# ANC bei Elektrogeräten

# **TI-Projektarbeit**

durchgeführt von

### Stefan Kaiser, BSc

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation der Technischen Universität Graz

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

Graz, im März 2017

## Zusammenfassung

Das Ziel dieser Projektarbeit ist es, einen Einblick in die Verwendung eines Active Noise Cancellation-Systems bei Elektrogeräten zu geben und dessen Sinnhaftigkeit zu evaluieren. Das Herzstück bildet hier ein S-Cube Development Kit der Firma Silentium, das die komplette Hard- und Software für die Einarbeitung in dieses Thema enthält.

Im Zuge der Arbeit wird zunächst kurz auf das allgemeine Funktionsprinzip der ANC eingegangen und danach der Einbau der Komponenten beschrieben. Weiters wird die vollständige Anwendung von der Kalibrierung bis zum Starten der ANC ausgeführt und schlussendlich durch Messungen die erreichte Performance überprüft.

## Abstract

The aim of this project is to give an insight to the usage of an active noise cancellation system in electronic devices and to evaluate its usefulness. The central piece used is the S-Cube Development Kit delivered by the company Silentium, which contains all the necessary hardand software for an introduction to this topic.

First, the principle of function of ANC is explained and the installation of the components is described. Furthermore, the whole usage from calibration to starting the ANC is illustrated. At last, the achieved performance is verified through measurements.

# Inhaltsverzeichnis

| 1 |            | Einleitung  | 5   |
|---|------------|---|-----|
| 2 |            | Verwendete Komponenten                                | 7   |
|   | 2.1        | Elektrogerät  | 7   |
|   | 2.2        | Sockel  | 7   |
|   | 2.3        | Silentium S-Cube Development Kit                      | 8   |
|   | 2.4        | NTI XL2 Audioanalysator                               | 8   |
| 3 |            | Funktionsprinzip                                      | 9   |
|   | 3.1        | Allgemeines   | 9   |
|   | 3.2        | Feedforward ANC ohne Fehlermikrofon                   | .10 |
| 4 |            | Einbau  | 11  |
|   | 4.1        | Position von Lautsprecher und Mikrofon                | .11 |
|   | 4.2        | Lautsprecher-Gehäuse                                  | .12 |
|   |            | 4.2.1 Gehäuse-Selbstbau<br>4.2.2 Sockel aus Musterbau | .13 |
|   |            |   |     |
| 5 |            | Anwendung   | 15  |
|   | 5.1        | Kalibrieraufbau                                       | .15 |
|   | 5.2        | Software-Vorbereitungen in Windows                    | .16 |
|   |            | 5.2.1 Einrichtung des USB Serial Ports                | .16 |
|   | <i>с</i> 2 | 5.2.2 Dezimatrennzeichen andern                       | .18 |
|   | 5.5        | 5 3 1 Microphone Transfer Function (MTF)              | .19 |
|   |            | 5.3.2 Speaker Transfer Function (STF)                 | .22 |
|   |            | 5.3.3 Echo Cancellation (EC)                          | .23 |
|   | 5.4        | ANC-Simulation / Stability Adjustment                 | .25 |
|   | 5.5        | Starten der ANC                                       | .27 |

| 6 | 6 Messungen                       |                              | 29 |
|---|-----------------------------------|------------------------------|----|
|   | 6.1 Sockel & Gesamtgerät ohne Al  | NC-Einbau                    |    |
|   | 6.1.1 Fremdgerausch               |                              |    |
|   | 6 1 3 Gesamtgerät                 |                              | 32 |
|   | 6.1.4 Vergleich Sockel / Gesan    | ntgerät                      |    |
|   | 6.2 Sockel mit selbstgebautem Gel | häuse & ANC                  |    |
|   | 6.2.1 Simulation mit S-ANC Se     | oftware                      |    |
|   | 6.2.2 Messung mit NTI Analys      | sator                        |    |
|   | 6.3 Sockel aus Musterbau & ANC.   |                              |    |
|   | 6.3.1 Simulation mit S-ANC So     | oftware                      |    |
|   | 6.3.2 Messung mit NTI Analys      | sator                        |    |
|   | 6.4 ANC-Evaluierung (Sockel)      |                              | 40 |
|   | 6.4.1 Sockelvergleich             |                              | 40 |
|   | 6.4.2 Erreichbare ANC-Perform     | nance (Sockel aus Musterbau) | 41 |
|   | 6.5 ANC im Gesamtgerät            |                              | 44 |
| 7 | 7 Weitere Optimierung             |                              | 45 |
| 8 | 8 Fazit / Ausblick                |                              | 47 |
| 9 | 9 Literaturverzeichnis            |                              | 48 |
| 1 | 10 Anhang                         |                              | 49 |
|   | 10.1 Monitor Software             |                              | 49 |
|   | 10.2 S-ANC Tool Software          |                              | 51 |
|   | 10.2.1 Hauptfenster               |                              | 51 |
|   | 10.2.2 Settings                   |                              | 53 |

# 1 Einleitung

Schon seit geraumer Zeit beschäftigt sich die Menschheit mit dem Thema Lärm und wie es gelingen kann, diesen zu reduzieren. Ganz egal, ob es sich zum Beispiel um Verkehrs-, Industrie-, Nachbarschafts- oder Freizeitlärm handelt, das Problem ist immer, dass an einem Ort Schall erzeugt wird, der an einem anderen Ort störend empfunden wird. Hier kann man zwei grundsätzliche Herangehensweisen unterscheiden, entweder man schirmt sich selbst gegen den Lärm ab (Schallschutzwände, Isolierfenster, Raum-in-Raum-Bauweise) oder man versucht, direkt den abgestrahlten Schall der Quelle zu verringern, wobei letzteres für diese Arbeit interessant ist.

Die einfachste Möglichkeit dies zu erreichen, ist die Verwendung von passiven Absorbern, welche störende Geräusche schon erheblich dämpfen können. Schwierig wird es jedoch bei tieferen Frequenzen, da dort große Absorber notwendig sind, um einen Effekt zu erreichen. Ebenso in allen Anwendungsfällen, bei denen Luft zirkulieren muss, zum Beispiel bei Lüftungsanlagen, wodurch auch die Schallübertragung begünstigt ist. Hier bietet es sich an, ein aktives System zur Schallunterdrückung zu verwenden, welches mit Hilfe eines Lautsprechers ein dem Lärm "entgegengesetztes" Schallfeld erzeugt.

Die Idee der Active Noise Cancellation ist jedoch keine Neue und geht auf ein Patent von Paul Lueg aus dem Jahr 1933 zurück. Der Siegeszug der digitalen Signalverarbeitung hat es aber erst in den letzten Jahrzehnten möglich gemacht, diese Idee effizient in der Praxis umzusetzen. Die ANC hat dadurch schon in einigen Bereich Anwendung gefunden, wie etwa bei geräuschunterdrückenden Kopfhörern, bei denen dieses System außerordentlich gut funktioniert. Dies liegt vor allem daran, dass bei geschlossenen Kopfhörern der Lärm von außen direkt beim Ohr abgeschwächt wird. Will man dieses System nun etwa bei Elektrogeräten anwenden, stößt man auf das ungleich schwierigere Problem, dass sich die Schallwellen dreidimensional ausbreiten, das Schallfeld aber nur in einem kleinen Raumbereich ausgelöscht werden kann. Bei Geräten, die eine Form von Kanal besitzen, ist es jedoch wieder etwas einfacher, da man in Kanälen von ebener Schallausbreitung ausgehen und die Schallfeld-Überlagerung als zweidimensionales Problem betrachten kann.

Ob die Active Noise Cancellation in diesem Fall zufriedenstellende Ergebnisse liefert, gilt es in dieser Arbeit zu untersuchen.

# 2 Verwendete Komponenten

## 2.1 Elektrogerät



Abb. 2.1: Elektrogerät mit Sockellüfter

## 2.2 Sockel

Um die Einbausituation besser einschätzen zu können und nicht mit einem Komplettgerät hantieren zu müssen, wurde meist nur mit dem Sockel, also dem unteren Teil des Elektrogerätes, gearbeitet. Dieses beherbergt einen Kompressor und einen Sockellüfter, dessen Verhalten im Zuge dieser Arbeit am genauesten untersucht wird. Der Sockellüfter fährt je nach angelegter Spannung mit unterschiedlichen Drehzahlen. Die wichtigsten davon sind:

12V: 2000 U/min 9V: 1600 U/min 7V: 1260 U/min



Abb. 2.2: Sockel eines Elektrogerätes inkl. Gleichspannungsversorgung zur Ansteuerung des Sockellüfters

## 2.3 Silentium S-Cube Development Kit

Zur Anwendung der Active Noise Cancellation wird das Silentium S-Cube Development Kit (SCDK) benutzt. In nachfolgender Abbildung sind die einzelnen Komponenten des SCDK zu sehen. Es besteht aus dem DSP (1), einem Lautsprecher (2), zwei Elektretmikrofonen (3), einem USB-Kabel zur Verbindung mit dem PC (4), einem 9V-Netzteil zur Versorgung des DSP (5) und der PC-Software (6). Dieses System enthält alle notwendigen Komponenten, um einfach erste Versuche durchzuführen, seine Ergebnisse auszuwerten und Erkenntnisse zur Sinnhaftigkeit des Einbaues eines ANC-Systems zu erhalten. Das genaue Funktionsprinzip wird in Kapitel 3 erläutert.



