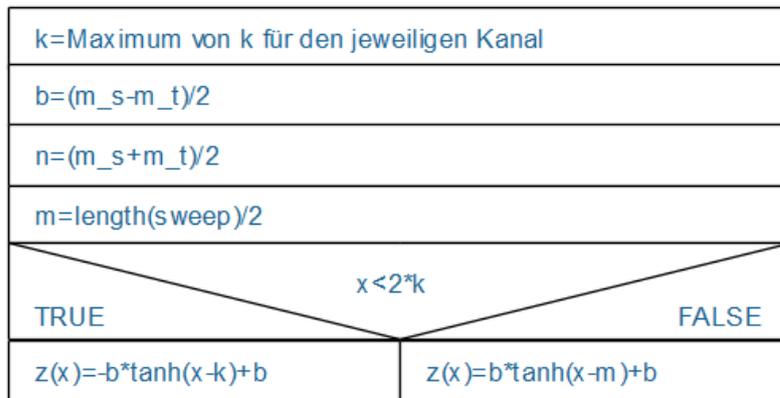


Abbildung C.7: Nassi-Shneiderman-Diagramm für die Generierung der Zielfunktion  $z(x)$

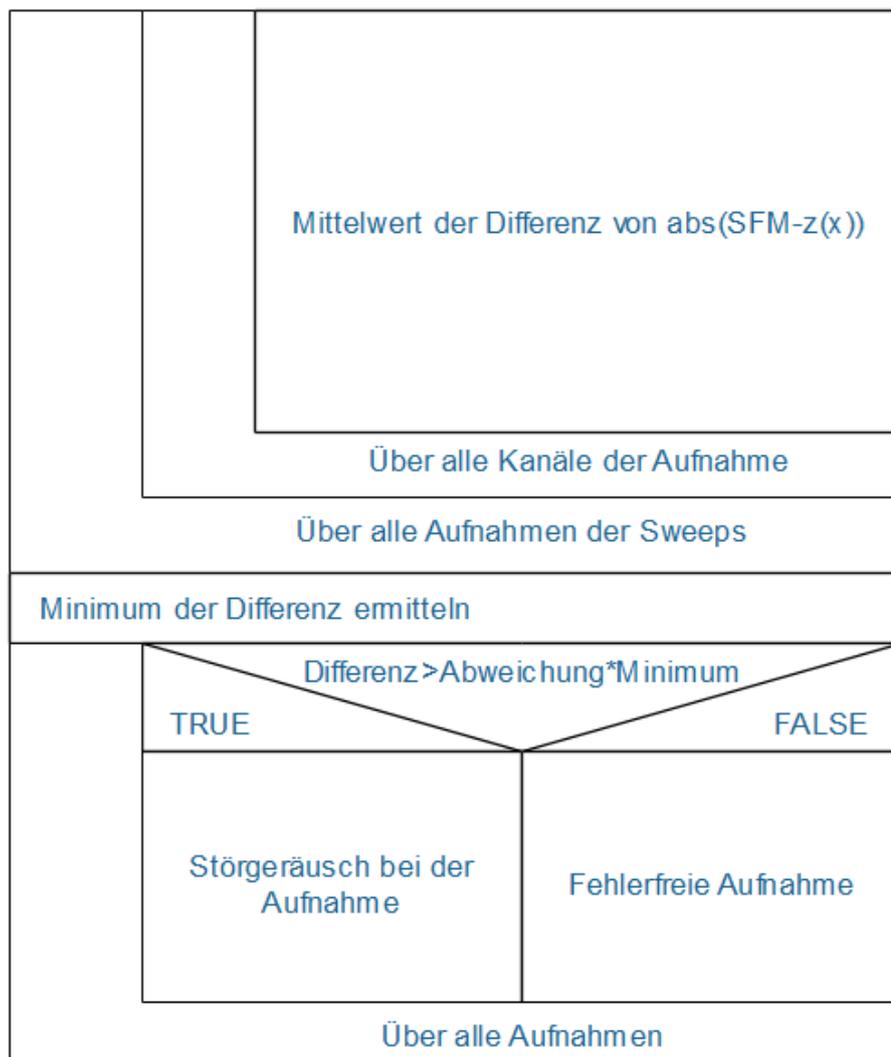


Abbildung C.8: Nassi-Shneiderman-Diagramm für die Überprüfung der aufgenommenen Sweeps

## **aufnehmen**

### **Aufruf**

```
sweepRec=aufnehmen(nRepeat, signal, channels, recLength);
```

### **Zweck**

Diese Funktion tätigt Aufnahmen mit playrec.

### **Beschreibung der Parameter**

- Input
  - nRepeat - Anzahl der Aufnahmen
  - signal - Zu messendes Signal
  - channels - Ein- und Ausgänge
  - recLength - Länge der Aufnahme in s
- Output
  - sweepRec - Aufnahmen

## **aussortieren**

### **Aufruf**

```
[out,anz_neu_aufn]=aussortieren(data,fehler);
```

### **Zweck**

Sortiert fehlerhafte Aufnahmen aus.

### **Beschreibung der Parameter**

- Input
  - data - Zu überprüfender Datensatz
  - fehler - Fehlervektor aus den vorherigen Funktion
- Output
  - out - Fehlerfreie Daten
  - anz\_neu\_aufn - Neu vorzunehmende Aufnahmen

## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich meine Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Arbeit noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Mittweida, 22. März 2019