

---

BACHELORARBEIT

---

# RAUMAKUSTISCHE MESSUNGEN UNTER EINFLUSS VON STÖRSCHALL DURCH DROHNEN

---

durchgeführt am  
Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation  
Technische Universität Graz, Österreich

von  
Peter Wallis, 01531595

Betreuer:  
Dipl.-Ing. BSc Eric Kurz

Graz, 26. Mai 2020



## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

---

Graz, am

---

(Unterschrift)





# Abstract

Der Einsatz von Drohnen erfreut sich aufgrund der immer leichteren Zugänglichkeit vermehrter Beliebtheit. Sie werden sowohl für private als auch für gewerbliche Zwecke in vielerlei Hinsicht genutzt. Quadrocopter als Unterart der Drohnen finden beispielsweise Anwendung in der Filmindustrie, bei der Wetterbeobachtung oder im Transportwesen. Auch für militärische Zwecke und bei der Überwachung kommen Quadrocopter zum Einsatz. Ein weiterer interessanter Einsatzbereich für Quadrocopter wäre die Verwendung für automatisierte raumakustische Messungen. Allerdings ist dabei die Geräuschemission eines solchen Flugobjektes nicht zu vernachlässigen. In dieser Arbeit soll eine Machbarkeitsstudie durchgeführt werden, ob solch eine Messung mit einem Quadrocopter möglich ist.

Zuerst werden theoretische Aspekte für das weitere Verständnis der Arbeit erläutert. Weiters werden gewisse Störschallkompensationstechniken bei der Bestimmung der Nachhallzeit erläutert und allgemeine Eigenschaften der Abstrahlcharakteristik von Quadrocoptern besprochen. Es wurde eine reale Messung mit einem Quadrocopter durchgeführt. Diese Messdaten wurden ausgewertet und mit den zuvor erwähnten Störschallkompensationstechniken behandelt. Bei der Auswertung hat sich gezeigt, dass eine raumakustische Messung mit einem Quadrocopter unter gewissen Voraussetzungen möglich ist.

The use of drones is becoming increasingly popular due to the increasing ease of access. Both for private and commercial purposes they are used in many ways. Quadrocopters, a special kind of drones, are very popular for these purposes. For instance, usage reaches from video recordings to weather observation as well as logistics and transport. Furthermore, military purposes and public surveillance demand application of quadrocopters. Another interesting area of application for quadrocopters would be the use for automatized room acoustic measurements. Though the noise emission of such a flying object has to be taken into account. In this work a feasibility study is carried out to investigate whether such a measurement is possible with a quadrocopter. First, theoretical aspects for the further understanding of the work are explained. Furthermore reference is made to certain noise compensation techniques for determination of the reverberation time and general properties of the radiation characteristics of quadrocopters are shown.

A real measurement with a quadrocopter was carried out. This measurement data was evaluated and treated with the previously mentioned noise compensation techniques. The evaluation showed that a room acoustic measurement with a quadrocopter is possible under certain conditions.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>7</b>
1.1	Motivation . . . . .	7
1.2	Bestimmung der Nachhallzeit $T$ . . . . .	7
1.2.1	Verfahren mit abgeschaltetem Rauschen . . . . .	9
1.2.2	Verfahren der integrierten Impulsantwort . . . . .	9
1.3	Bestimmung der Raumimpulsantwort . . . . .	10
1.3.1	MLS - Maximum Length Sequence . . . . .	10
1.3.2	Kontinuierlicher Sinussweep . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Störschallkompensationstechniken</b>	<b>13</b>
2.1	Gesamte Impulsantwort . . . . .	13
2.2	Abschneiden der Impulsantwort . . . . .	13
2.2.1	Lundby-Algorithmus . . . . .	14
2.3	Abschneiden mit Korrekturterm . . . . .	15
2.4	Subtraktion des Störschalls . . . . .	16
2.4.1	Methode von Chu . . . . .	16
2.5	Abschneiden, Korrektur und Subtraktion . . . . .	17
2.6	Vergleich der verschiedenen Störschallkompensationstechniken . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Drohnen</b>	<b>21</b>
3.1	Schallabstrahlung von Quadrocoptern . . . . .	23
3.1.1	Zeitsignal . . . . .	23
3.1.2	Amplitudenspektrum . . . . .	24
3.1.3	Abstrahlcharakteristik . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Messung mit einem Quadrocopter</b>	<b>27</b>
4.1	Messung im HS i2 . . . . .	27
4.1.1	Messaufbau . . . . .	27
4.1.2	Messverfahren . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der Messung</b>	<b>33</b>
5.1	Impulsantwortmessung des HS i2 . . . . .	33
5.2	Messung im HS i2 mit Quadrocopter . . . . .	36
5.2.1	Quadrocopterposition oberhalb des Mikrofons, DP1 ( $r = 0,55m, \theta = 90^\circ$ ) . . . . .	36
5.2.2	Quadrocopterposition unterhalb des Mikrofons, DP2 ( $r = 1m, \theta = -90^\circ$ ) . . . . .	40
5.2.3	Quadrocopterposition an DP3 ( $r = 1m, \theta = -30^\circ$ ) . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>47</b>
6.1	Methode mit gesamter Impulsantwort . . . . .	47
6.2	Methode mit abgeschnittener Impulsantwort . . . . .	47
6.3	Methode mit abgeschnittener Impulsantwort und Korrektur . . . . .	48
6.4	Methode mit Subtraktion des Störschalls . . . . .	49
6.5	Methode mit Abschneiden, Subtraktion und Korrektur . . . . .	49
6.6	Auswertung über $T_{30}$ und EDT . . . . .	50
6.7	Vergleich der Methoden . . . . .	51
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>53</b>
7.1	Fazit . . . . .	53
7.2	Ausblick . . . . .	53



## 1

## Einführung

## 1.1 Motivation

Der Einsatz von Drohnen erfreut sich heutzutage in diversen Bereichen großer Beliebtheit. Sei es für zivile oder auch militärische Zwecke - die Nutzung von „unmanned aerial vehicles“, kurz UAVs hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Ein vielleicht noch unentdeckter, aber interessanter Einsatzbereich, wäre die Nutzung von Drohnen für raumakustische Messungen. Ziel ist es eine automatisierte raumakustische Messung mit hoher räumlicher Auflösung durchführen zu können. Der abgestrahlte Schall einer solchen Drohne hat jedoch erheblichen Einfluss auf die Güte einer raumakustischen Messung. In dieser Arbeit soll eine Machbarkeitsstudie in Bezug auf die Bestimmung von raumakustischen Parametern unter Einfluss von Störschall durch Drohnen durchgeführt werden.

Als Erstes wird in der Arbeit grundsätzlich auf die Bestimmung der Raumimpulsantwort und der Nachhallzeit eingegangen, da diese Parameter in der Raumakustik, als auch in der Problematik der Arbeit selbst, von essenzieller Wichtigkeit sind. Anschließend werden diverse Kompensationstechniken für störschallbehaftete Raumimpulsantworten untersucht. Als Nächstes wird das Problem an sich beleuchtet: die Drohne. Es wird eine allgemeine Einführung zu Drohnen gegeben und diverse Faktoren, welche für die akustischen Eigenschaften einer Drohne eine Rolle spielen, werden diskutiert.

In Abb. 1.1 ist das vereinfachte Signalmodell für die Problemstellung dargestellt. Die Variable  $x(t)$  ist das Eingangs- beziehungsweise Messsignal (z.B. Sinussweep oder MLS). Das LTI-System symbolisiert den zu vermessenden Raum und  $y(t)$  das Ausgangssignal von einem Messmikrofon. Das Ausgangssignal wird mit dem additiven Drohnenstörschall  $n_D(t)$  beaufschlagt.

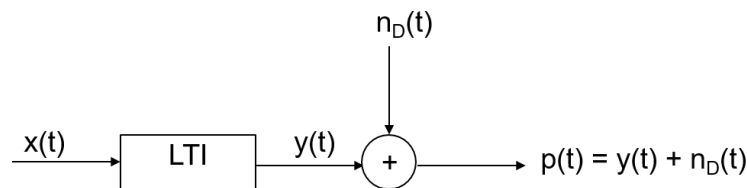


Abbildung 1.1: LTI-System mit Addition des Drohnenstörschalls.

## 1.2 Bestimmung der Nachhallzeit T

Die Nachhallzeit  $T$  ist wohl „der“ Parameter für die Bewertung eines Raumes in Hinsicht auf Klang und Akustik. Sie ist nicht nur der älteste, sondern auch der bekannteste Parameter für die raumakustische Evaluierung. Die Nachhallzeit  $T$  ist definiert als jene Zeit, die nach Abschalten einer Schallquelle vergeht, bis die mittlere Schallenergie auf ein Millionstel der Anfangsschallenergie abgeklungen ist. beziehungsweise jene Zeit bis der Schalldruck  $p$  auf ein Tausendstel seines Anfangswertes abgefallen ist. Dies entspricht einem Abfall von 60 dB [1]. Das menschliche Gehör

nimmt nach dem Abklingen der Schallquelle um 60 dB völlige Ruhe wahr. Dies ist auch der Fall, wenn der Grundgeräuschpegel sehr hoch ist. Grund dafür ist, dass das menschliche Gehör sich immer an den Maximalpegel anpasst. Der Mensch kann den Abklingvorgang nur so lange verfolgen, bis die Lautstärke des Nutzsignals unter den Grundgeräusch- oder Störgeräuschpegel fällt. Laut Sabine entspricht der Pegelabfall von 60 dB der Dynamik eines großen Orchesters. Die Wahrnehmung der Nachhalldauer des Menschen hängt somit nicht nur von der Nachhallzeit, sondern auch vom Anregungssignal für den Raum und vom Grundgeräuschpegel, der im Raum herrscht, ab.

An dieser Stelle noch kurz zum Begriff der Abklingkurve. Darunter versteht man die zeitliche Abnahme des Schalldruckpegels in einem Raum, nach Abschalten der Schallquelle. Diese Abklingkurve kann aus den zuvor genannten Verfahren ermittelt werden (vgl. Kap. 1.2.1, Kap. 1.2.2).

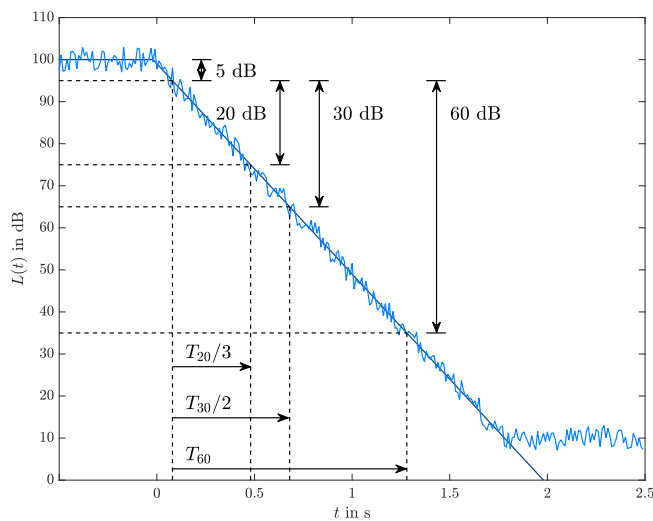


Abbildung 1.2: Beispiel einer Abklingkurve [2].

Bei Messungen der Nachhallzeit ist in den meisten Räumen ein Dynamikumumfang von 60 dB gar nicht zu erreichen. Deswegen wird normalerweise in einem Dynamikbereich von -5 dB bis -35 dB die Nachhallzeit bestimmt. Diese wird dann verdoppelt und als  $T_{30}$  gekennzeichnet angegeben. Eine andere gängige Größe ist  $T_{20}$ . Hier wird der Abfall von -5 dB bis -25 dB bestimmt und anschließend verdreifacht (siehe Abb. 1.2). Die sogenannte Anfangsnachhallzeit EDT (early decay time) wird auch des Öfteren verwendet. Sie ist mehr von den räumlichen Gegebenheiten abhängig und entspricht deswegen oft mehr dem subjektiven Empfinden der Nachhalldauer. Hier wird die Zeit für den Abfall von 0 dB bis -10 dB bestimmt und dann extrapoliert, um den 60 dB-Abfall zu ermitteln. Durch diese Größe ist auch erklärbar, dass die subjektive Empfindung der Nachhalldauer im Raum variieren kann.

Gleich wie andere Parameter in der Raumakustik, ist auch die Nachhallzeit eine frequenzabhängige Größe. Sie wird in Räumen für Sprach- und Musikdarbietungen vorzugsweise in Oktavfrequenzbändern zwischen 63 Hz bis 4 kHz gemessen. Für andere Zwecke kann auch in Terzbändern zwischen 100 Hz bis 5 kHz gemessen werden. Um eine ausreichende Bandbreite des Erregersignals zu gewährleisten, ist bei Messungen in Oktavbandbreite die Bandbreite größer als eine Oktave und bei Messungen in Terzbandbreite die Bandbreite größer als eine Terz zu wählen [3]. Bei der Messung der Impulsantwort wird aus der Steilheit des Pegelabfalls der terz- oder oktavfilterten

Raumimpulsantwort die Nachhallzeit berechnet [1].

Die Nachhallzeit T kann durch Abschalten des Anregungssignales in einem Raum mit dazu gehöriger Messung des Pegelabfalls ermittelt werden [4]. Diese Anregung kann mit einer impulsartigen Quelle stattfinden oder mit abgeschaltetem Rauschen. Eine weitere Möglichkeit heutzutage ist, dies mit computergestützten Messmethoden durchzuführen (Messung der Impulsantwort). Die verschiedenen Messmethoden unterscheiden sich darin, wie die Raumimpulsantwort gemessen wird. Voraussetzung aller Verfahren ist die Annahme eines diffusen Schallfeldes. Um hinreichende Diffusität zu erreichen, müssen die Erregersignale eine ausreichend hohe Energiedichte besitzen.

### 1.2.1 Verfahren mit abgeschaltetem Rauschen

Zur Anregung des Raumes wird ein Lautsprecher mit einem Rauschsignal genutzt. Rauschen ist ein in allen Frequenzen statistisch gleichmäßig verteiltes Signal mit sehr hoher Energie. Die Anregungsdauer über den Lautsprecher muss mindestens so lang sein, dass das Schallfeld den stationären Zustand erreicht, bevor der Schall abklingt. Laut der ISO 3382 muss das Signal mindestens die halbe Nachhallzeit lang abgestrahlt werden. Wegen der Zufälligkeit des Erregersignals sind mehrere Messungen notwendig. Es erfolgt eine anschließende Mittelung.