Abb. 2.3: Silentium SCDK [SILHP]

## 2.4 NTI XL2 Audioanalysator

Für alle Schalldruck-Messungen wurde ein NTI XL2 Audioanalysator verwendet. Dieser bietet eine Vielzahl von Mess- und Analysemöglichkeiten, unter anderem die Schalldruckpegelmessung in Terzbändern, wie sie für dieses Projekt sinnvoll ist. Ebenso können verschiedene weitere Größen direkt berechnet und alle Werte an einen PC übertragen werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass er durch das Handheld-Format sehr transportabel ist. Es wurde ein <sup>1</sup>/<sub>4</sub>"-Messmikrofon mit Verlängerungskabel benutzt.



Abb. 2.4: NTI XL2 Audioanalysator [NTI]

# **3** Funktionsprinzip

### 3.1 Allgemeines

Das allgemeine Funktionsprinzip der Active Noise Cancellation beruht darin, einen dem vorhandenen Störschall gegenphasigen "Anti-Schall" zu bilden, so dass es bei Summation der beiden zu Auslöschungen kommt. Ein funktionierendes ANC-System benötigt dafür zumindest drei Komponenten:

- einen Lautsprecher, der den "Anti-Schall" abstrahlt
- einen Fehlersensor, der das Residuum, also den Restfehler nach der Auslöschung misst
- eine entsprechende Signalverarbeitung, in der das vom Lautsprecher abzustrahlende Signal geformt wird

Besteht ein System nur aus diesen drei Teilen, wird es Feedback ANC genannt, welche in Abb. 3.1 dargestellt ist.



Abb. 3.1: Feedback ANC [BÖ]

Wird zusätzlich ein Referenzsensor hinzugefügt, um den Lärm selbst zu messen, spricht man von einer Feedforward ANC. Diese Variante findet beim Silentium Kit Anwendung.



Abb. 3.2: Feedforward ANC [BÖ]

### 3.2 Feedforward ANC ohne Fehlermikrofon

Im verwendeten Silentium Kit ist eine digitale Feedforward ANC implementiert. Diese funktioniert in folgender Weise, dass mit Referenz- und Fehlermikrofon die jeweiligen Schalldrücke gemessen werden und der digitale Signalprozessor (DSP) im SCDK mit diesen Eingangssignalen ein gefiltertes Lautsprechersignal ausgibt, das wiederum den Schalldruck am Ort des Fehlermikrofons so klein wie möglich machen soll. Die Signalverarbeitung geschieht hier mit einem adaptiven Filter und LMS (least mean square) Algorithmus, der genau für diese Problemstellung ideal ist. Ausführliche Informationen dazu sind unter [WIL] und [MOSCH] zu finden.



Abb. 3.3: Feedforward ANC mit Fehlermikrofon, bzw. Kalibriervorgang beim Silentium-System

Die Besonderheit des Silentium-Systems liegt nun darin, dass das Fehlermikrofon nur während des Kalibriervorgangs (in Kapitel 5 beschrieben) benötigt wird und danach weggelassen werden kann. Um dies zu realisieren, müssen während der Kalibrierung drei Übertragungsfunktionen berechnet werden, die erneut mit Hilfe adaptiver Filter implementiert sind. Zunächst die Microphone Transfer Function (MTF) zwischen Referenz- und Fehlermikrofon und die Speaker Transfer Function (STF) zwischen Lautsprecher und Fehlermikrofon. Sind diese bekannt, kann nur durch die Messung mit dem Referenzmikrofon berechnet werden, wie sich der Schalldruck am Ort des (nachher nicht mehr vorhandenen) Fehlermikrofons verhält. Weiters muss noch berücksichtigt werden, dass der vom Lautsprecher abgestrahlte Schall auf das Referenzmikrofon rückwirkt, was durch die Echo Cancellation (EC) Übertragungsfunktion herausgerechnet werden kann.

In nachfolgender Abbildung ist das Blockschaltbild ohne Fehlermikrofon und den drei adaptiven Filtern zu sehen.



Abb. 3.4: Feedforward ANC ohne Fehlermikrofon

# 4 Einbau

## 4.1 Position von Lautsprecher und Mikrofon

Die Position der Komponenten hat einen großen Einfluss auf die schlussendlich erreichte ANC-Performance. Für die Einbauposition von Lautsprecher und Mikrofon gelten grundsätzlich folgende Überlegungen:

- Das Referenzmikrofon soll möglichst nahe an der Schallquelle positioniert werden, aber wenn möglich außerhalb des Nahfeldes.
- Das Referenzmikrofon soll an einem windstillen Ort platziert werden (bei dieser Anwendung nicht möglich).
- Der Lautsprecher sollte so weit vom Referenzmikrofon entfernt sein, dass die Zeit für die Verarbeitung im DSP kürzer ist als die Zeit, die der Schall von Referenzmikrofon zu Lautsprecher benötigt. Dies liegt im Bereich von mindestens 12cm.
- Das Fehlermikrofon sollte mit "Sichtkontakt" zum Referenzmikrofon platziert werden.
- Es sollte Schallausbreitung in einem Kanal stattfinden, sodass man von ebener Schallausbreitung sprechen kann.

Alle diese Forderungen zu erfüllen ist nicht gerade einfach, vor allem, wenn man durch die Konstruktion des Sockels gerade bei der Platzierung des Lautsprechers stark eingeschränkt ist. Am sinnvollsten hat sich ergeben, die Komponenten in den von vorne gesehen linken Kanal einzubauen, da sich dort mit dem Lüfter eine laute Schallquelle befindet. Das Referenzmikrofon wurde ein kleines Stück vor dem Lüfter platziert und mit einem Windschutz versehen, um den Windeinfluss zu verringern. Der Lautsprecher wurde ca. 15cm vom Referenzmikrofon entfernt auf der rechten Seite der Kanalwand eingebaut, wofür durch den Hohlraum an der Unterseite des Sockels ausreichend Platz zur Verfügung stand (siehe Abb. 4.2). Wünschenswert wäre gewesen, den Lautsprecher etwas mehr in Richtung Kanalausgang versetzen zu können, dies lies die Sockelkonstruktion aber nicht zu.



Abb. 4.1: Einbaupositionen von Referenzmikrofon und Lautsprecher bzw. Position des Fehlermikrofons bei der Kalibrierung



Abb. 4.2: links: Einbau des Lautsprechers, Ansicht von unten; rechts: Anordnung Fehlermikrofon bei der Kalibrierung

Das Fehlermikrofon muss nicht direkt eingebaut werden, weil es nur beim ANC-Kalibrierungsvorgang benötigt und deshalb währenddessen mit einem Mikrofonständer direkt beim Eingang des Kanals aufgestellt wird.



Abb. 4.3: Skizze der Komponenten-Positionen

### 4.2 Lautsprecher-Gehäuse

Nach den ersten Tests wurde schnell klar, dass der Lautsprecher auf jeden Fall in ein Gehäuse gepackt werden muss, weil durch die Abstrahlung des Lautsprechers nach hinten zusätzlicher störender Lärm verursacht wird. Hier wurden zwei verschiedene Varianten getestet, zunächst ein Prototyp mit einem aus Holz selbst gefertigten Gehäuse und weiters ein modifizierter Sockel mit einem Deckel, der den Hohlraum komplett verschließt und diesen als Gehäuse benutzt.

#### 4.2.1 Gehäuse-Selbstbau



Abb. 4.4: Einbau des Gehäuse-Prototyps

Der Gehäuse-Prototyp wurde aus dünnen Holzplatten, die mit einer Schaumstoffschicht überzogen sind, gefertigt. Um ein geschlossenes Gehäuse zu erreichen, wurde dafür zunächst der Sockelboden mit weiteren Holzplatten geebnet und schließlich aus drei verschraubten Platten der Rahmen erzeugt. Der innere Raum wurde mit Schaumstoff gefüllt und mit einem Deckel verschlossen.

#### 4.2.2 Sockel aus Musterbau



Abb. 4.5: Sockel aus Musterbau

Der vom Musterbau modifizierte Sockel benutzt den unteren Hohlraum als Gehäuse. Ebenso wurde eine Holzkonstruktion eingefügt, mit derer der Lautsprecher ein Stück nach Innen versetzt wird (Abb. 4.5 links oben, rot markiert). Dies bietet den Vorteil, dass er vom Hohlraum aus eingebaut werden kann, was den nachträglichen Einbau und die Wartung erheblich erleichtert. Ein weiterer positiver Aspekt ist, dass durch diese Konstruktionsweise das komplette ANC-System im Hohlraum verstaut werden kann.

Der Hohlraum wurde wie auch beim Selbstbau-Gehäuse mit Schaumstoff gefüllt und mit einem Deckel verschlossen. An der Sockel-Vorderkante befindet sich jedoch noch eine Öffnung, die aber mit einem Kunststoff-Pfropfen verschlossen werden kann (Abb. 4.5 unten, rot markiert).

# **5** Anwendung

In diesem Kapitel wird der komplette Ablauf beschrieben, um das ANC-System für das gewünschte Gerät zu kalibrieren und automatisch zu betreiben.

### 5.1 Kalibrieraufbau

Im ersten Schritt werden, wie in Abb. 5.1 dargestellt, alle Komponenten mit dem DSP verbunden. Die Platine sollte in der Nähe des Sockels platziert werden, um zunächst die Kabel von Lautsprecher und Referenz-Mikrofon anschließen zu können. Dann wird das Fehler-Mikrofon genau vor dem Ausgang des linken Sockel-Kanals aufgestellt und ebenso an den DSP angeschlossen (Abb. 5.2). Schließlich kann mit dem 9V-Netzteil die Stromversorgung und mittels USB-Kabel die Verbindung zum PC hergestellt werden. Ist alles verbunden, sollte eine grüne LED auf der Platine aufleuchten.



Abb. 5.1: Anschlüsse am DSP [SILHP]

In Abb. 5.2 ist der komplette Kalibrieraufbau dargestellt. In Abb. 2.2 war bereits zu erkennen, dass der Sockellüfter an eine Gleichspannungsversorgung von 0-12V angeschlossen werden muss, um den gewünschten Betriebszustand herzustellen.



Abb. 5.2: Kalibrieraufbau

## 5.2 Software-Vorbereitungen in Windows

Für die Kalibrierung werden die Programme "Monitor" und "S-ANC Tool" benötigt, die mit dem SCDK mitgeliefert werden. Sind diese installiert, müssen zwei weitere Schritte durchgeführt werden, um eine korrekte Funktion zu gewährleisten. Unterstützt werden Betriebssysteme bis inklusive Windows 7.

### 5.2.1 Einrichtung des USB Serial Ports



Abb. 5.3: Einrichtung Serial Port, Schritt 1 - 3

- 1. Computerverwaltung öffnen: Am Desktop auf "Computer" rechtsklicken und "Verwaltung" wählen
- 2. Auf der linken Seite "Geräte-Manager" auswählen
- 3. "Ports" Reiter öffnen und "USB Serial Port" Eintrag doppelklicken

| USB Seri | al Port (COM  | (19) Pr         | opertie   | 5                      |        | ? 🛛        |
|----------|---------------|-----------------|---|------------------------|--------|------------|
| General  | Port Settings | Driver          | Details   |                        |        |            |
|          |               | <u>B</u> its pe | er second:<br><u>D</u> ata bits:<br><u>P</u> arity:<br><u>S</u> top bits:<br>w control: | 9600<br>8<br>None<br>1 |        |            |
|          |               |                 | Advanced  |                        | Restor | e Defaults |

Abb. 5.4: Einrichtung Serial Port, Schritt 4 & 5

- "Port Settings"-Reiter auswählen
   Schaltfläche "Advanced" klicken

| ranced Settings for 0      | COM18                  |               |                               | 2        |
|----------------------------|------------------------|---------------|-------------------------------|----------|
| COM Port Number:           | COM 18                 |               | ×                             | ОК       |
| USB Transfer Sizes         |                        |               |                               | Cancel   |
| Select lower settings to c | orrect performance pro | oblems at low | r baud rates.                 | Defaulte |
| Select higher settings for | faster performance.    |               |                               | Peraoros |
| Receive (Bytes):           | 4096                   | ~             |                               |          |
| Transmit (Bytes):          | 4096                   | ~             |                               |          |
| BM Options                 |                        |               | Miscellaneous Options         |          |
| Select lower settings to c | orrect response proble | ms.           | Serial Enumerator             | 6        |
| Latency Timer (msec):      | 1                      | -             | Serial Printer                | C        |
|                            |                        |               | Cancel If Power Off           | E        |
| Timeouts                   |                        |               | Event On Surprise Removal     | C        |
| Minimum Read Timeout (r    | msec): 100             | -             | Set RTS On Close              | C        |
| Minimum Write Timeout (    | msec): 100             | ~             | Disable Modem Ctrl At Startup | 0        |

Abb. 5.5: Einrichtung Serial Port, Schritt 6 & 7

- 6. "Latency Timer" auf 1 ms setzen7. Minimum Read und Write Timeout auf 100 ms setzen

#### 5.2.2 Dezimaltrennzeichen ändern

Dieser Schritt ist ebenso wichtig und muss unbedingt durchgeführt werden, da sonst die Kalibrierung nicht funktioniert!

- 1. Systemsteuerung öffnen
- 2. "Zeit, Sprache und Region" auswählen
- 3. "Datum, Uhrzeit oder Zahlenformat ändern" auswählen
- 4. "Weitere Einstellungen" auswählen
- 5. Bei "Dezimaltrennzeichen" einen Punkt statt einem Komma eintragen



Abb. 5.6: Dezimaltrennzeichen ändern, Schritt 3

| Region und Sprache                        |   | 🔗 Format anpassen   |                                   |
|---|---|---|-----------------------------------|
| ormate Aufenthaltsort                     | Tastaturen und Sprachen Verwaltung  | Zahlen Währung Uhrzeit Datum  |                                   |
| Format:                                   |   | Beispiel<br>Positive 123 456 780 00   | Negating 123 456 789 00           |
| Deutsch (Österreich)                      | )   | Positiv. 123,430,705.00   | 1123,450,755.05                   |
| Datums- und Uhrze                         | sitformate  |   |                                   |
| Datum (kurz):                             | TT.MMJJJJ   | Dezimaltrennzeichen:  | •                                 |
| Datum (lang):                             |   | Anzahl der Dezimalstellen:  | 2                                 |
| Ubrzeit (kurz):                           | HHmm  | Symbol für Zifferngruppierung:  |                                   |
| Uhrzeit (lang):                           | HHimmiss  | Zifferngruppierung:   | 123,456,789 🔹                     |
| Erster Wochentag:                         | Montag  | Negatives Vorzeichen:   | •                                 |
| Was bedeutet die So                       | chreibweise?  | Format für negative Zahlen:   | -1.1 🔹                            |
| Beispiele                                 |   | Führende Nullen anzeigen:   | 0.7 🔹                             |
| Datum (kurz):                             | 03.02.2017  | Listentrennzeichen:   | :                                 |
| Datum (lang):                             | Freitag, 03. Februar 2017   | Maßsystem:  | Metrisch 👻                        |
| Uhrzeit (lang):                           | 02:40:46  | Standardziffer:   | 0123456789 👻                      |
|   | Weitere Einstellungen   | Ziffernersatz:  | Nie 👻                             |
| Verbindung mit dem<br>Sprachen und region | Internet herstellen, um Informationen zum Andern von<br>alen Formaten zu erhalten | Klicken Sie auf "Zurücksetzen", um die<br>Systemstandardeinstellungen für Zahl<br>und Datum wiederherzustellen. | en, Währung, Uhrzeit Zurücksetzen |
|   | OK Abbrechen Obernehmen   |   | OK Abbrechen Übernehm             |

Abb. 5.7: Dezimaltrennzeichen ändern, Schritt 4 & 5

# 5.3 Bestimmung der Übertragungsfunktionen

Sind alle Vorbereitungen getroffen, kann mit dem eigentlichen Kalibrierungsvorgang gestartet werden. Dazu werden zunächst die Monitor- und S-ANC Tool Software gestartet.

| Scube On CO          | M3                 |            |   |                        |  |
|----------------------|--------------------|------------|---|------------------------|--|
| Go Dap               | Stop Dsp           | Reset Dsp  | Config DSP  | Communication Level    | 99%  |
| 🚵 Work               | Options 1          | a          | 2c  | 2b                     | crophone Scopes  |
| Ref Mic File:        | ref_mic<br>err_mic | MTF        | PF File: pf<br>EC File: ec  |                        | ?  |
| Period:              | 7                  | [Sec]      | ANC   |                        | Mic  |
| STF<br>STF Spk File: | stf_spk<br>stf_mic | STF        | Test Performance<br>Before ANC File: er_mic<br>After ANC File: er_mic | s_before Sr<br>p_after | *  |
| Noise Gain:          | 7<br>D.305         | [0.0-0.99] | Test Performan  | ce                     | Scube Version 5.2<br>Program Version: 52.4   |
| EC Spk File:         | ec_spk<br>ec_mic   | EC         | Test Spk<br>Period:  150<br>Test Spk                                  |                        | DSP ID: 0<br>Mode Of Work: NOISE<br>Ref Mic Gain(0-7): ψ() 3 ψ<br>Err Mic Gain(0-7): ψ() 3 ψ<br>Sok Gain(0-7): ψ() 3 ψ |
| Noise Gain: [        | 0.305              | [0.0-0.99] | Auto Start  |                        | Amp Gain[0-3]: ψ(3 ψ)<br>2a  |