Die Mittelung der Messergebnisse kann nur über einen bestimmten Bereich oder über den ganzen Raum vollzogen werden. Die Mittelwertbildung kann über zwei Verfahren vorgenommen werden:

- Der Mittelwert wird von allen Nachhallzeiten aller Abklingkurven gebildet [4].
- Die Scharmittelung der quadrierten Abklingkurven des Schalldrucks und anschließendes Feststellen der Nachhallzeit für die sich ergebenden Abklingkurven. Dabei werden die einzelnen Abklingkurven mit synchronisierten Anfangspunkten überlagert und die Quadrate der Schalldruckverläufe für jedes Zeitintervall der Abklingvorgänge aufsummiert. Die Folge dieser Summen dient als gesamter Scharabklingvorgang zur Bestimmung von T.

$$E(t) = \sum_{i=1}^N \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau. \quad (1.1)$$

Die Abklingkurve sollte über einen Bereich von -5 dB bis -65 dB ausgewertet werden, um  $T_{60}$  zu bestimmen. Dafür würde man einen SNR von 75 dB benötigen, der oft nicht vorhanden ist. Deshalb wird oft über kleinere Bereiche wie zum Beispiel  $T_{30}$  gemessen. Hier muss der Störabstand zum Anfangspegel mindestens 45 dB betragen. Über den Bereich wird dann rechnerisch die Regressionsgerade angenähert. Die Neigung der Geraden ergibt den Pegelabfall pro Sekunde, woraus die Nachhallzeit T ermittelt wird [2].

### 1.2.2 Verfahren der integrierten Impulsantwort

Die Impulsantwort eines Raumes kann direkt gemessen werden. Die Anregung erfolgt mittels Pistolenknall, Rauschimpulsen, „Chirps“ oder Ähnlichem. Das Spektrum des Signals muss nur die hinreichende Breitbandigkeit besitzen. Weiters muss die Impulsschallquelle mindestens einen Spitzen-Schalldruckpegel erzeugen können, der 35 dB über dem Störpegel im jeweiligen Frequenzband liegt. Bei  $T_{30}$  ist es erforderlich, einen SNR von mindestens 45 dB zu erzeugen. Laut ISO 3382 dürfen auch besondere Signale, welche die Impulsantwort erst nach spezieller Verarbeitung liefern, angewendet werden (z.B. Sinus-Sweeps oder pseudo-statistisches Rauschen), wenn sie gewisse Kriterien der Norm erfüllen. Bei der Mittelung der Impulsantwort muss auch darauf geachtet werden, die gemessene Impulsantwort nicht zu verändern. Durch die Verwendung der elaborierten Verfahren (MLS und Sinussweep) kann ein verbesserter Signal-Stör-Abstand erreicht werden. Beim Verfahren der integrierten Impulsantwort ist die Abklingkurve jedes Oktavbandes

durch Rückwärts-Integration der quadrierten Impulsantwort zu erzeugen. Die Integration sollte im Idealfall, ohne Störpegel, am Ende der Impulsantwort beginnen und bis zum Beginn der Impulsantwort laufen ( $t \rightarrow \infty$ ) [3, 5].

$$E(t) = \int_t^\infty p^2(\tau) d\tau. \quad (1.2)$$

Hierbei ist  $p$  der Schalldruck als Funktion der Zeit,  $E$  die Energie der Abklingkurve als Funktion der Zeit und  $t$  die Zeit.

### 1.3 Bestimmung der Raumimpulsantwort

Die Messung der Raumimpulsantwort ist die Grundlage der raumakustischen Messtechnik. Aus der Raumimpulsantwort kann man anschließend diverse raumakustische Gütemaße bestimmen und die Nachhallzeit des Raumes berechnen. Ein Raum kann näherungsweise als lineares und zeitinvariantes akustisches Übertragungssystem aufgefasst werden (vgl. Abb. 1.1). Er wird durch seine Impulsantwort  $h(t)$  im Zeitbereich vollständig beschrieben.  $h(t)$  beschreibt den Schalldruckverlauf  $p(t)$  im Raum, nach der Anregung mit einem akustischen Impuls. Weitere Kenngrößen werden von  $h(t)$  abgeleitet. Die Schallenergiedichte  $w(t)$  und die kumulierte Schallenergie  $W(t)$  sind wie folgt definiert [1]:

$$w(t) \sim h^2(t). \quad (1.3)$$

$$W(t) = \int_0^t h^2(\tau) d\tau. \quad (1.4)$$

Ziel ist es, mit den in Kap. 2 vorgestellten Störschallkompensationstechniken aus der gemessenen Impulsantwort eine EDC (Energy Decay Curve) mit einem größtmöglichen Dynamikumfang abzuschätzen. Anhand der geschätzten EDC kann dann die Nachhallzeit  $T$  bestimmt werden. Es gibt verschiedene Verfahren, um die Raumimpulsantwort zu bestimmen. Die verschiedenen Verfahren unterscheiden sich bezüglich des Signal-Störabstands, der Messgenauigkeit und des Energiegehalts des Erregersignals. Die gängigsten Verfahren sind die MLS-Messung (Maximum Length Sequence) oder die Verwendung von verschiedenen kontinuierlichen Sinussweeps. Im Kap. 1.2 wird auch die Messung mit einer Impulsschallquelle erwähnt. Allerdings führen die MLS-Messung, sowie die Messung mit kontinuierlichen Sinussweeps, durch die einfache Wiederholbarkeit, zu besseren Messbedingungen als die Messung mit einer Impulsschallquelle [2].

Im Artikel von Guski und Vorländer [6], welcher im Kap. 2 noch von großer Relevanz ist, werden als Quellsignale Sinussweeps beziehungsweise ein MLS-Signal verwendet. Im nächsten Abschnitt soll auf diese Messsignale kurz eingegangen werden.

#### 1.3.1 MLS - Maximum Length Sequence

Das MLS-Signal ist ein periodisches, binäres Pseudozufallssignal (Pseudorauschen). Der Effektivwert eines MLS-Signals ist immer gleich 1 und gleicht daher dem Maximalwert des MLS-Signals (durch die Zuordnung der logischen Zustände 0 und 1 auf die physikalischen Werte -1 und +1). Das MLS-Signal besitzt, wie weißes Rauschen, ein konstantes Leistungsdichtespektrum. Bei der Messung mit einem MLS-Signal wird der Raum angeregt. Die Systemantwort wird gemessen, mit dem Erregersignal korreliert und man erhält die periodische Impulsantwort des Systems. Durch diese bestimmte Art der Berechnung der Impulsantwort (Kreuzkorrelation) fallen nun gewisse Anteile, die nicht mit dem MLS-Signal korrelieren, heraus (z.B. Klicken oder Husten). Somit ist die MLS-Messung unanfällig gegenüber solchen Störgeräuschen.



### **1.3.2 Kontinuierlicher Sinussweep**

Bei Sweeps unterscheidet man grundsätzlich zwischen linearen und exponentiellen Sweeps. Der lineare Sweep (weißes Spektrum) besitzt ein konstantes Leistungsdichtespektrum. Beim exponentiellen Sweep (rosa Spektrum) fällt das Leistungsdichtespektrum mit 3 dB pro Oktave hin zu hohen Frequenzen ab. Dies ist bei raumakustischen Messungen gewünscht, da viele natürliche Schallquellen ein ähnliches Spektrum besitzen. Die Impulsantwort lässt sich durch Entfaltung im Zeitbereich oder durch Spektraldivision im Frequenzbereich aus der aufgenommenen Systemantwort berechnen. Das Verfahren der direkten Entfaltung ist zur Berechnung der Impulsantwort, im Gegensatz zu anderen Methoden wie der MLS, unempfindlich auf Nichtlinearitäten des Messsystems beziehungsweise des zu untersuchenden Systems. Bei der Verwendung eines Sinussweeps in Verbindung mit Faltung mit der inversen des Sinussweeps, ist eine Trennung der linearen Impulsantwort von den Anteilen mit Verzerrungsprodukten möglich. Die Nichtlinearitäten werden durch Zeitfensterung eliminiert.



## 2

## Störschallkompensationstechniken

Bei raumakustischen Messungen hat Störschall immer einen großen Einfluss auf das Ergebnis und die Evaluierung weiterer wichtiger akustischer Parameter. Vor allem die Impulsantwort ist sensibel gegenüber Störgeräuschen. Raumakustische Parameter, die aus der Energiezerfallskurve (Energy-Decay-Curve, EDC) abgeleitet werden, wie zum Beispiel  $C_{80}$  oder  $D_{50}$ , sind robuster gegen Störschall. In den folgenden Kapiteln wird auf verschiedene Kompensationstechniken für Störschall bei der Bestimmung der EDC eingegangen.

Alle der anschließend vorkommenden Methoden nutzen die Impulsantwort als Eingangssignal. Diese wird mit der jeweiligen Kompensationstechnik behandelt und liefert eine entsprechende EDC (auch bekannt als Schröder Kurve) [6]. Die Nachhallzeitbestimmung erfolgt durch eine lineare Regression in einem gewissen definierten Dynamikbereich. Zu erwähnen ist auch noch, dass nur die ersten drei der nachfolgenden Methoden in der ISO 3382 [3] beschrieben sind.

In diesem Kapitel wird des Öfteren der Begriff PNR verwendet. Dies ist der Abstand zwischen dem höchsten vorkommenden Pegel des Störschalls zum eigentlichen Messsignal.

### 2.1 Gesamte Impulsantwort

Die erste Methode ist eigentlich gar keine Kompensationsmethode. Denn hier wird die gesamte Impulsantwort für die Rückwärtsintegration genutzt.

$$E(t) = \int_t^{t_{IR}} p^2(\tau) d\tau. \quad (2.1)$$

Hier haben die Störgeräusche eine große Überschätzung der EDC zur Folge. Die Größe des Fehlers nimmt mit der Länge der Impulsantwort  $t_{IR}$  zu (siehe Abb. 2.1).

### 2.2 Abschneiden der Impulsantwort

Bei dieser häufig verwendeten Kompensationsmethode wird die Impulsantwort zu einer bestimmten Zeit  $t_i$  abgeschnitten. Der Schnittzeitpunkt  $t_i$  wird dort gewählt, wo die Abklingkurve der Impulsantwort auf den konstanten Rauschteppich trifft (siehe Abb. 2.2).

$$E(t) = \int_t^{t_i} p^2(\tau) d\tau. \quad (2.2)$$

Der Fehler durch Störgeräusche wird durch diese Methode stark reduziert, jedoch wird nun ein weiterer Fehler produziert. Da nun die Energie nach dem Schnittzeitpunkt fehlt, läuft die EDC gegen minus Unendlich. Durch einen nun unlimitierten Dynamikbereich erlaubt diese Methode jedoch immer eine Auswertung der EDC, auch wenn der Signal-Störabstand unzureichend ist.

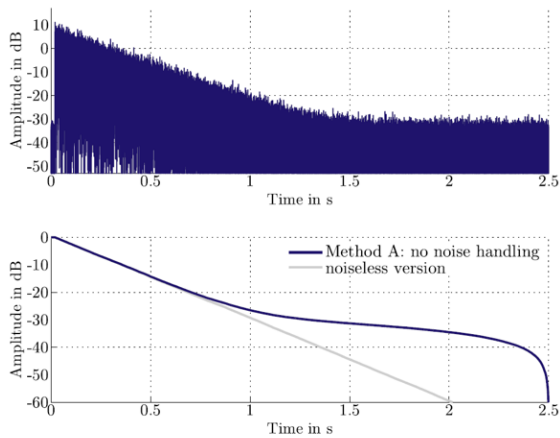


Abbildung 2.1: Beispiel einer Raumimpulsantwort mit zugehöriger Energy Decay Curve, bei Benutzung der vollen Impulsantwort für die Rückwärtsintegration [6].

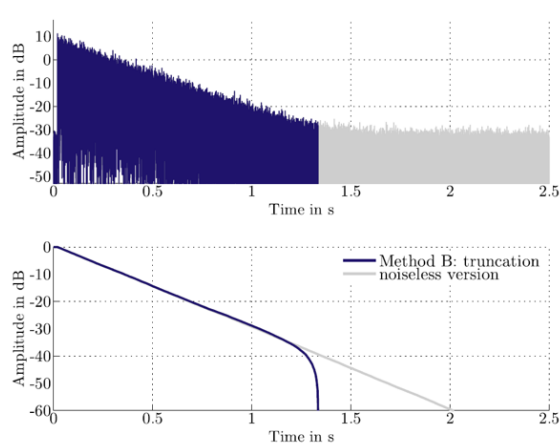


Abbildung 2.2: Beispiel einer Raumimpulsantwort und zugehöriger Energy Decay Curve mit abgeschnittener Impulsantwort [6].

### 2.2.1 Lundeby-Algorithmus

Die Detektion des Schnittzeitpunktes  $t_i$  erfordert eine Schätzung der Regressionsgeraden sowie des Störgeräuschpegels. Gemessene Raumimpulsantworten stehen immer unter Einfluss von Störgeräuschen und sollten angemessen abgeschnitten werden, jedoch ohne zusätzliche Fehler zu provozieren (siehe Kap. 2.2). Das Störgeräusch wird als stationär und gleichbleibend angenommen und es kann aus dem späteren Teil der Impulsantwort detektiert werden. Für die Schätzung des Störgeräuschteppichs soll soviel wie möglich vom späteren Teil der Impulsantwort verwendet werden. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die eigentliche Impulsantwort nicht in die Schätzung des Störgeräuschteppichs einbezogen wird. Die Neigung der Zerfallskurve sollte im späteren Bereich des Abfalls geschätzt werden, allerdings sollte man den Störgeräuschen nicht zu nahe kommen. Nach Lundeby soll dies mit folgendem Algorithmus geschehen [7].

1. Mittelung der quadrierten Impulsantwort in Zeitintervallen: Die Mittelungsintervalllänge sollte zwischen 10 bis 50 ms liegen. Für tiefe Frequenzen sind längere Intervalle von Vorteil.
2. Schätzung des Pegels des Störgeräuschteppichs von den letzten 10 % der Impulsantwort.
3. Schätzung der Neigung von 0 dB bis zum Störgeräuschpegel: Ermittlung der Regressionsgeraden durch Bestimmen eines linken und rechten Punktes. Der linke Punkt liegt mit 0 dB fest. Der rechte Punkt soll 5 bis 10 dB über dem Störgeräuschpegel sein.
4. Schnittpunkt von Regressionsgeraden und Störgeräuschpegel finden.
5. Bestimmung neuer Mittelungsintervalle: Die Intervalllänge hängt von der Neigung der Regressionsgeraden ab (3.). Es sollten 3 bis 10 Mittelungsintervalle je 10 dB Abfall genutzt werden. Für tiefe Frequenzen wiederum sind längere Intervalle besser, sowie kürzere Intervalle für hohe Frequenzen.
6. Mittelung der quadrierten Impulsantwort mit den neuen Mittelungsintervallen.
7. Störgeräuschpegel erneut schätzen: Hier soll ein Sicherheitsabstand, welcher 5 bis 10 dB vom Schnittpunkt entspricht, eingehalten werden. Weiters sollte man aber mindestens bei 10 % der Impulsantwort anfangen.