Abb. 5.8: Monitor Software Hauptfenster

| S-ANC Tool      Plot Settings About License      Ø S Vorking Directory C:\ | 1b   |                          |           |
|--|--|--------------------------|-----------|
| S-AAC TOOL   | Work   | Signal Analysis          | Utilities |
| ANC Tasks<br>MTF<br>STF<br>EC  | Transfer Function                                      | n Diagram                |           |
| ANC Operation<br>ANC Simulation<br>Test Performance                        | Disable  Low Frequence Save Stability Restore Defaults | rencies High Frequencies |           |

Abb. 5.9: S-ANC Tool Software Hauptfenster

- 1. Damit der Datenaustausch zwischen den beiden Programmen funktioniert, muss in beiden Programmen das selbe Arbeitsverzeichnis angegeben werden:
  - a. Monitor: Reiter "Optionen"  $\rightarrow$  "Working Directory"
  - b. S-ANC Tool: Im Hauptfenster "Working Directory"
- 2. Pegel anpassen:
  - a. Gains einstellen: Für jeden Anwendungsfall müssen hier die passenden Verstärkungsfaktoren angegeben werden. Die üblichen Startwerte und für das Projekt passenden Werte sind in der folgenden Tabelle angegeben:

|              | Startwerte | Projekt-Werte |
|--------------|------------|---------------|
| Ref Mic Gain | 3          | 4             |
| Err Mic Gain | 3          | 6-7           |
| Spk Gain     | 0          | 0             |
| Amp Gain     | 0          | 0             |

- b. Eine praktische Vorgehensweise besteht darin, zunächst die Startwerte einzustellen und bei eingeschalteter Schallquelle das "Microphone Scopes"-Fenster in der Monitor-Software zu beobachten. Schlagen die Anzeigen im "Ref Mic" und "Err Mic"-Fenster ungefähr gleich und über ca. die Hälfte des Bereiches aus, ist dies ein guter Anfangswert. Dann startet man eine MTF-Messung und passt bei zu kleinem oder großem Pegel die Gains an.
- c. Wichtig ist, dass nach jeder Änderung der Gains der "Config DSP"-Button betätigt werden muss, damit die Werte in den DSP geschrieben werden.

Nun werden die drei benötigten Übertragungsfunktionen MTF, STF und EC der Reihe nach ermittelt, welches mathematisch auf folgende Weise, zunächst am Beispiel der MTF, beschrieben werden kann (siehe dazu auch Abb. 3.3):

$$MTF(s) = \frac{\mathcal{L}\{u_{error}(t)\}}{\mathcal{L}\{u_{ref}(t)\}} = \frac{U_{error}(s)}{U_{ref}(s)} \qquad \widetilde{U}_{error,MTF}(s) = MTF(s) \cdot U_{ref}(s)$$

Um die MTF zu erhalten, wird also das Spektrum des Fehlermikrofons durch das Spektrum des Referenzmikrofons dividiert. Ist diese Übertragungsfunktion einmal ermittelt, kann nun jederzeit das geschätzte Fehlermikrofon-Spektrum  $\tilde{U}_{error}(s)$  über das Referenzmikrofon-Spektrum multipliziert mit der MTF berechnet werden.

Analog gilt für STF und EC:

$$STF(s) = \frac{\mathcal{L}\{u_{error}(t)\}}{\mathcal{L}\{u_{spk}(t)\}} = \frac{U_{error}(s)}{U_{spk}(s)} \qquad \widetilde{U}_{error,STF}(s) = STF(s) \cdot U_{spk}(s)$$
$$EC(s) = \frac{\mathcal{L}\{u_{ref}(t)\}}{\mathcal{L}\{u_{spk}(t)\}} = \frac{U_{ref}(s)}{U_{spk}(s)} \qquad \widetilde{U}_{ref}(s) = EC(s) \cdot U_{spk}(s)$$

#### 5.3.1 Microphone Transfer Function (MTF)

Für diese Messung wird die Geräuschquelle eingeschaltet, d.h. in unserem Fall der Lüfter mit 12V Versorgungsspannung betrieben.

| MTF           |         |       | ANC Tasks |
|---------------|---------|-------|-----------|
| Ref Mic File  | ref_mic | MTF   | MTF 2     |
| Err Mic File: | err_mic | 1     | STF       |
| Period:       | 20      | [Sec] | EC        |

Abb. 5.10: MTF-Messung (links: Monitor, rechts: S-ANC Tool)

- 1. Monitor: "MTF"-Button betätigen, um die Messung zu starten. Die File-Namen können den Default-Wert beibehalten. Als Messdauer (Period) hat sich eine Länge von 20 Sekunden als sinnvoll erwiesen, diese kann bei lauteren Messungebungen erhöht werden, um länger zu mitteln. Nach erfolgter Messung werden die Daten vom DSP an den PC übertragen und die Files "ref\_mic" und "err\_mic" erzeugt.
- 2. S-ANC: Durch Klick auf "MTF" wird die Microphone Transfer Function berechnet. Sollte eine Fehlermeldung erscheinen, dass ein Pegel zu hoch oder gering ist, müssen die Gains erneut angepasst werden. Ist die Berechnung erfolgreich, wird ein Analyse-Fenster ausgegeben.



Abb. 5.11: Analyse MTF-Messung

Die oberen beiden Diagramme in Abb. 5.11 zeigen die aufgenommenen Signale von Referenz- und Fehlermikrofon. Hier ist wichtig, dass sich die maximalen Amplituden zwischen 0,1 und 0,9 bewegen. Links unten werden die Leistungsdichtespektren angezeigt, das Spektrum des Fehlermikrofons in rot  $(U_{error})$  und das bereits durch die berechnete MTF gefilterte Spektrum des Referenzmikrofons in blau  $(\tilde{U}_{error,MTF})$ . Hier kann man erkennen, dass sich bis ca. 1400 Hz beide Kurven überlappen, bei höheren Frequenzen ist der vom Lüfter abgestrahlte Pegel zu gering, um die MTF korrekt zu berechnen. Im letzten Bild rechts unten wird die Kohärenz der beiden Mikrofonsignale angezeigt, die so nahe wie möglich bei 1 liegen sollte. Der angezeigte Kohärenzgrad sollte in der Praxis zumindest 0,9 betragen.

### 5.3.2 Speaker Transfer Function (STF)

Für diese Messung wird die Geräuschquelle ausgeschaltet, da während der Messung ein MLS-Pseudorauschsignal über den Lautsprecher abgespielt wird.

| STF                   |            | ANC Tasks |
|-----------------------|------------|-----------|
| STF Spk File: stf_spk | STF        | MTF       |
| STF Mic File: stf_mic | 1          |           |
| Period: 20            | [Sec]      | 511       |
| Noise Gain: 0.1       | [0.0-0.99] | EC        |

Abb. 5.12: STF-Messung (links: Monitor, rechts: S-ANC Tool)

- 1. Monitor: "STF" drücken, um Messung zu starten. Als "Noise Gain" hat sich ein Wert von 0,1 als praktisch erwiesen. Die anderen Einstellungsmöglichkeiten sind ident zur MTF-Messung.
- 2. S-ANC: Klick auf "STF", um die Lautsprecher-Übertragungsfunktion zu berechnen und das Analyse-Fenster aufzurufen.



Abb. 5.13: Analyse STF-Messung

In Abb. 5.13 links unten sind das gemessene Spektrum  $U_{error}$  (rote Kurve) und das mittels der STF berechnete Spektrum  $\tilde{U}_{error,STF}$  (blaue Kurve) zu sehen, welche perfekt übereinstimmen. Die Kohärenz ist ebenso über den gesamten Frequenzbereich fast bei 1, die Bestimmung der STF funktioniert also sehr gut.

#### 5.3.3 Echo Cancellation (EC)

Für die letzte Messung bleibt die Geräuschquelle ausgeschaltet und es wird wieder ein MLS-Signal über den Lautsprecher abgespielt.

| EC           |        |            | ANC Tasks |
|--------------|--------|------------|-----------|
| EC Spk File: | ec_spk | EC         | MTF       |
| EC Mic File: | ec_mic | 1          |           |
| Period:      | 20     | [Sec]      | STF       |
| Noise Gain:  | 0.1    | [0.0-0.99] | EC 2      |

Abb. 5.14: EC-Messung (links: Monitor, rechts: S-ANC Tool)

- 1. Monitor: "EC" drücken, um Messung zu starten. Die anderen Einstellungsmöglichkeiten bleiben wie bei der STF-Messung.
- 2. S-ANC: Klick auf "EC", um die Lautsprecher-Übertragungsfunktion zu berechnen und das Analyse-Fenster aufzurufen.



Abb. 5.15: Analyse EC-Messung

Auch hier zeigt sich bis auf ein paar Extrempunkte eine gute Übereinstimmung der Spektren  $U_{ref}$  (gemessen, rote Kurve) und  $\tilde{U}_{ref}$  (über EC bestimmt, blaue Kurve). Das Kammfiltermuster ist auf Reflexionen im Kanal zurückzuführen. Dieses spiegelt sich auch bei der Betrachtung der Kohärenz wieder.

### 5.4 ANC-Simulation / Stability Adjustment



Abb. 5.16: ANC-Simulation / Stability Adjustment Low Frequencies

Sind alle Übertragungsfunktionen bestimmt, kann als nächstes in der S-ANC Tool Software eine ANC-Simulation durchgeführt werden. In vielen Fällen kommt es hier aber zu einer Fehlermeldung, dass die Ausgabewerte des Lautsprechers über 1 liegen. Um dies zu lösen, wählt man im Bereich "Stability Adjustment" im Drop-Down-Menü den Punkt "Enable" aus. Da die Überschreitung der Werte laut Silentium bei sehr tiefen Frequenzen auftritt, wird im Reiter "Low Frequencies" unter dem Punkt "Magnitude" die gewünschte Abschwächung eingetragen (Wert von 1000 wurde empirisch ermittelt; genauere Angaben zu den Parametern Fstop, Fpass und Magnitude wurden von der Firma Silentium nicht preisgegeben). Danach kann die ANC Simulation erneut gestartet werden.



Abb. 5.17: ANC-Simulation mit Stability Adjustment bei tiefen Frequenzen

Das Ergebnis der ANC-Simulation ist in Abb. 5.17 zu sehen. Bei höheren Frequenzen erkennt man, dass der Lautsprecher relativ hohen Pegel abstrahlt (rote Kurve) und teilweise mit aktivierter ANC (grün) der Pegel höher als ohne ANC (blau) ist. Nachdem das System sowieso nur bis ca. 1600 Hz gut funktioniert, kann man sich hier mit dem Stability Adjustment für hohe Frequenzen weiterhelfen.

| nable 👻   | Low F | Frequencies | High Frequencies |           |
|-----------|-------|-------------|------------------|-----------|
| Ţ         |       | Fstop       | Fpass            | Magnitude |
|           |       | 2000        | 6000             | 1         |
| Save      | •     | 6000        | 8000             | 1         |
| Stability | *     |             |                  |           |

Abb. 5.18: Stability Adjustment High Frequencies

Trägt man beim Stability Adjustment im Reiter "High Frequencies" die gewünschte Abschwächung bei "Magnitude" ein (Wert von 1 empirisch ermittelt), sieht die erneute ANC Simulation aus wie folgt:



Abb. 5.19: ANC-Simulation mit Stability Adjustment bei tiefen und hohen Frequenzen

Hier kann man erkennen, dass der Lautsprecher-Ausgabepegel bei hohen Frequenzen um einiges geringer als ohne Stability Adjustment ist und so auch die Pegel der Kurven mit und ohne ANC bei hohen Frequenzen nun annähernd gleich sind.

Nach erfolgreicher Simulation wird von dem S-ANC Tool automatisch ein PF (prediction filter) File erzeugt, welches wiederum von der Monitor-Software benötigt wird, um die ANC auszuführen.

# 5.5 Starten der ANC

| Go Dsp   | Stop Dsp         | Reset Dsp         | Config DSP  | Communication L           | evel:  | 99%  |
|--|------------------|-------------------|---|---------------------------|--|--|
| Work Work  | Options          | MTF               | ANC<br>PF File: pf<br>EC File: ec                             |                           | Microphone Scopes –<br>Ref Mic                         |  |
| Period:  | 20               | Sec]              |   |                           | Err Mic  |  |
| TF<br>STF Spk File: <mark>s</mark><br>STF Mic File: <b>s</b> | stf_spk          | STF               | Test Performance<br>Before ANC File: en<br>After ANC File: en | _mic_before<br>_mic_after | Spk  |  |
| Period: 7<br>Noise Gain: 7                                   | 20 [\$<br>D.1 [0 | Sec]<br>).0-0.99] | Test Perform  | nance                     | Scube Version:<br>Program Version:                     | 5.2  |
| C<br>C Spk File: [e  | ec_spk           | EC                | Test Spk<br>Period: 150                                       |                           | DSP ID:<br>Mode Of Work:<br>Ref Mic Gain[0-7]          | 102.1<br>10<br>MTF<br>动(4 政)   |
| C Mic File: <sub>[e</sub><br>'eriod: [2<br>loise Gain: [7    | ec_mic<br>20 [٩  | Sec]<br>).0-0.99] | Test Spl  |                           | Err Mic Gain[0-7]:<br>Spk Gain[0-7]:<br>Amp Gain[0-3]: | 取え<br>一<br>取え<br>の<br>成<br>の<br>成<br>の<br>の<br>の<br>の<br>の<br>の<br>の<br>の<br>の<br>の<br>の<br>の<br>の |
|  |                  |                   | 2 Auto Sta  | rt                        | AutoStart  | 0  |

Abb. 5.20: Starten der ANC in der Monitor-Software

- 1. Durch Klick auf den "ANC"-Button wird der DSP gestartet und die Anzeige im oberen Bereich wechselt von "Stop DSP" auf "Go DSP". Bei vollständig ausgeführter Kalibrierung sollte die Funktion des ANC-Systems nun hörbar sein.
- 2. "Auto Start" setzt den DSP in den automatischen Modus, sodass keine PC-Verbindung zur Steuerung des DSP mehr notwendig ist. Wenn die Platine mit Strom versorgt wird, wird sofort die ANC-Funktion aktiviert, das heißt der Lautsprecher sendet ständig einen zu dem am Referenzmikrofon gemessenen Schall gegenphasigen "Antischall" aus.

# 6 Messungen

### 6.1 Sockel & Gesamtgerät ohne ANC-Einbau

Um die ANC-Performance evaluieren zu können, wurden zunächst Messungen des Gesamtgerätes und des Sockels ohne eingebautem ANC-System durchgeführt. Diese Messungen sind dabei hilfreich, die Stärke der einzelnen Geräuschquellen zu finden und die Unterschiede zwischen reinem Sockel und Komplettgerät zu untersuchen.



Abb. 6.1: Messpositionen

Bei obigen 8 Messpositionen wurde der Schalldruckpegel in Terzbändern mit Hilfe eines NTI XL2 Audio Analysators gemessen. Die Messpunkte 1 & 3 befinden sich jeweils 14cm innerhalb des linken bzw. rechten Kanals (direkt an der Stelle des später eingebauten Lautsprechers), Messpunkte 2 & 4 sind genau in einer Linie mit der Gerätekante, Messpunkte 5, 6 & 7 sind 50cm vom Gerät entfernt und Messpunkt 8 ist schließlich mittig 1m entfernt.

Die jeweilige Messdauer pro Position betrug 20 Sekunden. Um möglichst geringen Fremdgeräuschpegel zu erhalten, wurden die Messungen im Tonstudio des SPSC durchgeführt. Alle nachfolgenden Schalldruckpegel sind A-bewertet, da sowohl die Ergebnisse der Silentium-Software als auch die Schallleistungsmessungen A-bewertet sind und so der Vergleich leichter fällt.



Abb. 6.2: Messung Gesamtgerät (links) und Sockel (rechts) jeweils bei Messposition 8

#### 6.1.1 Fremdgeräusch

Im SPSC-Tonstudio gibt es eine regelbare Lüftungsanlage, die bei Bedarf abgeschaltet werden kann.



Abb. 6.3: Fremdgeräusch Tonstudio

Man sieht, dass bei ausgeschalteter Lüftung und tiefen Frequenzen der Fremdgeräuschpegel ca. -3 dB(A) beträgt; zu hohen Frequenzen steigt der Pegel an und erreicht bei 5000Hz das Maximum von ca. 17 dB(A).











Abb. 6.6: Messung Sockel bei Position 8

Zunächst wird der Sockel alleine bei zwei Betriebszuständen des Lüfters und acht Messpositionen untersucht. Schon hier wurde der Kompressor nicht mehr beachtet, weil wie sich im folgenden Kapitel 6.1.3 herausstellen wird, der Lüfter den größten Anteil des Geräuschpegels ausmacht. In den obigen Diagrammen sind die Messungen bei den Positionen 2, 5 und 8 dargestellt. Messpunkt 2 ist interessant, weil sich hier auch das Fehlermikrofon bei der ANC Kalibrierung befindet. Die Messpunkte 5 und 8 wurden gewählt, um die Schalldrücke bei größeren Entfernungen zur Schallquelle zu untersuchen.

Aus der Messung bei Messposition 2, also direkt vor dem linken Kanal des Sockels, können folgende Schlüsse gezogen werden: Wird der Lüfter mit 12V betrieben, ist klarerweise der Schalldruckpegel über den kompletten Frequenzbereich höher als bei 7V. Es tritt ein lokales Minimum bei 160 Hz und ein Maximum bei 1000 Hz auf. Weiters ist zu erkennen, dass der Schalldruck ab 1000 Hz stetig abfällt. Zum Vergleich ist in Abb. 6.6 die Messung bei Position 8, der entferntesten Messposition, zu sehen. Hier fällt auf, dass die gemessenen Pegel schon sehr klein und bei 7V schon ab 1600 Hz in dem Bereich des Fremdgeräuschs sind. Erneut treten bei 160 Hz und 1000 Hz Minimum bzw. Maximum auf, zusätzlich bildet sich hier noch ein Maximum bei 400 Hz aus.