8. Erneute Schätzung der Neigung der Regressionsgeraden: Der rechte beziehungsweise untere Punkt sollte einen Abstand von 5 bis 10 dB zum neu geschätzten Störgeräuschpegel haben. Der obere Punkt wird durch den zu analysierenden Bereich bestimmt. Dieser wird über die ursprüngliche Neigung bestimmt und sollte in einem Dynamikbereich von 10 bis 20 dB liegen.
9. Neuen Schnittpunkt des Störgeräuschpegel (7.) und Regressionsgeraden (8.) finden.
10. Die Schritte 7., 8. und 9. wiederholen bis der Schnittpunkt zu einem bestimmten Wert konvergiert. Die finale Schätzung der Neigung und des Störgeräuschpegel ist das Ergebnis aus der 3- bis 5-maligen Iteration dieser Schritte.

## 2.3 Abschneiden mit Korrekturterm

Durch das Abschneiden der Impulsantwort vor der Rückwärtsintegration wird ein systematischer Fehler produziert. Die Energie nach dem Abschneidezeitpunkt  $t_i$  bis Unendlich geht verloren (siehe Kap. 2.2). Um dies zu kompensieren, wird ein Korrekturterm  $C_{comp}$  eingeführt. Laut ISO 3382 [3] erhält man das verlässlichste Resultat, wenn für die Berechnung dieses Terms, angenommen wird, dass die Energie exponentiell im gleichen Maß abklingt. Lundeby schätzt eine Kurve, die auf Extrapolation der Regressionsgeraden basiert, um die Energie vom Zeitpunkt des Abschneidens  $t_i \rightarrow \infty$  zu berechnen (entspricht  $C_{comp}$ ) (vgl. Kap. 2.2.1). Der Korrekturfaktor kann über mehrere Zwischenschritte mit den Koeffizienten der Regressionsgeraden bestimmt werden. Als Erstes kann man über die Koeffizienten einen Ausdruck für den angenommenen exponentiellen Zerfall finden [7].

$$r(t) = Be^{At}. \quad (2.3)$$

Man nützt zwei verschiedene Punkte auf der Zeitachse. Einmal den Nullpunkt beziehungsweise Anfangspunkt und einmal den Punkt, wo die Regressionsgerade auf den Störgeräuschpegel trifft. Die Energie am Anfangspunkt ist der Koeffizient  $B$  der Regressionsgeraden.  $t_1$  ist bereits mit einem Sicherheitsabstand beaufschlagt und entspricht einem Pegel von 10 dB über dem Pegel zum Abschnittzeitpunkt  $t_i$ .  $B$  ist bekannt und  $A$  wird wie folgt ermittelt:

$$A = \frac{\ln(N/B)}{t_1}. \quad (2.4)$$

$N$  ist die Energie zum Zeitpunkt  $t_1$  und entspricht der gemittelten Störgeräuschenergie. Sie wird über Integrieren kurzer Zeitintervalle bestimmt (vgl. Kap. 2.2.1). Bestimmung der gesamten Restenergie  $C_{comp}$ :

$$C_{comp} = B \int_{t_1}^{\infty} e^{At} dt = -\frac{B}{A} e^{At_1}. \quad (2.5)$$

Wenn  $C_{comp}$  auf Null gesetzt werden würde, hätte dies eine Unterschätzung der Nachhallzeit zur Folge. Ohne korrektes Abschneiden der Impulsantwort und ohne die richtige Kompensation würde die Nachhallzeit bei  $T_{30}$  zum Beispiel um bis zu 8% unterschätzt werden [3, 7].

Bei dieser Methode wird also ein zusätzlicher Korrekturfaktor  $C_{comp}$  aufaddiert, um den Fehler durch das Abschneiden der Impulsantwort zu minimieren.  $C_{comp}$  wird, wie im vorigen Absatz erläutert, geschätzt und zum Integral hinzugefügt (siehe Abb. 2.3).

$$E(t) = \int_t^{t_i} p^2(\tau) d\tau + C_{comp}. \quad (2.6)$$

Durch diesen zusätzlichen Term ergibt sich ein limitierter Dynamikbereich und der Fehler durch das Abschneiden wird weitestgehend kompensiert. Der hier entstehende Fehler ist nun wesentlich geringer. Wir können jedoch eine leichte Überschätzung der EDC vor dem Abschneiden feststellen, da hier noch ein gewisser Störeinfluss gegeben ist.

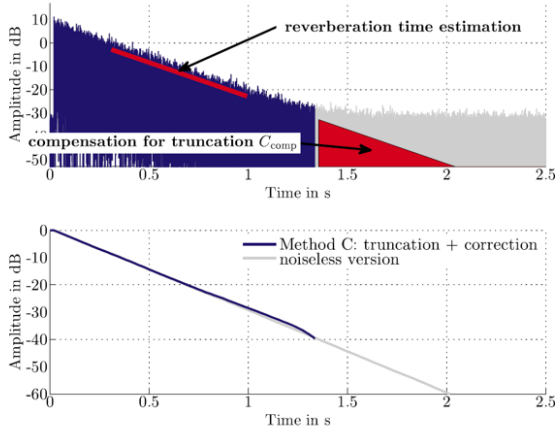


Abbildung 2.3: Beispiel einer Raumimpulsantwort und zugehöriger Energy Decay Curve mit abgeschnittener Impulsantwort und Korrekturterm für das Abschneiden [6].

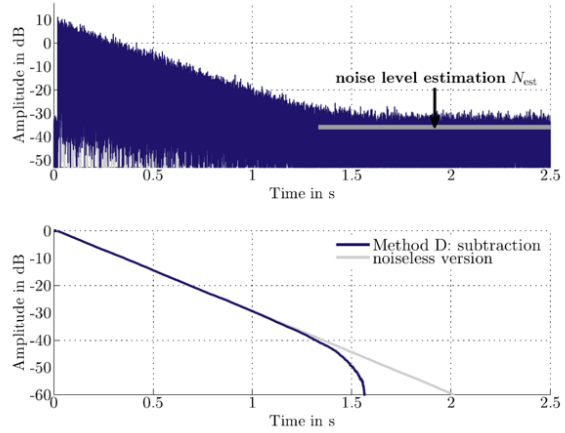


Abbildung 2.4: Beispiel einer Raumimpulsantwort und zugehöriger Energy Decay Curve mit Subtraktion des geschätzten Störschallpegels [6].

## 2.4 Subtraktion des Störschalls

Hier wird der Störschall vorab geschätzt und bereits vor der Schröder-Rückwärtsintegration von der Impulsantwort abgezogen (siehe Abb. 2.4).

$$E(t) = \int_t^{t_{IR}} \hat{p}^2(\tau) - \bar{n}^2 d\tau \quad \text{wobei} \quad \hat{p}(\tau) = p(\tau) + n(\tau) \quad (2.7)$$

Diese Technik funktioniert für den ersten Teil der Impulsantwort, indem das Signal an sich sehr dominant und im Vordergrund ist. Für den weiteren Verlauf jedoch nicht, da die EDC nicht monoton abfällt. Hier tritt das gleiche Problem wie beim Abschneiden der Impulsantwort (vgl. Kap. 2.2) auf (EDC nähert sich minus Unendlich) und auch hier haben wir das Problem eines unlimitierten Dynamikbereichs.

### 2.4.1 Methode von Chu

An dieser Stelle sollen die Untersuchungen von W. T. Chu beleuchtet werden, da die in Kap. 2.4 erklärte Methode direkt aus diesen abgeleitet werden kann. Chu unternahm einen Vergleich von Nachhallzeitmessungen unter Verwendung der Methode der integrierten Impulsantwort nach Schröder (vgl. Gl. 1.2 in Kap. 1.2.2).

Beim Verfahren nach Schröder wird der Einfluss von Hintergrund- beziehungsweise Störgeräuschen nicht berücksichtigt. Chu hingegen nimmt ein additives weißes gaußsches Rauschen als Hintergrundgeräusch, das zu  $p(\tau)$  unkorreliert ist, an. Somit kann Gl. 1.2 durch folgenden

Zusammenhang ersetzt werden (vgl. Abb. 1.1):

$$\begin{aligned}
 E(t) &= \int_t^{t_{IR}} [p(\tau) + n(\tau)]^2 d\tau & (2.8) \\
 E(t) &= \int_t^{t_{IR}} p^2(\tau) d\tau + 2p(\tau)n(\tau) + n^2(\tau) d\tau \\
 E(t) &= \int_t^{t_{IR}} p^2(\tau) d\tau + \underbrace{\int_t^{t_{IR}} 2p(\tau)n(\tau) d\tau}_{=0} + \int_t^{t_{IR}} n^2(\tau) d\tau \\
 E(t) &= \int_t^{t_{IR}} p^2(\tau) d\tau + \int_t^{t_{IR}} n^2(\tau) d\tau
 \end{aligned}$$

Durch die Annahme, dass  $n(\tau)$  unkorreliert zu  $p(\tau)$  ist, entfällt der zweite Term bei der Integration. Der dritte Term entspricht der Rauschenergie, ist immer positiv und hat bei großem  $\tau$ , wo  $p^2(\tau)$  geringer ausfällt, einen großen Einfluss auf die EDC. Somit scheint eine systematische Ermittlung von  $t_i$  möglich.  $t_i$  entspricht jenem Punkt, bei dem die Kurve den linearen gleichbleibenden Anteil des Zerfalls erreicht; sprich wo die EDC auf den gleichmäßigen Rauschteppich trifft. Um die Methode nach Gl. 2.8 zu verwenden, sollte man vorher allerdings eine Integration über einen viel größeren Bereich als die erwartete Nachhallzeit durchführen, um  $t_i$  zu ermitteln. Danach führt man die Integration nur mehr bis zum Zeitpunkt  $t_i$  durch.

In einem weiteren Schritt wird der quadratische Mittelwert der Störgeräusche vor der Integration vom quadrierten Originalsignal der Impulsantwort subtrahiert. Das  $\bar{n}^2$  ist der temporäre Durchschnitt an Hintergrundgeräuschen.

Bei einem additiven weißen gaußschen Rauschen kann der Startzeitpunkt des Intervalls, über das integriert wird, beliebig gewählt werden. Die resultierende Rauschenergie ist konstant. Es gilt also:

$$\int_t^{t_{IR}} n^2(\tau) d\tau = \int_{t_{IR}}^{2t_{IR}} n^2(\tau) d\tau = \bar{n}^2$$

Es folgt also:

$$E(t) = \int_t^{t_{IR}} p^2(\tau) d\tau + \bar{n}^2 = \int_t^{t_{IR}} p^2(\tau) + \bar{n}^2 d\tau = \int_t^{t_{IR}} \hat{p}^2(\tau) d\tau$$

Eingesetzt in Gl. 2.7 ergibt sich also folgendes:

$$E(t) = \int_t^{t_{IR}} p^2(\tau) + \bar{n}^2 - \bar{n}^2 d\tau = \int_t^{t_{IR}} p^2(\tau) d\tau$$

Der Vorteil dieses Verfahrens ist es, dass sämtliche Unsicherheiten in der Bestimmung des oberen Integrationslimits  $t_i$  eliminiert werden. Das Problem an dieser Methode ist jedoch, dass Störgeräusche im Allgemeinen kein weißes Spektrum besitzen und nicht stationär sind. Dieser Umstand gilt vor allem für Störgeräusche von Quadrocoptern (vgl. Kap. 3.1.2) [8].

## 2.5 Abschneiden, Korrektur und Subtraktion

Diese Methode ist eine Kombination aller zuvor behandelten Techniken. Der zuvor geschätzte Störschall wird vor der Rückwärtsintegration abgezogen, die Impulsantwort wird zu einer bestimmten Zeit  $t_i$  abgeschnitten und der Korrekturfaktor für das Abschneiden wird hinzu addiert.

$$E(t) = \int_t^{t_{IR}} (p^2(\tau) - \bar{n}^2) d\tau + C_{comp}. \quad (2.9)$$

Der Fehler durch Störschall wird durch die Subtraktion minimiert. Weitere Fehler im späteren Bereich der Impulsantwort werden durch das Abschneiden umgangen und durch den Korrekturterm ist ein angemessener Dynamikbereich gegeben.

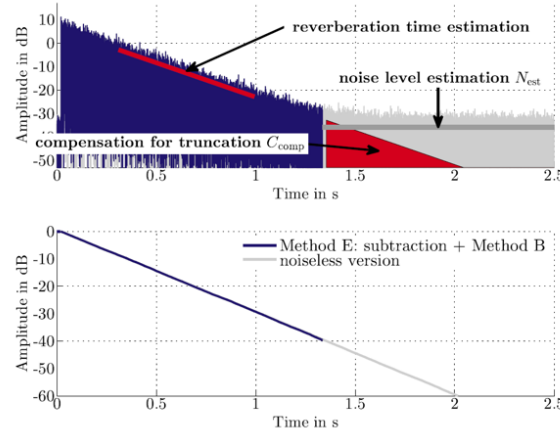


Abbildung 2.5: Beispiel einer Raumimpulsantwort und zugehöriger Energy Decay Curve mit abgeschnittener Impulsantwort, Subtraktion des Störschalls und Korrektur für das Abschneiden [6].