#### 6.1.2 Gesamtgerät







Abb. 6.8: Messung Gesamtgerät bei Position 4





33



Abb. 6.11: Messung Gesamtgerät bei Position 8

Das Ziel der Messung des Gesamtgerätes besteht primär darin, zu überprüfen, welche Komponenten maßgeblich an der Schallabstrahlung des Geräts verantwortlich sind. Dafür wurde jede Komponente einzeln über den Kundendienstmodus mit höchster Stufe angesteuert und die Schalldruckpegel verglichen. Man sieht deutlich in allen Abbildungen, dass bei höchster Stufe die dominierende Komponente der Sockellüfter ist. Die Summenpegel der Innenventilation befinden sich im Bereich des Grundrauschens, können also vernachlässigt werden. Die Aussagekraft der Kompressor-Messungen ist mit Vorsicht zu genießen, da dieser kein stationäres Geräusch von sich gibt, sondern in unregelmäßigen Abständen gurgelnde Laute von sich gibt. Da diese Effekte durch ein ANC-System kaum gemindert werden können, liegt es nahe, sich komplett auf die Verringerung des durch den Sockellüfters verursachten Schalldruckpegels zu konzentrieren.



#### 6.1.3 Vergleich Sockel / Gesamtgerät

Abb. 6.12: Vergleich von Sockel & Gesamtgerät, Messposition 2



Abb. 6.13: Vergleich von Sockel & Gesamtgerät, Messposition 5



Abb. 6.14: Vergleich von Sockel & Gesamtgerät, Messposition 8

Um zu verifizieren, dass Sockel und Gesamtgerät ähnliches Verhalten zeigen, werden deren Messungen in Abb. 6.12 bis 6.14 gegenübergestellt.

Man sieht, dass die Messwerte bei 12V (blaue und rote Balken) und bei 7V (grüne und lila Balken) bei beiden Messpositionen ähnlich sind. Starke Abweichung von Sockel und Komplettgerät zeigt sich einzig bei 1000 Hz. Auffällig ist, dass die erhaltenen Messwerte des Sockels höher sind als die des Komplettgerätes. Dies kann daran liegen, dass im Sockel der Verflüssiger im linken Kanal und zwei Absorberelemente im rechten Kanal entnommen wurden.

### 6.2 Sockel mit selbstgebautem Gehäuse & ANC

Im nächsten Schritt wird der Sockel mit selbstgebautem Gehäuse (siehe Kapitel 4.2.1) mit aktivierter ANC-Funktion gemessen und mit der Simulation aus der S-ANC Software verglichen. Die Lüfterspannung beträgt hier 12V, da hier höhere Pegel vom Lüfter erzeugt werden und die Funktion der ANC besser gezeigt werden kann.



#### 6.2.1 Simulation mit S-ANC Software

Abb. 6.15: Simulation der ANC-Wirkung an MP2 bei Sockel mit selbstgebautem Gehäuse

In obigem Diagramm ist die FFT-Messung des Fehlermikrofons (blaue Kurve) der berechneten Simulation für aktivierte ANC (grüne Kurve) gegenübergestellt. Weiters ist der Speaker Output in rot dargestellt.

Es ist zu sehen, dass eine Summenpegelreduktion von 6,2 dB(A) zu erwarten ist. Diese wird im Bereich von 200 - 1600 Hz erreicht. Ab 1600 Hz ist keine Wirkung zu sehen und bis ca. 200 Hz ist der erwartete Pegel bei eingeschalteter ANC sogar höher. Wichtig ist hier zu erwähnen, dass sich die Simulation auf die Position des Fehlermikrofons bezieht, welche der Messposition 2 entspricht.



#### 6.2.2 Messung mit NTI Analysator







Abb. 6.17: Vergleich des Sockels mit selbstgebautem Gehäuse mit und ohne ANC, Messposition 5



Vergleicht man Abb. 6.16 (Messposition 2) mit der Simulation, kann man eine hohe Übereinstimmung erkennen. Zwar stimmen die Absolutwerte nicht überein, die größte Pegelreduktion wird aber auch wie in der Simulation im Bereich von 200 – 1600 Hz erreicht und bei 160 Hz ist der Pegel höher als ohne ANC.

Bei Messposition 2 wird eine Reduktion des Summenpegels von 65,6 auf 57,6 dB(A) [= 8 dB(A)], bei Position 5 von 43,8 auf 39,2 dB(A) [= 4,6 dB(A)] und bei Position 8 von 40,5 dB(A) auf 36,4 dB(A) [= 4,1 dB(A)] erreicht.

## 6.3 Sockel aus Musterbau & ANC

Nun wird für den Sockel aus dem Musterbau (siehe Kapitel 4.2.2) Simulation und Messung verglichen. Die Lüfterspannung beträgt erneut 12V.



#### 6.3.1 Simulation mit S-ANC Software

Abb. 6.19: Simulation der ANC-Wirkung an MP 2 bei Sockel aus Musterbau

Es ist zu erkennen, dass bei der Messung ähnliche Werte wie bei dem Sockel mit selbstgebautem Gehäuse zu erwarten sind. Die simulierte Summenpegelreduktion beträgt hier 7,5 dB(A).



## 6.3.2 Messung mit NTI Analysator







Abb. 6.21: Vergleich des Sockels aus Musterbau mit und ohne ANC, Messposition 5

Abb. 6.22: Vergleich des Sockels aus Musterbau mit und ohne ANC, Messposition 8

Auch die Messungen zeigen, dass sich die beiden Gehäusearten kaum unterscheiden. Hier wird eine Verbesserung des Summenpegels von 65,6 auf 58,8 dB(A) [= 6,8 dB(A)] bei Messposition 2, von 43,8 auf 38,6 dB(A) [= 5,2 dB(A)] bei Position 5 und von 40,5 auf 34,9 dB(A) [= 5,6 dB(A)] bei Position 8 erreicht.

### 6.4 ANC-Evaluierung (Sockel)

#### 6.4.1 Sockelvergleich

Folgend sind die Messergebnisse der zwei Gehäusearten mit ANC und des Sockels vor dem ANC-Einbau bei 12V Lüfterspannung in drei Diagrammen zusammengefasst.



Abb. 6.23: Vergleich der Sockelgehäuse-Varianten, Messposition 2



Abb. 6.24: Vergleich der Sockelgehäuse-Varianten, Messposition 5



Abb. 6.25: Vergleich der Sockelgehäuse-Varianten, Messposition 8

Hier ist zu sehen, dass je nach Frequenzbereich und Messposition einmal das Selbstbaugehäuse und einmal das Musterbau-Gehäuse bessere Ergebnisse liefert, wodurch man mit dieser Betrachtungsweise keinen eindeutigen Favoriten festlegen kann. Aufgrund der Vorteile bei Einbau, Konstruktion und Wartung wird ab hier aber nur mehr der Sockel aus dem Musterbau weiter behandelt.

#### 6.4.2 Erreichbare ANC-Performance (Sockel aus Musterbau)

In diesem Abschnitt wird die schlussendlich erreichbare ANC-Performance des Sockels aus dem Musterbau bei drei Messpositionen und zwei Lüfterspannungen untersucht. Um die Messsituation so nah wie möglich an die des Komplettgerätes zu bringen, wurde bei diesem Schritt der Verflüssiger wieder in den Sockel eingebaut und in dessen Mitte ein Absorber platziert.



Abb. 6.26: ANC-Performance bei 12V Lüfterspannung, Messposition 2





Abb. 6.27: ANC-Performance bei 12V Lüfterspannung, Messposition 5



Abb. 6.28: ANC-Performance bei 12V Lüfterspannung, Messposition 8

Bei 12V Lüfterspannung werden für den Summenpegel gute Ergebnisse erreicht. Bei Messposition 2 wurden 9,5 dB(A), bei Position 5 5,9 dB(A) und bei Position 8 5,2 dB(A) weniger gemessen. Bei allen Messpositionen wird die größte Wirkung im Frequenzbereich von 200 – 1250 Hz erzielt. Betrachtet man die 125 Hz und 160 Hz - Terzen bei den Messpositionen 5 und 8, erkennt man, dass es hier zu einer Verschlechterung kommt und der Pegel mit eingeschalteter ANC höher ist. Eine weitere Erkenntnis aus den Messungen ist, dass die Wirkung direkt bei der Lüfterkanalmündung am stärksten ist (dies war ja auch die Position des Fehlermikrofons bei der Kalibrierung) und mit größer werdendem Abstand zum Gerät immer schwächer wird.

Interessant wird es, wenn der Lüfter nur mehr mit 7V Spannung läuft. In Abb. 6.29 ist zu sehen, dass die ANC bis 1000 Hz noch immer wirkt, bei höheren Frequenzen aber ein erheblicher Anteil an Rauschen hinzukommt (die Kalibrierung wurde mit der 12V-Stufe durchgeführt!). Bei Messposition 2 wird eine Summenpegelreduktion von 4,9 dB(A) erreicht. Bei den Messpositionen 5 und 8 sind es nur noch je 1,5 dB(A).



Abb. 6.29: ANC-Performance bei 7V Lüfterspannung, Messposition 2



Abb. 6.30: ANC-Performance bei 7V Lüfterspannung, Messposition 5



Abb. 6.31: ANC-Performance bei 7V Lüfterspannung, Messposition 8

## 6.5 ANC im Gesamtgerät

Auf den Sockel aus dem Musterbau mit eingebautem ANC-System wurde schlussendlich wieder ein Gesamtgerät aufgebaut und erneut die ANC-Performance gemessen.



Abb. 6.32: ANC-Performance bei 12V Lüfterspannung, Messposition 2, Sockel



Abb. 6.33: ANC-Performance bei 12V Lüfterspannung, Messposition 2, Gesamtgerät

Aus obigen Abbildungen können Vergleiche zur ANC-Performance von Sockel und Gesamtgerät gezogen werden. Bis auf die 100 Hz - Terz ist die Pegelreduktion beim Gesamtgerät geringer als beim Sockel und der wirklich wirksame Frequenzbereich beschränkt sich auf 250 – 800 Hz. Außerdem kommt es bei 125 Hz und 1600 Hz zu einer Verschlechterung bei aktiver ANC.

# 7 Weitere Optimierung

Aufgrund der Ergebnisse aus den Messungen (Kapitel 6) und vor allem der Tatsache, dass bei aktivierter ANC teilweise eine Erhöhung des gemessenen Schalldruckpegels entstanden ist, wurden gegen Ende der Arbeit erneut verschiedene Parametereinstellungen des "Stability Adjustment" untersucht. Zunächst ist ein Vergleich der Simulation mit den Einstellungen aus Kapitel 6 und der Simulation mit den neu ermittelten Werten zu sehen. Diese neuen Werte stellen das Optimum dar, das aus einer Vielzahl an Parametervariationen, die stark von den von Silentium empfohlenen Werten abweichen, gefunden wurde.



Im Vergleich zu Abb. 7.1 sieht man in Abb. 7.2 eine deutliche Verbesserung der grünen Kurve bei tiefen Frequenzen. Dies wurde hauptsächlich durch die Optimierung der Low Frequency Stability Adjustment Parameter erreicht. Die Vermutung liegt hier nahe, dass die implementierten Filter nicht linearphasig arbeiten und somit im Wirkungsbereich des Filters die Phasenlage und somit auch die ANC-Funktion stark beeinflussen.

In Abb. 7.3 und Abb. 7.4 sind die Schalldruckpegel-Messungen für die Parameterwerte aus Kapitel 6 und für die optimierten Parameterwerte zu sehen. Hier ist eine deutliche Verbesserung über den kompletten dargestellten Frequenzbereich von 100 - 2000 Hz zu erkennen.



Abb. 7.3: ANC-Performance für Stability Adjustment-Werte aus Kapitel 6 (12V Lüfterspannung, MP2, Gesamtgerät)



Abb. 7.4: ANC-Performance für optimierte Stability Adjustment-Werte (12V Lüfterspannung, MP2, Gesamtgerät)

# 8 Fazit / Ausblick

Abschließend kann man sagen, dass die Anwendung eines Active Noise Cancellation-Systems in Elektrogeräten mit vorhandenem Kanalsystem auf jeden Fall sinnvoll ist. Dies zeigen die erreichten Ergebnisse:

- Erste Optimierung (Kapitel 6)
  - Sehr gute Pegelreduktion von 200 Hz 1250 Hz im Nahfeld
  - Gute Pegelreduktion von 250 Hz 1250 Hz im Fernfeld
  - Sehr gute Reduktion des Summenpegels im Nahfeld
  - Gute Reduktion des Summenpegels im Fernfeld
  - Aber: Unter 200 Hz und über 1250 Hz kann es zu Verschlechterungen kommen → weitere Optimierung
- Weitere Optimierung (Kapitel 7)
  - Sehr gute Pegelreduktion von 100 Hz 1250 Hz im Nahfeld

Das verwendete Silentium-Kit bietet ein geeignetes Werkzeug zur Einarbeitung in die ANC-Thematik und es sind schnelle erste Ergebnisse erreichbar, jedoch ist man andererseits auch auf die mitgelieferten Möglichkeiten beschränkt. Teilweise ist die genaue Funktionsweise schlecht dokumentiert, wodurch man nur durch Ausprobieren auf die besten Parameter kommt. Ebenso arbeiten die implementierten Filter nicht linearphasig, was eine Verschlechterung der ANC-Performance zur Folge hat.

Daher bietet es sich an, mit den erarbeiteten Erkenntnissen im nächsten Schritt das komplette System selbst zu entwickeln. Die LMS-Algorithmen dafür sind frei zugänglich, weshalb sich die Arbeit hauptsächlich auf die Steuerung des DSP, den Entwurf der Analysemöglichkeiten und das Filterdesign beschränken würde. Damit wäre es möglich, tiefer in die ANC-Funktion einzugreifen und damit die Performance weiter zu steigern. Weiters steckt in der Optimierung des Lautsprechergehäuses eine zusätzliche Verbesserungsmöglichkeit.

# 9 Literaturverzeichnis

[SILHP] Silentium Homepage, http://www.silentium.com/products/s-cube-development-kit, 10.01.2017

[NTI] NTI Homepage, http://www.nti-audio.com, 12.01.2017

[BÖ] Sten Böhme, Hamburg 2010, System zur aktiven Reduktion der Schallabstrahlung von Lärmquellen, Diss., Fakultät für Maschinenbau der Helmut- Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg

[WIL] Bachelorarbeit Thomas Wilding, "ANC", TU Graz, 2013

[MOSCH] G. Moschytz, "Adaptive Filter", Springer-Verlag, 2000

# **10** Anhang

## **10.1 Monitor Software**

| Scube On C    | OM3      | -               |                  |                      |                    |       |
|---------------|----------|-----------------|------------------|----------------------|--------------------|-------|
| Go Dsp        | Stop D   | lsp 🧭 Reset Dsp | Config DSP       | Communication Level: | *****              | 99%   |
| 💁 Work        | Options  |                 |                  | Mic                  | crophone Scopes -  |       |
| MTF           |          |                 | ANC              | Ref                  | lic                |       |
| Ref Mic File: | ref_mic  | MTF             | PF File: pf      |                      |                    |       |
| Err Mic File: | lor min  |                 | EC File: ec      |                      |                    |       |
|               | leu-inc  |                 |                  | Err N                | lic                |       |
| Period:       | 7        | [Sec]           | ANC              |                      |                    |       |
| STF           |          |                 | Test Performance | Y                    |                    |       |
| STF Spk File  | stf_spk  | STF             | Before ANC File: | nia hafara           |                    |       |
| STF Mic File: | etf mic  |                 | After ANC File:  | mic_berore op        |                    |       |
| Deried        |          | - ISaal         | jon-             |                      | )                  |       |
| renou.        | 17       | [Sec]           |                  |                      | Scube Version      | 5.2   |
| Noise Gain:   | 0.305    | [0.0-0.99]      | lest Perform     | ance                 | Program Version:   | 52.4  |
| r             |          |                 | Tael Snk         |                      | DSP ID:            | 0     |
| EC Sok File:  | leo, enk |                 | Period: 150      |                      | Mode Of Work:      | NOISE |
|               | lec_shr  |                 | 1000             |                      | Ref Mic Gain[0-7]  | 103   |
| EC Mic File:  | ec_mic   |                 | Test Spi         | c                    | Err Mic Gain[0-7]: | 助[3   |
| Period:       | 7        | [Sec]           |                  |                      | Spk Gain[0-7]:     | 政(3   |
| Noise Gain:   | 0.305    | [0.0-0.99]      |                  | 1                    | Amp Gain[0-3]:     | 助(3   |
|               |          |                 | Auto Star        | t I                  |                    |       |
|               |          |                 |                  |                      | Auto Cana          | 6     |
|               |          |                 |                  |                      | Autostart          | 10    |

|                | Ref Mic File   | Dateiname des aufgenommenen Referenzmikrofon-Files        |  |  |
|----------------|----------------|---|--|--|
| MTF            | Error Mic File | Dateiname des aufgenommenen Errormikrofon-Files           |  |  |
|                | Period         | Dauer der MTF Messung in Sekunden                         |  |  |
|                | STF Spk File   | Dateiname das Speaker-Signals                             |  |  |
| STE            | STF Mic File   | Dateiname das aufgenommenen Errormikrofon-Files           |  |  |
| 511            | Period         | Dauer der MTF Messung in Sekunden                         |  |  |
|                | Noise Gain     | Amplitude des MLS-Signals, das dem Speaker zugeführt wird |  |  |
|                | EC Spk File    | Dateiname das Speaker-Signals                             |  |  |
| ЕС             | EC Mic File    | Dateiname das aufgenommenen Referenzmikrofon-Files        |  |  |
| EC             | Period         | Dauer der MTF Messung in Sekunden                         |  |  |
|                | Noise Gain     | Amplitude des MLS-Signals, das dem Speaker zugeführt wird |  |  |
| ANC            | PF File        | Dateiname des PF-Files, erstellt in S-ANC-Tool            |  |  |
| ANC            | EC File        | Dateiname des EC-Files, erstellt in S-ANC-Tool            |  |  |
| Test           | Before ANC     | Dateiname des Frequenzgang-Files vor ANC-Anwendung        |  |  |
| Porformanaa    | File           |   |  |  |
| After ANC File |                | Dateiname des Frequenzgang-Files nach ANC-Anwendung       |  |  |
| Test Spk       | Period         | Dauer des Speaker-Tests in Sekunden                       |  |  |
|                | Ref Mic Gain   | Mikrofonvorverstärkung für Referenzmikrofon               |  |  |
| Gaing          | Err Mic Gain   | Mikrofonvorverstärkung für Errormikrofon                  |  |  |
| Gallis         | Spk Gain       | Verstärkung des D/A-Konverters vor dem Speaker            |  |  |
|                | Amp Gain       | Verstärkung des Leistungsverstärkers vor dem Speaker      |  |  |