## 2.6 Vergleich der verschiedenen Störschallkompensationstechniken

In diesem Abschnitt sollen die fünf verschiedenen Kompensationstechniken verglichen und ihre Vor- und Nachteile beleuchtet werden. Aus Abb. 2.6 ist ersichtlich, dass bei Vorhandensein eines ausreichend hohen PNRs die Kompensationsmethode für die Evaluierung der Nachhallzeit keine Rolle spielt. Wir können bei unserer Problemstellung mit dem Störschall durch Drohnen jedoch nicht davon ausgehen, einen ausreichend hohen PNR zu haben. Nun zum Vergleich der einzelnen Methoden: Bei der ersten Kompensationstechnik, bei der die volle Impulsantwort genutzt wird, kommt es, wie auch in der Grafik ersichtlich, zu einer starken Überschätzung der Nachhallzeit  $T$ . Diese Methode ist sehr empfindlich gegenüber Störgeräuschen. Die Methode des Abschneidens der Impulsantwort, zu der Zeit wo das Signal auf den Geräuschteppich trifft, liefert für mittlere und hohe PNRs gute Ergebnisse in Hinsicht auf die Geräuschreduktion. Jedoch führt es bei geringen PNRs zu einer starken Unterschätzung von  $T$  und produziert, wie bereits im Kap. 2.2 erwähnt, einen weiteren Fehler. Die dritte Methode, welche zusätzlich noch einen geschätzten Korrekturfaktor aufaddiert, weist im höheren PNR-Bereich eine gute Reduktion von Störschalleinflüssen auf. Im früheren Bereich der Impulsantwort ist eine leichte Überschätzung festzustellen. Diese ist auf den Störgeräuschanteil im Signal vor dem Abschneidezeitpunkt zurückzuführen. Das Problem bei dieser Methode ist jedoch, dass bei zu geringem PNR die Ergebnisse automatisch verworfen werden. Diese Methode funktioniert, gleich wie die letzte der fünf Methoden, erst bei einem genügend hohen PNR. Laut ISO sollte der Störpegel mindestens 15 dB unter dem Auswertebereich liegen. Für  $T_{30}$  zum Beispiel muss für eine erfolgreiche Auswertung, der Störpegel mindestens 45 dB unter dem Maximum der Impulsantwort liegen (vgl. mit Kap. 2.2.1, Kap. 2.3) [3, 7].

Die Methode der Subtraktion, mit einem zuvor geschätzten Einflussfaktor des Störgeräusches,



funktioniert im Bereich hoher Energieanteile des Signals und bei der Simulation gut. Im späteren Bereich jedoch, und vor allem bei realen Messungen überhaupt nicht. Dies ist auch aus Abb. 2.6 ersichtlich. Die letzte Methode und Kombination aller Kompensationstechniken liefert die geringste Empfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen und fast keine systematischen Fehler für mittlere und hohe PNRs. Jedoch sind die letzten zwei genannten Methoden durch das Subtraktionsverfahren nicht konform mit der ISO-3382.

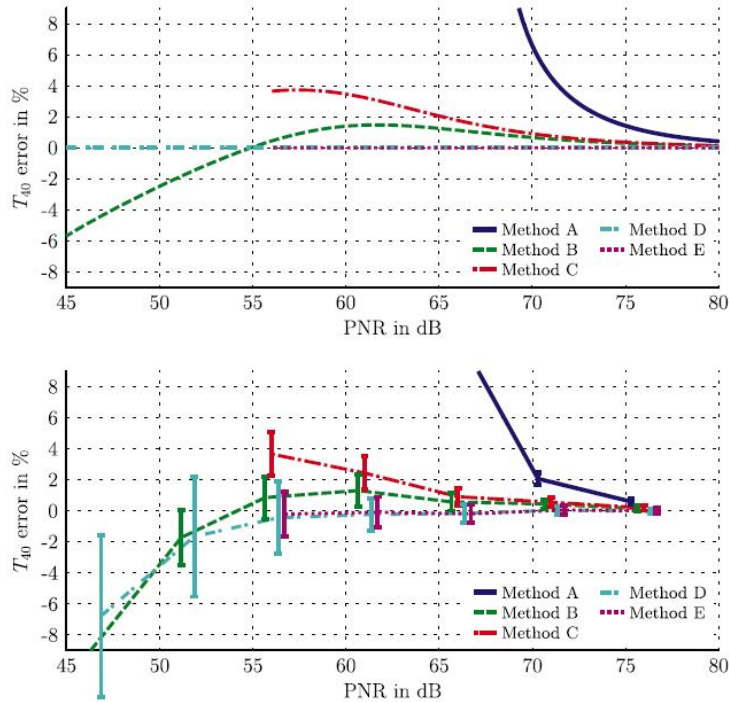


Abbildung 2.6: Relativer Fehler der Nachhallzeit  $T_{40}$  für Modellmessung (oben) und reale Messung (unten) [6].

Es sei darauf hingewiesen, dass bei diesen Betrachtungen als Störschallquelle immer rosa Rauschen benutzt wurde. Jedoch wird die spezielle Schallabstrahlung eines Quadrocopters nicht einem reinen Rauschsignal gleichen, sondern diverse tonale Komponenten und starke Harmonische aufweisen. Ziel dieser Arbeit wird es sein, herauszufinden, ob mit diesen genannten Störschallkompensationstechniken gearbeitet werden kann, um den Störgeräuscheinfluss eines Quadrocopters zu kompensieren.



# 3

## Drohnen

In diesem Kapitel soll der wesentliche Problempunkt der Arbeit behandelt werden: der Störeinfluss von Drohnen auf die raumakustische Messung. Es soll genauer auf die Schallemissionen von Drohnen und deren Abstrahlcharakteristik eingegangen werden.

Kurz zum Begriff Drohne - dieser stammt aus dem Niederdeutschen und ist seit dem 17. Jahrhundert in unserer Hochsprache bezeugt. Er geht auf das Wort „drōne“ oder „lautmalend“ zurück, was verwandt mit dem Verb „dröhnen“ ist. Die Drohne wurde sozusagen nach ihren Fluggeräuschen benannt [9]. Prinzipiell ist eine Drohne ein autonomes unbemanntes Flugvehikel, welches auch ohne menschliche Steuerung selbst fliegen kann. Durch die fortschreitende Entwicklung in der Konstruktion von UAVs der letzten Jahre und der damit einhergehenden preislichen Entwicklung erfreuen sich UAVs immer größerer Beliebtheit.

Dadurch verstärkt sich vor allem auch die zivile Nutzung und damit einhergehend das Gefahrenpotential für die illegale Drohnenutzung. Dies wirft auch sicherheitspolitische Fragen, in Bezug auf Schutz der Privatsphäre, Spionage oder auch Terrorgefahren auf. Drohnen können für filmische Zwecke, Fotografie oder auch Ähnliches genutzt werden. An den meisten zum Kauf angebotenen Modellen befindet sich bereits vorab eine installierte Kamera. Dieses Kamerabild kann bei teureren Drohnen während des Fluges an eine FPV<sup>1</sup>-Brille übertragen werden und man hat das Gefühl, quasi direkt in der Drohne zu sitzen. Sie können mittlerweile sehr vielseitig eingesetzt werden und dem Menschen in gewisser Weise auch Arbeit abnehmen. In der Meteorologie für den Einsatz von Wetterbeobachtungen, oder auch für diverse Transportaufgaben von A nach B können Drohnen genutzt werden. Neben der zivilen Nutzung, ist die militärische Nutzung ein weiterer großer Einsatzbereich von Drohnen. Sei es für die Nutzung bei Aufklärungsmissionen, die Überwachung von Gebieten, zur Spionage oder als Kampfdrohne. Somit müssen für gewisse Aufgaben keine Menschenleben mehr riskiert werden [10].

Drohnen können ferngesteuert von einem Menschen bedient werden, oder auch bereits völlig automatisiert fliegen. Hier muss allerdings zwischen größeren Drohnen für die militärische Nutzung und kleineren sogenannten Coptern unterschieden werden. Große Drohnen können völlig automatisiert fliegen und diverse Copter für die private Nutzung haben nur in höheren Preisklassen Funktionen zur Automatisierung. An dieser Stelle vielleicht kurz zur Unterscheidung von Drohnen und dem Begriff Copter. Drohne ist prinzipiell ein Überbegriff für unbemannte Flugobjekte. Copter sind eine bestimmte Art von Drohnen und werden allerdings vermehrt für den privaten Gebrauch genutzt. Sie können viel weniger Nutzlast tragen und auch nicht so große beziehungsweise lange Distanzen wie eine Drohne für den militärischen Gebrauch überbrücken. Diverse Copter lassen sich bereits mittels Smartphone oder Ähnlichem koppeln, um sie zu steuern oder auch Punkte zu definieren, welche automatisiert abgeflogen werden sollen. Dies trifft jedoch nur auf höherpreisige Copter zu, denn sonst können die meisten Copter kaum automatisiert fliegen und müssen vom Boden aus ferngesteuert werden. Die meisten Copter können jedoch wegen des verbauten Gyroskops<sup>2</sup> schweben und die Position in der Luft halten. Einige Copter haben auch die Option diverse Dinge zu verfolgen oder bei Verlust der Verbindung zur Fernsteuerung automatisch wieder so weit zurückzufliegen bis die Verbindung wieder besteht. Problem an diesen

<sup>1</sup> FPV = First Person View

<sup>2</sup> Kreiselkompass

Funktionen ist allerdings, dass der Copter keinen Höhenunterschied feststellen kann, um ihn somit auszugleichen. Deshalb besteht auch die Gefahr gegen Hindernisse zu fliegen. Ein Copter ist ein Propellergerät ähnlich einem Helikopter. Eine „wirkliche“ Drohne hingegen ist in den meisten Fällen ein unbemanntes Kleinflugzeug, deshalb kann die Drohne auch nicht am selben Punkt in der Luft schweben. Für die Nutzung in einem Raum zur Messung wären gewisse Automationen jedoch von Vorteil. Es könnten vorab diverse Punkte im Raum festgelegt werden, die die Drohne anschließend in gewissen Zeitintervallen abfliegen sollte.

Drohnen existieren in vielen verschiedenen Ausführungen. Es gibt eine breitgefächerte Auswahl an verschiedenen Drohnengrößen. Auch die Anzahl von Rotoren und die Anzahl der Rotorblätter je Rotor können variieren. Das wohl gängigste Modell ist ein Quadrocopter - eine Drohne mit vier Propellern. Die weiteren Drohnentypen wie Tricopter, Hexacopter oder auch Octocopter, erklären sich bereits anhand ihres Namens. Ein Octocopter beispielsweise ist ein Copter mit acht Rotoren. Eine gängige Größeneinteilung der Flugobjekte in drei Klassen sind: nano (sehr kleine Drohnen oder Spielzeugdrohnen), micro (mittelgroße Drohnen bis hin zu 25 kg) und militärische Drohnen (über 25 kg Gesamtgewicht) [11].

Aufgrund der Artenvielfalt von Drohnen/Quadrocoptern variieren akustische Emissionen und aerodynamische Performance der verschiedenen Modelle mitunter signifikant. Für raumakustische Messungen mit Drohnen scheinen Quadrocopter von Vorteil zu sein, denn sie bieten in gewissen Punkten Vorteile gegenüber Coptern mit mehr Propellern. Copter mit mehr Rotoren wären auch erheblich größer, was für Messungen im Rauminneren nicht von Vorteil wäre. Die Funktion, einen Flug vorher zu planen und anschließend völlig automatisiert durchzuführen, ist, wie schon vorhin erwähnt, nur bei teureren Quadrocoptern möglich. Ein zurzeit gängiges Modell ist die *DJI Mavic 2 Pro* (siehe Abb. 3.1). Mit diesem Quadrocopter wären auch automatisierte Flüge möglich.



Abbildung 3.1: DJI Mavic 2 Pro.

## 3.1 Schallabstrahlung von Quadrocoptern

### 3.1.1 Zeitsignal

Zu wichtigen Einflussfaktoren für die Messung zählt die Größe eines Rotorblattes einer Drohne. Kleinere Propeller benötigen eine höhere Umdrehungszahl, um einen Schub zu erzeugen, welcher dem von größeren Propellern entspricht. Wenn wir von einem statischen Flug der Drohne in einer bestimmten Flughöhe ausgehen, dann benötigt diese bei kleineren Propellern somit höhere Umdrehungszahlen. Dies führt zu einem höheren Rauschanteil der Schallemissionen der Drohne. Des Weiteren haben Testmessungen mit Drohnen im statischen Betrieb gezeigt, dass die Propeller-Drehfrequenz ein wichtiger Faktor ist. Dadurch, dass die Propeller ja nicht komplett synchron laufen, kommt es zu einem pulsierenden Phänomen (siehe Abb. 3.2) und zur Bildung von Harmonischen [12]. Je nach Größe, Länge und Materialdicke der Rotoren prägt sich eine gewisse Pulshaftigkeit aus. Diese ist auch im Zeitsignal der Drohne zu erkennen. In realen Flugsituationen kann aufgrund von Filtereffekten oder durch Einfluss der Dissipation<sup>3</sup> diese Pulsform jedoch deutlich weniger ausgeprägt sein (siehe Abb. 3.3). Wenn man die zwei Abbildungen 3.2 und 3.3 vergleicht, ist dieser Unterschied auch gut zu erkennen [11].

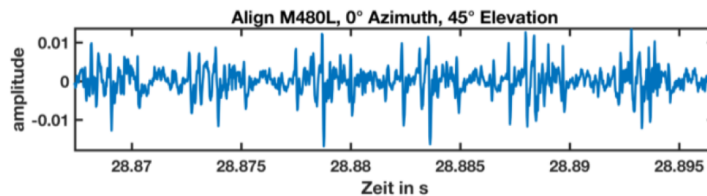


Abbildung 3.2: Ausgeprägte Pulshaftigkeit im Zeitsignal einer Drohne (Align M480L) [11].

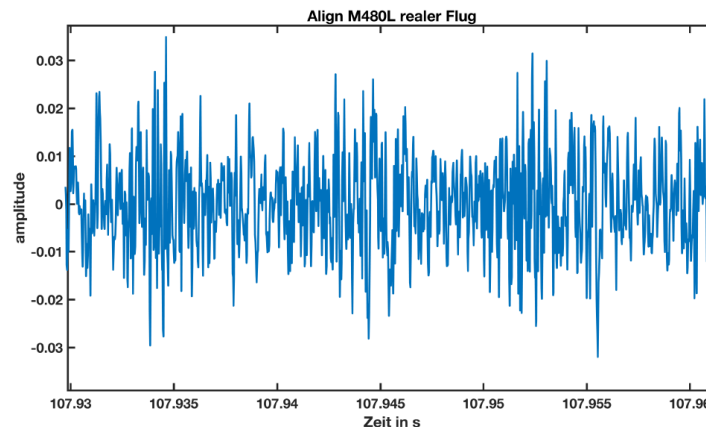


Abbildung 3.3: Zeitsignal einer Drohne im Fernfeld (realer Flug) [11].

Bei den Untersuchungen von Tinney und Sirohi [12] wurden die Messungen im statischen Betrieb mit einem speziell gebauten Copter (Quadro- beziehungsweise Hexacopter) durchgeführt. Die einzelnen Rotoren wurden auch mit verschiedenen Propellergrößen getestet und es wurde deren Einfluss auf die akustisch Performance des Copters evaluiert. Wie schon vorhin erwähnt, kommt es durch die individuellen Rotationsgeschwindigkeiten zu pulsierenden Phänomenen. Dies entsteht durch quadratische Wechselwirkungen der einzelnen Propellerdurchgangsfrequenzen. Diese Wechselwirkungen im Nahfeld zwischen zwei Frequenzen ( $f_1$  und  $f_2$ ) mit verbundenen

<sup>3</sup> unter Dissipation versteht man die Dämpfung der Schallwelle durch die Luft, Luftabsorption

Phasen ( $\phi_1$  und  $\phi_2$ ), führen zu einem spektralen Peak (siehe Abb. 3.4) mit derselben Frequenz  $f$  und Phase  $\phi$  im Fernfeld ( $f=f_1+f_2$  und  $\phi = \phi_1 + \phi_2$ ). Aus Abb. 3.4 lässt sich gut erkennen, dass durch die Geschwindigkeitssteigerung des Motors auch der Pegel der Harmonischen steigt. Hier sei erwähnt, dass der Schalldruckpegel über  $f^+$  aufgetragen ist.  $f^+$  entspricht dem Verhältnis von der Frequenz des abgestrahlten Schallsignals zur Propellerdrehfrequenz, also  $f^+ = f/\Omega_b$ . Die einzelnen Peaks sind ganzzahlige Vielfache von  $\Omega_b$  (vgl. Kap. 3.1.2). Bei  $\Omega_b = 135 \text{ rev/s}$  werden die Harmonischen bei 135 Hz, 270 Hz und so weiter auftreten. Dadurch dass der Schalldruckpegel über  $f^+$  aufgetragen ist, ergibt dies die Harmonischen bei 1, 2 und so weiter. Das ist auch der Grund warum sich bei verschiedenen Rotationsgeschwindigkeiten trotzdem die gleichen Harmonischen ergeben. Außerdem ergibt sich bei 0,5 eine Subharmonische und ein stark variierendes Spektrum im oberen Frequenzbereich ( $f^+ \geq 20$ ).

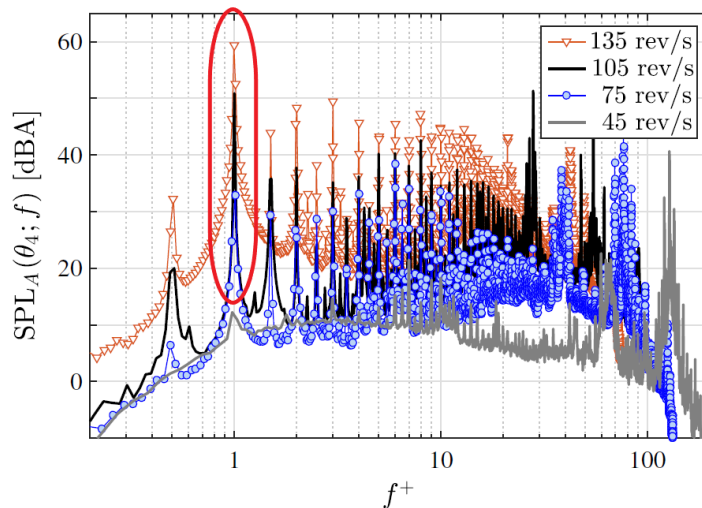


Abbildung 3.4: Schalldruckpegel für eine Drohne mit ca. 23 cm großen Propellerdurchmesser für verschiedene Propellerdrehfrequenzen. [12].

Für das Abfliegen der einzelne Messpunkte würde der Quadrocopter während der eigentlichen Messung am jeweiligen Messpunkt im statischen Schub verharren. Somit stellt sich die Frage, wie und wo man das Messmikrofon auf dem Copter platziert. Darauf wird im Kap. 3.1.3 näher eingegangen.

### 3.1.2 Amplitudenspektrum

Spektral setzt sich der Schall der Drohne aus verschiedenen Komponenten zusammen:

- Rauschen
- harmonische Anteile (bedingt durch Propeller-Drehfrequenz)
- tieffrequente Windgeräusche

Aus den Spektrogrammen ist klar ersichtlich, dass mit steigender Motordrehzahl beziehungsweise Propellerdrehzahl sich die Grundfrequenzen der Harmonischen in höhere Frequenzbereiche verschieben (vgl. Abb. 3.5). Die Schallemissionen der Drohne sind umso verrauschter, je höher die Propellerdrehzahl und der Frequenzbereich sind. Bei [11] geht es hauptsächlich um die akustische Detektion von Drohnen und es werden Unterschiede zwischen stationärem Betrieb und realer Flugsituation beleuchtet. Für unser Anwendungsziel haben wir jedoch noch immer

mit den erwähnten Störeinflüssen zu kämpfen, da bei einer realen raumakustischen Messung der Quadrocopter im statischen Schub verharren würde.

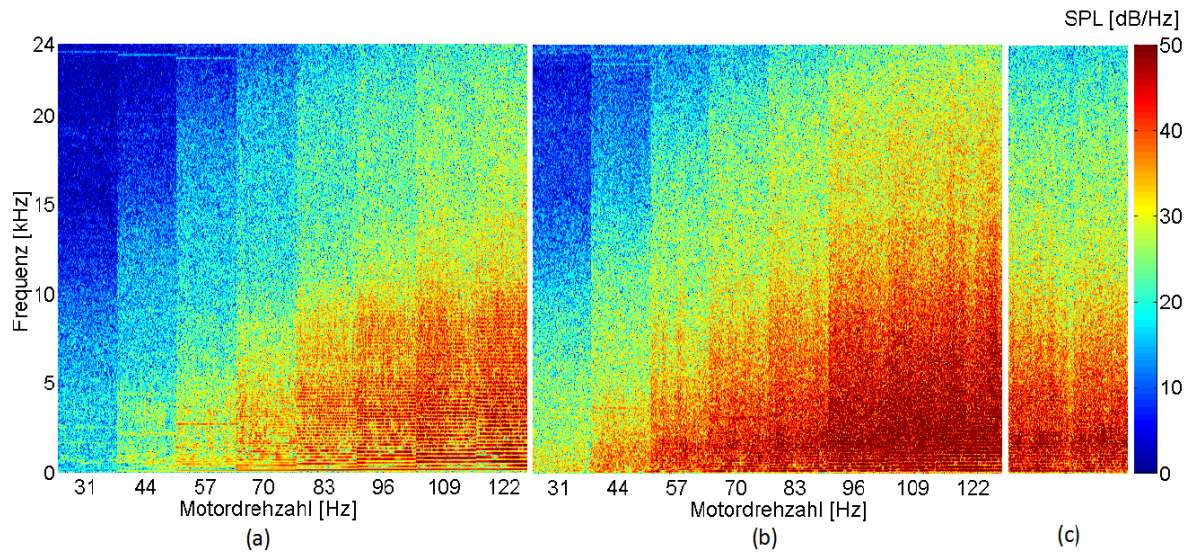


Abbildung 3.5: Spektrogramm für eine bestimmte Richtung mit (a) schneller werdender Drehzahl eines Propellers, (b) schneller werdender Drehzahl von vier Propellern, (c) asynchron laufender Propeller [11].

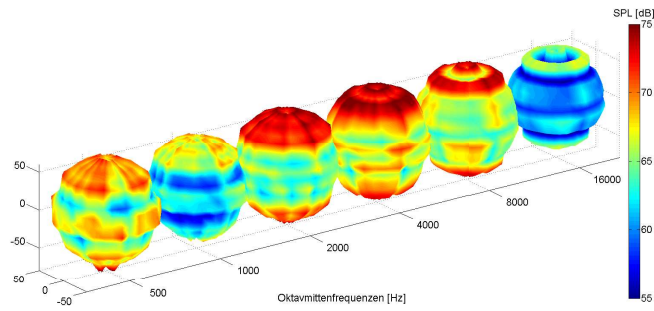
Für eine festgelegte Schubkraft des Copters nimmt der Schalldruck mit zunehmendem Propellerdurchmesser ab. Dies ist auch bei zunehmender Propelleranzahl der Fall. Dieses Verhalten lässt sich wohl auf die geringeren Rotationsgeschwindigkeiten der Propeller zurückführen. Bei festgelegtem Propellerdurchmesser an der Drohne, bleibt dann nur noch die Propellerdurchgangsfrequenz als entscheidender Faktor [12]. Diese spielt vor allem im Frequenzbereich von 500 Hz bis 4 kHz eine Rolle, da sich hier Harmonische bilden und je nach Drehfrequenz des Propellers pulsierende Richtercharakteristiken ausbilden [11]. Da die Harmonischen genau in jenem Frequenzbereich liegen, in dem auch raumakustische Messungen stattfinden, ist ein negativer Einfluss zu erwarten (vgl. Kap. 1.2).

### 3.1.3 Abstrahlcharakteristik

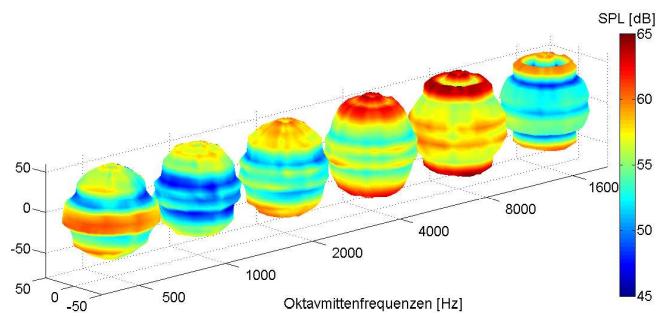
Vor allem im niederfrequenten Bereich unter 600 Hz zeigen Drohnen einen hohen Schalldruckpegel und eine hohe Richtwirkung auf. Diese sind jedoch durch den Propellerwind der Drohne nach unten gerichtet und hätten bei einer Messung wenig Einfluss auf ein entsprechend positioniertes Messmikrofon. Über alle Frequenzen gesehen sind die Hauptabstrahlrichtungen primär nach oben und unten gerichtet (siehe Abb. 3.6).

Bei der Studie von [11] geht es hauptsächlich um die akustische Detektion der Drohnen für militärische Zwecke und zur Verbesserung der Sicherheit gegen illegale Nutzung von Drohnen in zivilen Flugräumen. Die Ergebnisse dieser Studie sollen für diese Arbeit in anderem Sinne genutzt werden. Denn durch bekannte Abstrahlcharakteristiken lassen sich einfacher Positionen für Messmikrofone auf der Drohne festlegen. Im Artikel ist des Weiteren Rede davon, dass bei einem Winkel von  $\pm 30^\circ$  von der Horizontalen die geringste Abstrahlung (-10 dB) auftritt. Dies könnte die akustische Detektion aus der Ferne für Drohnen zwar erschweren, würde aber für unsere Problemstellung vielleicht von Vorteil sein. Die Richtcharakteristiken wurden bei der Studie von [11] an einem Messradius im Fernfeld der Quadrocopter bestimmt. Deswegen lässt sich keine direkte Aussage zum Nahfeld der Quadrocopter treffen. Das Schallfeld ist in diesem Bereich, auf-

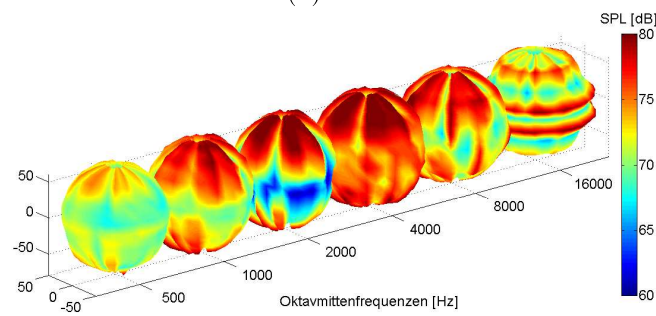
grund von turbulenten Strömungen verursacht durch die Rotorblätter, schwer bestimmbar. Aus genauer Betrachtung der Abb. 3.6 geht hervor, dass Mikrofonantennen horizontal ausgerichtet auf der Drohne montiert werden sollten.



(a) Align



(b) FPV



(c) LittleSpyder

Abbildung 3.6: Richtcharakteristiken für verschiedene Oktavbänder der gemessenen Drohnen [11].



## 4

## Messung mit einem Quadrocopter

Zur Testung der verschiedenen Störschallkompensationstechniken wurde an der Technischen Universität Graz im Hörsaal i2 eine reale Messung mit einem Quadrocopter durchgeführt. Die Messung wurde mit einer *DJI Mavic 2 Pro* (siehe Abb. 4.1) durchgeführt. Als messtechnisches Equipment wurde ein Dodekaederlautsprecher mit Leistungsverstärker, ein Akustikanalysator, diverse Messmikrofone und ein Audio-Interface verwendet (siehe Anhang).



Abbildung 4.1: Der für die Messung genutzte Quadrocopter DJI Mavic 2 Pro.

## 4.1 Messung im HS i2

### 4.1.1 Messaufbau

Der HS i2 weist eine Raumlänge von 15,51 m, eine Raumbreite von 10,49 m und eine durchschnittliche Raumhöhe von 3,77 m auf. Daraus ergibt sich ein Raumvolumen von 613,38 m<sup>3</sup>. Weitere Details der Raumeometrie sowie die Positionen des omnidirektionalen Lautsprechers, des Messmikrofons und des Quadrocopters sind den Abb. 4.2 und Abb. 4.3 zu entnehmen. Weitere wichtige Parameter zum Zeitpunkt der Messung waren die Raumtemperatur  $\vartheta$  mit 22,7 °C sowie die relative Luftfeuchtigkeit mit ca. 37 %. Daraus ergibt sich die Schallgeschwindigkeit  $c(\vartheta)$ :

$$c(\vartheta) \approx 331,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 0,6 \cdot 22,7^\circ\text{C} \approx 344,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (4.1)$$

Laut [13] soll die durchschnittliche Nachhallzeit für den Raum ca. 0,7 s betragen. Daraus

errechnet sich eine Schröderfrequenz mit 67,5 Hz.

$$f_g = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} = 2000 \cdot \sqrt{\frac{0,7 \text{ s}}{613,38 \text{ m}^3}} = 67,5 \text{ Hz.} \quad (4.2)$$

Der Mindestabstand von Mikrofon zur Quelle lässt sich wie folgt berechnen:

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{613,38 \text{ m}^3}{344,9 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,7 \text{ s}}} = 3,19 \text{ m.} \quad (4.3)$$

Das Messmikrofon wurde so positioniert, dass es mindestens eine 1/4-Wellenlänge, was 1 m entspricht, von reflektierenden Oberflächen entfernt war [2]. Die Position des Dodekaederlautsprechers wurde so festgelegt, dass er laut ISO mindestens 2 m von einer Wand entfernt war. Die Höhe des Messmikrofons betrug 2,10 m. Der Messradius von Mikrofon zur Drohne sollte 1 m betragen, da wir von einer Kugelwellenabstrahlung ausgehen, kann man ab dieser Entfernung, bereits das Fernfeld annehmen [13]. Die verwendete Schallgeschwindigkeit  $c$  in der folgenden Berechnung lässt sich aus Gl. 4.1 entnehmen. Die für die Berechnung verwendete Frequenz kommt aus der ermittelten Schröderfrequenz aus Gl. 4.2, dadurch fällt das 63 Hz-Band weg. Die 125 Hz bilden somit das erste Oktavband für die raumakustische Messung. Über die Gleichung der Wellenzahl  $k$  aus Gl. 4.4 wurde der Messradius ermittelt (siehe [13]).