#### Verstärkungsfaktoren:

|   | Mikrofonvorverstärker<br>Gain [dB] | D/A-Konverter<br>Gain [dB] | Leistungsverstärker<br>Gain [dB] |
|---|------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| 0 | 0                                  | -15                        | 12                               |
| 1 | 6                                  | -12                        | 18                               |
| 2 | 12                                 | -9                         | 23,6                             |
| 3 | 18                                 | -6                         | 36                               |
| 4 | 20                                 | -3                         |                                  |
| 5 | 26                                 | 0                          |                                  |
| 6 | 32                                 | 3                          |                                  |
| 7 | 38                                 | 6                          |                                  |

| Go Dsp                           | Stop Dsp              | Reset Dsp | Config DSP | Com      | municatio |
|----------------------------------|-----------------------|-----------|------------|----------|-----------|
| 🚴 Work 🥻                         | Options               |           |            |          |           |
| PC Environmen<br>Working Directo | t<br>pry: C:\ANC\Test |           |            | Brows    | se        |
| DSP Environme<br>Version:        | nt                    |           | Br         | owse 1 L | oad 1     |
| Program0                         |                       |           |            |          | and 1     |

In dem Reiter "Options" ist nur der Arbeitsordner unter "Working Directory" anzugeben, der mit jenem in der S-ANC-Tool Software übereinstimmen muss.

# **10.2 S-ANC Tool Software**

### 10.2.1 Hauptfenster

| S-ANC Tool  Plot Settings About License  Working Directory C:\  Control Contr |  |
|---|--|
| Silentium Silence in a Chip<br>ANC Tasks  | Work Signal Analysis Utilities<br>Transfer Function Diagram  |
| MTF<br>STF<br>EC  | Stability Adjustment   |
| ANC Operation<br>ANC Simulation<br>Test Performance   | Disable Cow Frequencies High Frequencies Low Frequencies Fstop Magnitude Save Stability Restore Defaults |

|                            | MTF              | Analyse der MTF-Messung                           |
|----------------------------|------------------|---|
| ANC Tasks                  | STF              | Analyse der STF-Messung                           |
|                            | EC               | Analyse der EC-Messung                            |
| ANC Operation              | ANC Simulation   | Anzeigen der ANC-Simulation                       |
| ANC Operation              | Test Performance | Anzeigen der erreichten ANC-Performance           |
| Stability                  | Dropdown-Menü    | Auswahl aus Disable, Enable, Advanced & Automatic |
| Stability<br>A divisitment | Low Frequencies  | Einstellbare Abschwächung für tiefe Frequenzen    |
| Aujustment                 | High Frequencies | Einstellbare Abschwächung für hohe Frequenzen     |

Das Stability Adjustment wird dann benötigt, wenn der Lautsprecher mit zu hohen Pegeln betrieben wird, wodurch es zu Verzerrungen kommt und das komplette System instabil werden kann.

| S-ANC Tool                                    |                 |                                  |                 |           |
|---|-----------------|----------------------------------|-----------------|-----------|
| lot Settings Abou                             | t License       |                                  |                 |           |
| 🕽 🛛 🚰 Working Direct                          | ory C:\         |                                  |                 |           |
| Silentium                                     | Sunce in a Chip | Work                             | Signal Analysis | Utilities |
| Select Signal File                            |                 | FIR File                         | Index           |           |
|   | DBA             | FIR                              |                 |           |
|   | DBA 🕅 1         | FIR                              |                 |           |
| Time Domain Plo<br>Spectrum Plot<br>Bode Plot |                 | Coherence Plot<br>Error PSD Plot |                 |           |

Unter dem Reiter "Signal Analysis" können zuvor aufgenommene Signale in verschiedenen Darstellungsarten angezeigt werden.

| 🕼 S-ANC Tool                                   |                                     |
|--|-------------------------------------|
| Plot Settings About License                    |                                     |
| 🥑 📴 Working Directory C:\                      |                                     |
| S-AAC TCCI<br>Wor<br>Silentium Sumer in a Chip | rk Signal Analysis Utilities        |
| Signal Generator                               | Transfer Function Calculator        |
| File Name                                      | Signal 1                            |
| Samples 64000                                  | Signal 2                            |
| Frequency                                      | File Name                           |
| Sampling Frequency 16000                       | Order 900                           |
| Amplitude 0.10                                 | Sampling Frequency 16000            |
| Sine O Pink Noise                              | Overlaping 0.5 🚖                    |
| Generate                                       | Calculate 1 - 2     Calculate 2 - 1 |
| Play   | Calculate                           |
|  |                                     |

Zusätzlich ist in der S-ANC Tool Software ein Signalgenerator und ein Übertragungsfunktionsberechner implementiert.

### 10.2.2 Settings

| NC Simulation Parameters | Signal Analysis | Parameters | File Names       | 6          |  |
|--------------------------|-----------------|------------|------------------|------------|--|
| Simulation Limits        |                 | Simulat    | ion Stability Li | mits       |  |
| Maximum SPK level        | 0.50 🜲          | Low        | Frequency L      | imits (Hz) |  |
|                          |                 | 0          | -                | 150        |  |
| Minimum MIC level        | 0.15 🚖          | High       | n Frequency L    | imits (Hz) |  |
|                          |                 | 200        | - 00             | 8000       |  |
| Maximum MIC level        | 0.25 🜩          | High       | Frequency M      | Max Bands  |  |
|                          |                 | 5          | -                |            |  |
|                          |                 |            |                  |            |  |
|                          |                 | 10         |                  |            |  |

| Simulation | Maximum SPK level        | Werte von Speaker Level und Referenzmikrofon-      |
|------------|--------------------------|--|
| Limita     | Minimum MIC level        | Input, unter bzw. über denen keine Simulation mehr |
| Linnts     | Maximum MIC level        | durchgeführt wird.                                 |
|            | Low Frequency Limits     | Erlaubte Frequenzbereiche, die im Hauptfenster     |
| Simulation | High Frequency Limits    | "Work" im Bereich "Stability Adjustment"           |
| Stability  |                          | eingegeben werden können                           |
| Limits     | High Frequency Max Bands | Maximal mögliche Anzahl an Frequenzbändern für     |
|            |                          | hohe Frequenzen                                    |

| NC Simulation Parameters | Signal Analysis Parameters | File Names      |
|--------------------------|----------------------------|-----------------|
| Frequency Domain An      | alysis Coh                 | erence Analysis |
| Sampling Frequency       | 16000                      | Frequency Range |
| Window Size              | 2048 2                     | 00 - 1000       |
| Overlapping              | 0.5                        |                 |
|                          |                            |                 |
|                          |                            |                 |
|                          |                            |                 |
|                          |                            |                 |
|                          |                            |                 |
|                          | _                          |                 |
| Restore Defaults         |                            | Save Cance      |

| Frequency | Sampling Frequency | Abtastfrequenz für die FFT-Anzeige                     |
|-----------|--------------------|--|
| Domain    | Window Size        | FFT-Fensterlänge                                       |
| Analysis  | Overlapping        | Überlappung der FFT-Fenster                            |
| Coherence | Frequency Range    | Frequenzbereich, in dem der Kohärenzgrad bestimmt wird |
| Analysis  |                    |  |

| and the second |          |           |                 |      | -              |
|----------------|----------|-----------|-----------------|------|----------------|
| MTF files      |          | STF files |                 |      |                |
| Ref Mic File   | ref_mic  |           | STF Mic File    |      | stf_mic        |
| Err Mic File   | err_mic  |           | STF Spk File    |      | stf_spk        |
| Spk TH File    | spk_thre | eshold    | STF             | File | stf            |
| EC files       |          |           | ANC fil         | es   |                |
| EC Mic File    | ec_mic   |           | PF File         |      | pf             |
| EC Spk File    | ec_spk   |           | Before ANC File |      | err_mic_before |
| EC File        | ec       |           | After ANC File  |      | err_mic_after  |
|                |          |           |                 |      |                |

Im Reiter "File Names" sind alle Dateinamen dargestellt, auf die zugegriffen wird bzw. die angelegt werden. Diese müssen mit jenen in der Monitor-Software übereinstimmen.