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c}. \quad (4.4)$$

$$k = \frac{2\pi \cdot 125 \frac{1}{\text{s}}}{344,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2,277 \frac{1}{\text{m}}.$$

$$k \cdot r \geq 2 \implies r = \frac{2}{k} = 0,88 \text{ m.}$$

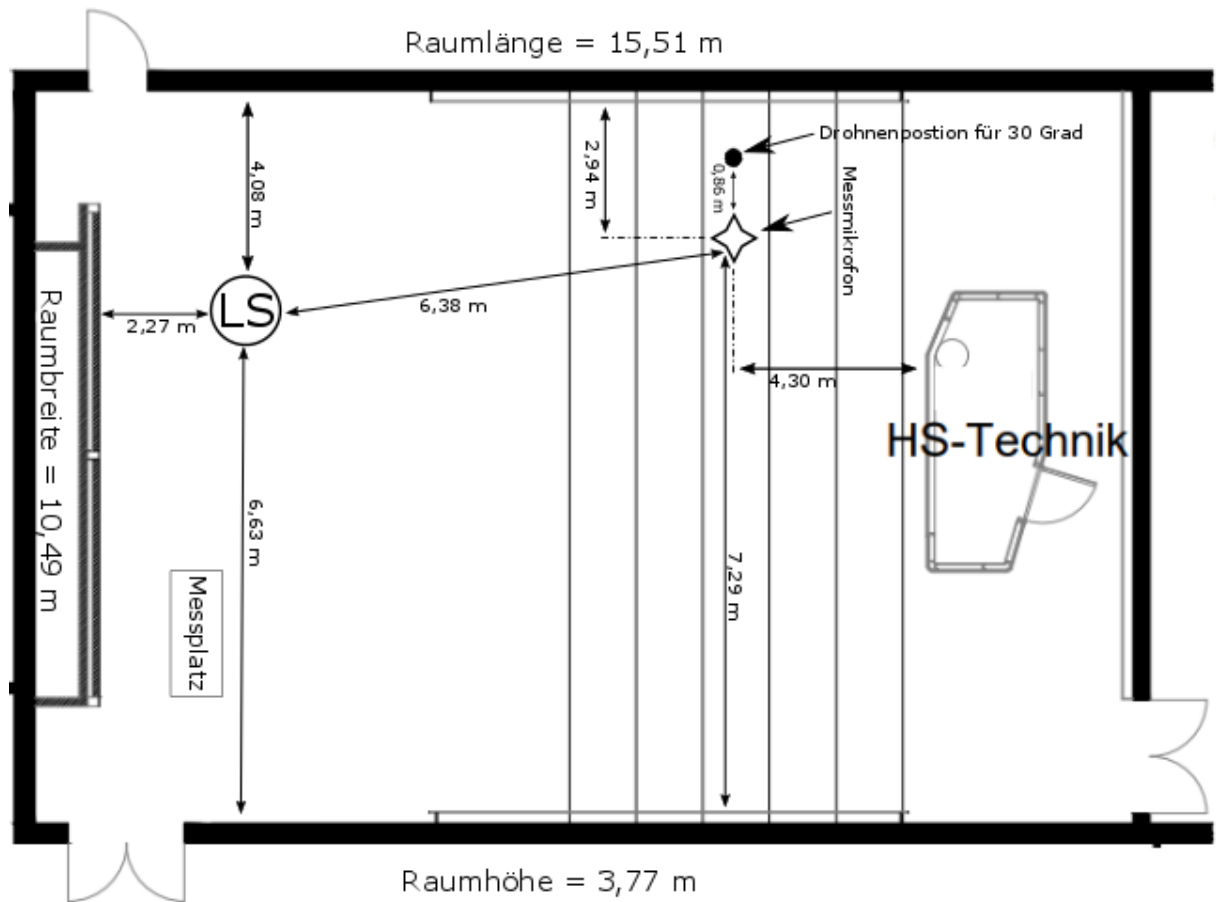


Abbildung 4.2: Der Messaufbau im HS i2 inklusive Lautsprecher und Mikrofonposition.

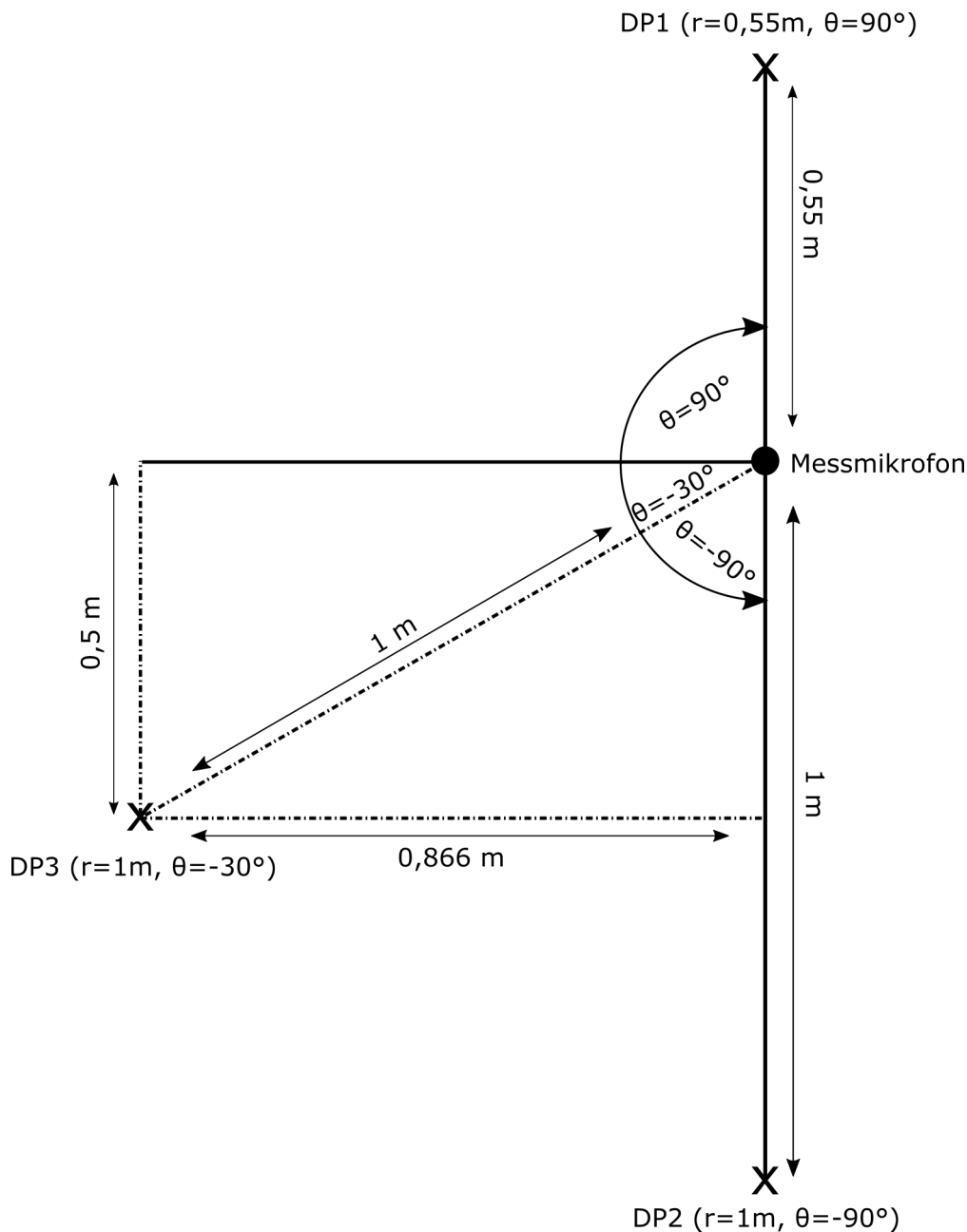


Abbildung 4.3: Distanzen der verschiedenen Messpositionen.

#### 4.1.2 Messverfahren

Um den Einfluss des Störschalls des Quadrocopters beurteilen zu können, wurden mehrere Messungen der Raumimpulsantwort mit und ohne Quadrocopter durchgeführt. Zunächst wurde eine gewöhnliche Raumimpulsantwortmessung ohne den Störschall des Quadrocopters durchgeführt. Diese Messung dient als Referenz zur Bewertung der weiteren Messungen. Anschließend wurden Raumimpulsantwortmessungen mit dem Störschall des Quadrocopters durchgeführt. Es wurden drei verschiedene Positionen des Quadrocopters im Raum betrachtet. Die Positionen, welche die Drohne abfliegen sollte, waren oberhalb und unterhalb des Messmikrofons sowie eine Position, welche einer Elevation von  $\theta = -30^\circ$  entspricht. Bei diesem Winkel ist nach [11] eine geringe Abstrahlung zu erwarten (siehe Abb. 4.3).

Der Grundgeräuschpegel des Raumes betrug 27,1 dB(A) und wurde vor der Messung mithilfe des *NTI XL2* ermittelt. Der durchschnittliche Schallpegel des Quadrocopters lag bei ca. 68 dB(A) und der Dodekaederlautsprecher wurde laut *ARTA* mit 98,3 dB angesteuert. Gemessen wurde mittels exponentiellen Sinussweep mithilfe der Messsoftware *ARTA*. Das Messmikrofon wurde vor der Messung kalibriert. Vor der eigentlichen Messung wurde der ganze Aufbau getestet, indem ein kleiner handelsüblicher Bluetooth-Lautsprecher als Störquelle diente. Dieser wurde an einem Stativ befestigt und an den gewünschten Stellen positioniert, an denen später der Quadrocopter schweben sollte (siehe Abb. 4.4). Über den Bluetooth-Lautsprecher wurde ein tonales Signal abgespielt, welches dem eines Quadrocopters ähnelt.



Abbildung 4.4: Aufbau der Testmessung mit Bluetooth-Lautsprecher.

Für die Drohnenmessung wurde der Quadrocopter an die gewünschte Stelle geflogen, um dort im statischen Flug zu verharren. Wie im Kap. 4.1.1 bereits erwähnt, wurden drei Messpunkte definiert. Geplant waren, neben der Messung für die 30°-Grad-Position, Messungen jeweils 1 m oberhalb und unterhalb des Messmikrofons. Jedoch war dies für die Messung oberhalb des Messmikrofons aufgrund der Deckenhöhe nicht möglich. Die *DJI Mavic 2 Pro* ist mit einer entsprechenden Sensorik ausgestattet, welche es ermöglicht, Kollisionen mit anderen Objekten zu verhindern. Deswegen musste ein Abstand von ca. 1 m zur Decke eingehalten werden (Drohnenflughöhe = 2,65 m) und die Entfernung zum Messmikrofon betrug an der Drohnenposition 1 nur 0,55 m.

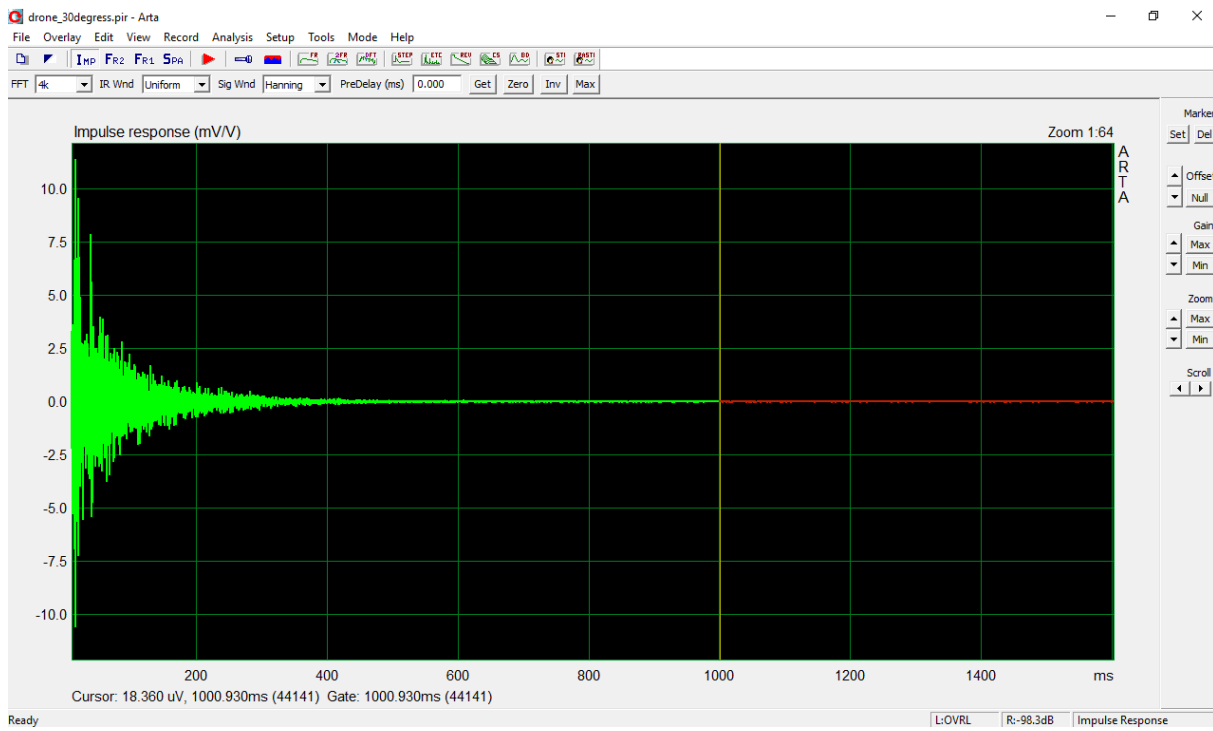


Abbildung 4.5: Beispiel einer aufgenommen Impulsantwort mittels ARTA.



Abbildung 4.6: Quadrocopter im Anflug auf eine Messposition.

## 5

## Ergebnisse der Messung

Zunächst wird die Auswertung der Messung der reinen Impulsantwort des Hörsaals HS i2 erläutert. Diese dient als Referenz für die weiteren Auswertungen und die anschließende Diskussion. Danach folgen die Auswertungen der Impulsantwortmessungen mit Störschall durch den Quadrocopter. Hierbei wird auf die Effekte der Störschallkompensationstechniken eingegangen. In der Gl. 4.2 wurde die Schröderfrequenz mit 67,5 Hz ermittelt. Deshalb wurden bei der Auswertung primär die Oktavbänder von 125 Hz bis 8 kHz betrachtet. Normalerweise findet eine Auswertung in Oktavbändern von 63 Hz bis 4 kHz statt (siehe Kap. 1.2). Die Behandlung der Messergebnisse wurde mit der *ITA-Toolbox*, einer Open Source Toolbox für *Matlab*, durchgeführt [14]. Anschließend wurde mit einem *Matlab*-Skript gearbeitet, um die Messdaten weiterführend zu analysieren.

### 5.1 Impulsantwortmessung des HS i2

Bereits aus der Abbildung der Impulsantwort in 5.1 ist zu sehen, dass wir bei der reinen Impulsantwortmessung des Raumes einen relativ guten Störpegelabstand bekommen. Aufgrund dessen wird auch die Behandlung dieser Messung mit diversen Störschallkompensationstechniken zu keinen großen Unterschieden in der Nachhallzeit führen.

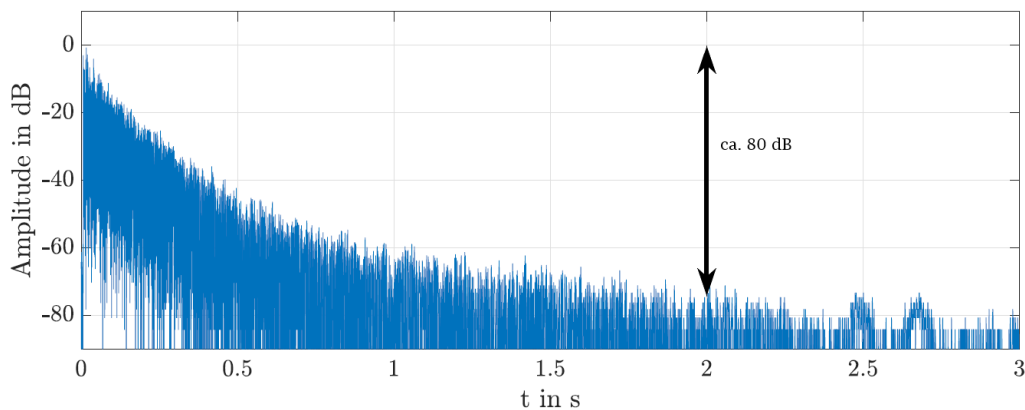


Abbildung 5.1: Impulsantwort des HS i2 in dB.

Aus Tab. 5.1 lassen sich die verschiedenen Nachhallzeitwerte für die Messung ohne Quadrocopter im HS i2 entnehmen. Diese wurden der *CSV*-Datei entnommen, welche bei der Messung mit der Software *ARTA* gespeichert wurde. In der Tabelle ist klar ersichtlich, dass das 63 Hz-Band für die Auswertung keine Rolle spielt. Der Wert für  $T_{30}$  von 3,092 s ist demzufolge utopisch (vgl. Kap. 4.1.2). An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Werte in den nachfolgenden Tabellen, zur besseren Übersichtlichkeit, immer auf zwei Nachkommastellen gerundet wurden.



F (Hz)	T <sub>30</sub> (s)	T <sub>20</sub> (s)	T <sub>10</sub> (s)
63	3,09	1,35	0,63
125	1,74	0,97	0,88
250	1,31	0,9	0,82
500	0,99	0,94	0,94
1000	0,91	0,89	0,87
2000	0,77	0,75	0,76
4000	0,59	0,58	0,49
8000	0,56	0,55	0,46

Tabelle 5.1: Nachhallzeiten der Referenzmessung für die Oktavbänder von 63 Hz bis 8 kHz im HS i2.

In Abb. 5.2 sind die Energie-Zerfallskurven der Oktavbänder zu sehen. Auffallend ist die Kurve des 8000 Hz-Bandes, welche eine geringere Dynamik als die anderen Kurven aufweist. Dies lässt sich wohl auf den Einfluss der spektralen Eigenschaften des Grundgeräuschpegels von 27,1 dB, der im Raum herrschte, zurückführen (siehe Kap. 4.1.2). Jedoch spielt dieses Frequenzband für eine aussagekräftige raumakustische Messung eine untergeordnete Rolle (siehe Kap. 1.2).

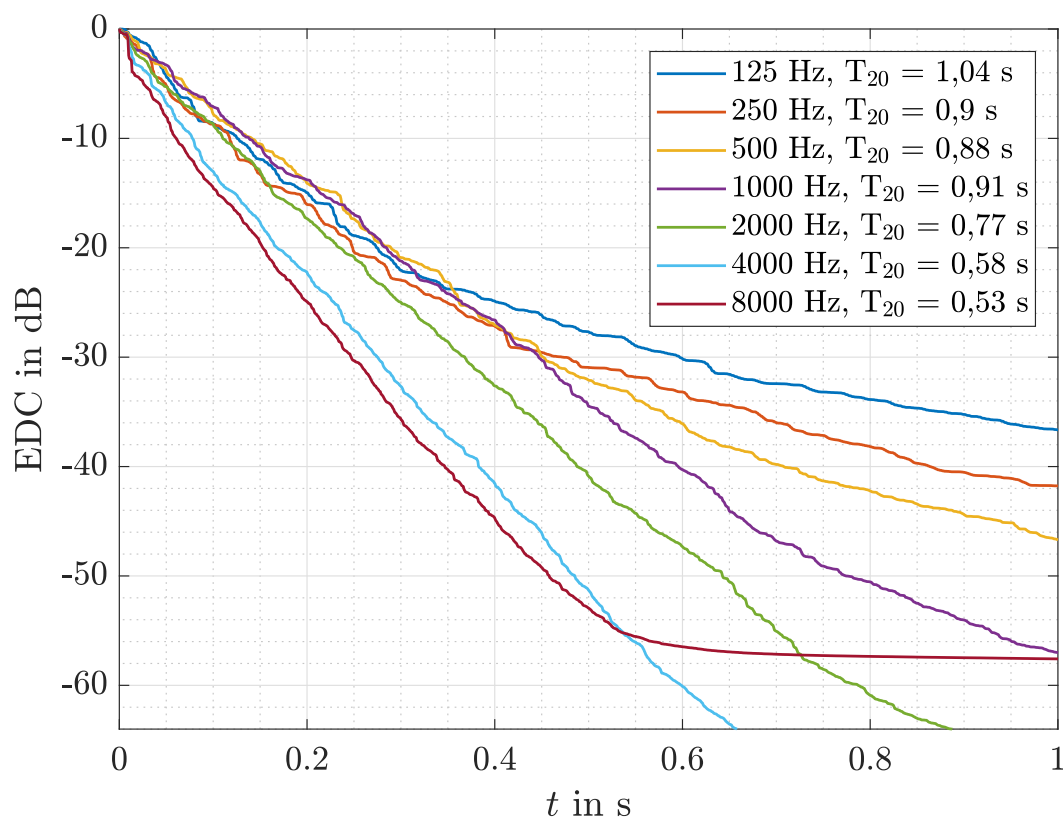


Abbildung 5.2: Energy Decay Curve in Oktavbändern des HS i2.

In Abb. 5.3 ist die Nachhallzeitgerade für das 250 Hz-Band zu sehen. Die Berechnung mit dem *Matlab*-Skript liefert eine Nachhallzeit für T<sub>20</sub> von 0,900 s. Welche mit den *ARTA*-Ergebnis von 0,902 s gut übereinstimmt (vgl. Tab. 5.1). Zum Vergleich ist in Abb. 5.4 die Nachhallzeitgerade für 1000 Hz dargestellt. Die Berechnung von T<sub>20</sub> für dieses Frequenzband liefert einen Wert von 0,908 s. Im Vergleich dazu das Ergebnis von der Messsoftware *ARTA* mit 0,885 s (vgl. Tab. 5.1). Mit einer durchschnittlichen Abweichung von ca. 0,56 % zwischen den *ARTA*- und *Matlab*-Werten



ist bestätigt, dass die Berechnung mithilfe der *ITA-Toolbox* und des *Matlab*-Skripts annähernd dieselben Ergebnisse liefert (siehe Tab. 5.2).

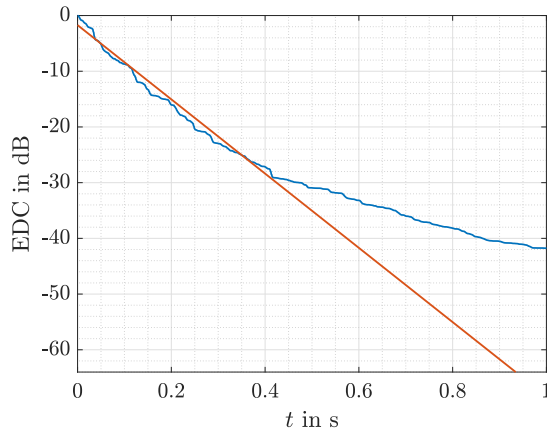


Abbildung 5.3: Interpolation der Nachhallzeitgeraden für 250 Hz. In blau die EDC bei 250 Hz und in rot die geschätzte Nachhallzeitgerade.

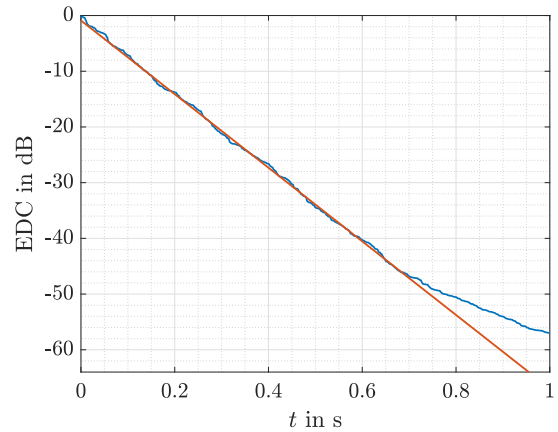


Abbildung 5.4: Interpolation der Nachhallzeitgeraden für 1000 Hz. In blau die EDC bei 1000 Hz und in rot die geschätzte Nachhallzeitgerade.

F (Hz)	T (s)		% - Abweichung
	ARTA	MATLAB	
125	0,97	1,05	8,25 %
250	0,9	0,9	0,0 %
500	0,94	0,88	6,38 %
1000	0,89	0,91	2,25 %
2000	0,75	0,77	2,67%
4000	0,58	0,58	0,0 %
8000	0,55	0,53	3,64 %

Tabelle 5.2:  $T_{20}$  in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz im Vergleich zwischen der Messsoftware ARTA und MATLAB. In der letzten Spalte ist die prozentuelle Abweichung zwischen ARTA und Matlab zu sehen.

## 5.2 Messung im HS i2 mit Quadrocopter

In den folgenden Abschnitten folgen die Auswertungen der Messung mit dem Störgeräusch des Quadrocopters. Es werden nacheinander die Ergebnisse für die verschiedenen Messpositionen analysiert und anschließend mit den verschiedenen Störschallkompensationstechniken aus Kap. 2 behandelt. Danach wird evaluiert, welche Technik das beste Ergebnis liefert.

### 5.2.1 Quadrocopterposition oberhalb des Mikrofons, DP1 ( $r = 0,55m, \theta = 90^\circ$ )

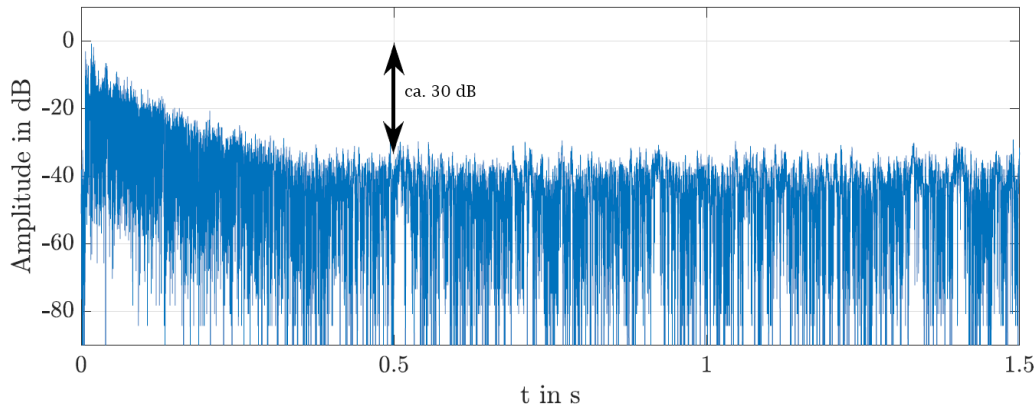


Abbildung 5.5: Impulsantwort mit Quadrocopter oberhalb des Messmikrofons in dB.

Als Erstes wird die Position oberhalb des Messmikrofons (DP1) behandelt. In Abb. 5.5 fällt sofort die viel geringere Dynamik von ca. 30 dB auf. Dies lässt sich vor allem auf die Drohnenmessposition zurückführen. Dadurch, dass sich die Drohne oberhalb des Messmikrofons befand, zeichnete das Mikrofon sehr viele tieffrequente Windgeräusche auf. Dies führt zu einem wesentlich höheren Störgeräuschpegel und zu den Löchern, die man in der Abb. 5.5 der Impulsantwort sehen kann (andere spektrale Beschaffenheit, vgl. Abb. 5.1). Außerdem konnte, wie schon im Kap. 4.1.2 erwähnt, der Messradius von 1 m zum Messmikrofon nicht eingehalten werden.

F (Hz)	T <sub>30</sub> (s)	T <sub>20</sub> (s)	T <sub>10</sub> (s)
125	0,48	0,54	0,66
250	0,66	0,78	0,83
500	0,72	0,82	0,96
1000	0,74	0,83	0,82
2000	0,71	0,71	0,74
4000	0,58	0,57	0,52
8000	0,49	0,51	0,43

Tabelle 5.3: Nachhallzeiten für DP1 für die Oktavbänder von 125 Hz bis 8 kHz im HS i2.

Die ermittelten Werte der Messsoftware *ARTA* fallen im Vergleich zu den Werten aus der reinen Raumimpulsantwortmessung etwas geringer aus. Für T<sub>20</sub> im 500 Hz-Band ergibt sich hier ein Wert von 0,82 s. Im Vergleich dazu beträgt T<sub>20</sub> für das 500 Hz-Band bei der reinen Impulsantwortmessung 0,94 s. Das 63 Hz-Band wurde in Tab. 5.3 gar nicht berücksichtigt, da die über die Messsoftware ermittelten Werte in einem nicht gerade ernstzunehmenden Bereich liegen und dieses Band ohnehin unter der berechneten Schröderfrequenz aus Kap. 4.1.2 liegt.

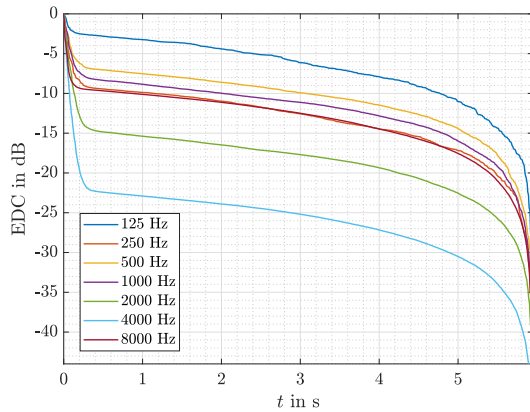


Abbildung 5.6: Energy Decay Curve in Oktavbändern mit Quadrocopter (volle Impulsantwort).

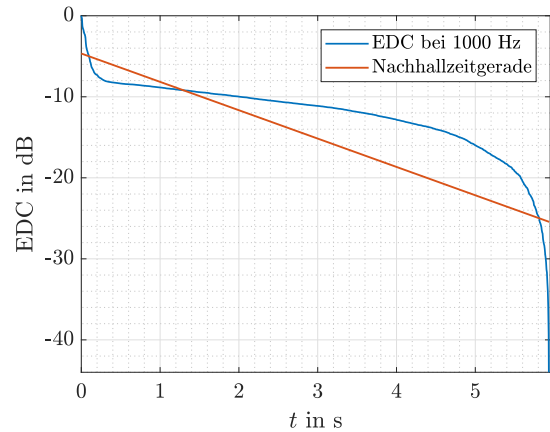


Abbildung 5.7: Nachhallzeitgerade für 1000 Hz.

Bei der Berechnung der EDCs in Abb. 5.6 wurde die volle Impulsantwort und keine weitere Störschallkompensationstechnik verwendet. In Abb. 5.7 ist die große Überschätzung der Nachhallzeitgeraden gut zu erkennen. Mit der Berechnung über das *Matlab*-Skript kommt man hier auf einen riesigen und nicht gerade realistischen Wert von über 17 s für das 1000 Hz-Oktavband (siehe Tab. 5.4, 6.1).

F (Hz)	T (s)		% - Abweichung
	ARTA	MATLAB	
125	0,54	10,55	1853,70 %
250	0,78	17,15	2098,72%
500	0,82	17,2	1997,56%
1000	0,83	17,15	1966,27%
2000	0,71	16,1	2167,61%
4000	0,57	8,51	1392,98%
8000	0,51	17,15	3262,75%

Tabelle 5.4:  $T_{20}$  in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz im Vergleich zwischen der Messsoftware ARTA und MATLAB bei voller Impulsantwort. In der letzten Spalte ist die prozentuelle Abweichung zwischen ARTA und Matlab zu sehen.

Ein Vergleich zwischen den *ARTA*-Messwerten und den ermittelten Werten via *Matlab*-Skript sind in Tab 5.4 zu sehen. Die *Matlab*-Werte liefern utopische Werte (siehe Tab. 6.1). Die Werte aus der Messsoftware *ARTA* liefern, wie in Tab. 5.3 ersichtlich, eine leichte Unterschätzung der Nachhallzeit. Dies lässt darauf schließen, dass auch in *ARTA* eine ISO-konforme Störschallkompensationstechnik implementiert sein muss. Laut Handbuch gibt es in *ARTA* sogar die Auswahl zwischen den in der ISO aufgelisteten Methoden des Abschneidens sowie des Abschneidens mit Kompensation, als auch die nicht ISO-konforme Methode der Subtraktion. Standardmäßig ist in *ARTA* das Abschneiden nach *ISO-3382* eingestellt [15]. Aus diesem Grund ist in Tab. 5.5 der Vergleich zwischen den *ARTA*-Werten und den *Matlab*-Werten mit abgeschnittener Impulsantwort aufgeführt. Man sieht, dass diese Werte schon viel näher beieinander liegen als bei der Nutzung der vollen Impulsantwort.

F (Hz)	T (s)		%Abweichung
	ARTA	MATLAB	
125	0,54	0,36	33,33%
250	0,78	0,59	24,36%
500	0,82	0,67	18,29%
1000	0,83	0,74	10,84%
2000	0,71	0,76	7,04%
4000	0,57	0,56	1,75%
8000	0,51	0,46	9,80%

Tabelle 5.5:  $T_{20}$  in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz im Vergleich zwischen der Messsoftware ARTA und MATLAB bei abgeschnittener Impulsantwort. In der letzten Spalte ist die prozentuelle Abweichung zwischen ARTA und Matlab zu sehen.

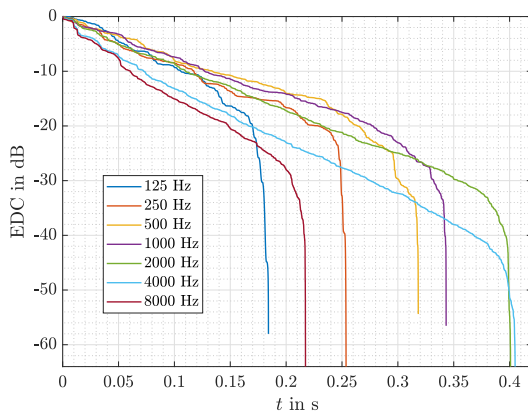


Abbildung 5.8: EDC mit abgeschnittener Impulsantwort.

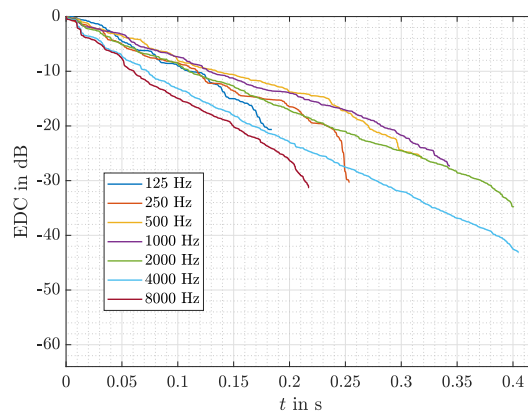


Abbildung 5.9: EDC mit abgeschnittener Impulsantwort und Korrektur.

Als nächstes soll überprüft werden, ob andere Störschallkompensationstechniken aus Kap. 2 verwertbare Ergebnisse für die Quadrocopterposition oberhalb des Messmikrofons liefern. In Abb. 5.8 ist die Energie-Zerfallskurve mit abgeschnittener Impulsantwort zu sehen. Das Ziel bei dieser Methode ist es, durch Abschneiden zu einem gewissen Zeitpunkt, den Störgeräuschen entgegenzuwirken. Wie schon in Kap. 2.2 erwähnt, führt diese Methode jedoch zu weiteren Problemen. Die EDC wandert näherungsweise gegen  $-\infty$ . Diese Methode liefert bei ausreichend hohen PNRs eine gute Störgeräuschkompensation. Bei niedrigen PNRs, wie in diesem Fall, führt es zu einer starken Unterschätzung der Nachhallzeit  $T$ . Für die Berechnung des 1000 Hz-Bandes zum Beispiel, liefert diese Methode ein Ergebnis von 0,74 s für  $T_{20}$ . Der ermittelte Wert für das 1000 Hz-Band aus der reinen Impulsantwortmessung lag allerdings bei 0,91 s. Somit führt diese Störschallkompensationstechnik wohl nicht zu einem von uns gewünschten Ergebnis (vgl. Tab. 6.2).

In Abb. 5.9 ist nach dem Abschneiden noch zusätzlich eine Korrektur, wie in den Kap. 2.3 und Kap. 2.2.1 erwähnt, angewandt worden. Durch diese Korrektur verschwindet zwar der Abschneidefehler, jedoch liefert diese Störschallkompensationstechnik teilweise keine Ergebnisse. Grund dafür ist der zu niedrige PNR. Dadurch können die Ergebnisse erst gar nicht berechnet werden. Dies bestätigt auch die versuchte Berechnung per *Matlab*-Skript (siehe 125 Hz-Band in Tab. 6.3). Für das 500 Hz-Band kommt man auf einen Wert von 0,72 s. Jedoch widerspricht dieser Wert der Theorie aus [6]. Bei niedrigen PNRs sollte es bei dieser Kompensationstechnik zu einer leichten Überschätzung der Nachhallzeit kommen. Verantwortlich dafür ist der Störgeräuschanteil in der Impulsantwort vor dem Abschneidezeitpunkt. Laut Theorie mag diese auch ISO-3382-konforme

Methode bei ausreichend hohen PNRs gut funktionieren, in unserem Fall führt sie jedoch in gewissen Frequenzbändern zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis (vgl. Tab. 6.3). Grundsätzlich ist dieses Problem aber der Quadrocopterposition geschuldet.

In den Abb. 5.10 und Abb. 5.11 sind die Nachhallzeitgeraden für  $T_{20}$  bei 250 Hz zu sehen. In Abb. 5.10 wurde die Methode der Subtraktion des Störschalls angewandt (siehe Kap. 2.4). Dies führt zum gleichen Problem wie bei der Methode des Abschneidens der Impulsantwort zu einem bestimmten Zeitpunkt. Laut [6] funktioniert diese Methode als Modell, jedoch nicht für reale Messungen. Diese Aussage lässt sich durch unsere reale Messung stützen. Diese Methode führt zu einer Unterschätzung der Nachhallzeit  $T$ , welche im 250 Hz-Band nur mehr bei 0,69 s liegt (vgl. Tab. 6.4).

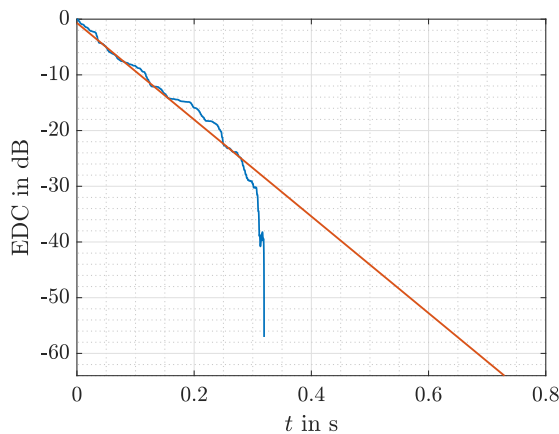


Abbildung 5.10:  $T_{20}$  bei 250 Hz (Subtraktion von Störschall).

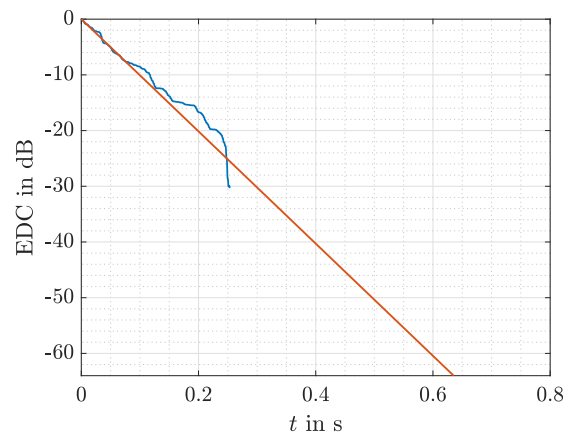


Abbildung 5.11:  $T_{20}$  bei 250 Hz (Subtraktion und Korrektur).

Die letzte Methode, welche man in Abb. 5.11 sieht, beinhaltet alle Techniken die in Kap. 2 zur Störschallkompensation erwähnt wurden. Diese Methode sollte die geringste Empfindlichkeit gegenüber Störgeräuschen aufweisen. Jedoch hat diese Methode das gleiche Problem wie die Methode mit Abschneiden und zusätzlicher Korrektur. Bei einem unzureichenden PNR werden die Ergebnisse automatisch verworfen. Diese Methode funktioniert laut Theorie bei mittleren und hohen PNRs sehr gut und es treten die wenigsten systematischen Fehler auf. Jedoch haben wir bei unserem Fall, in gewissen Frequenzbändern, einen zu geringen PNR (vgl. Tab. 6.5).

Somit wurden alle der in Kap. 2 behandelten Störschallkompensationstechniken bei dieser gemessenen Raumimpulsantwort angewandt. Es lässt sich feststellen, dass keine der fünf Methoden ein zufriedenstellendes Ergebnis liefert. Teils kommt es zu einer Überschätzung der Nachhallzeit  $T$  und teils zu einer starken Unterschätzung. Aufgrund dessen lässt sich sagen, dass die Messposition für den Quadrocopter oberhalb des Messmikrofons, nicht geeignet ist, um konsistente Messergebnisse bei einer raumakustischen Messung zu liefern. Durch die Positionierung des Messmikrofon unterhalb des Quadrocopters ergibt sich ein zu großer Störgeräuschpegel. Laut [11] strahlt ein Quadrocopter nach unten hin sehr viele tieffrequente Windgeräusche ab. Dies lässt sich bestätigen, wenn man sich die Impulsantwort des Raumes, mit dem Quadrocopter an dieser Position befindlich, anhört.

### 5.2.2 Quadrocopterposition unterhalb des Mikrofons, DP2 ( $r = 1m, \theta = -90^\circ$ )

Die Messung mit der Quadrocopterposition unterhalb des Messmikrofons (DP2) liefert wesentlich bessere Ergebnisse. Die ARTA-Werte sind hier bis auf kleine Abweichungen in den Nachkommastellen deckungsgleich mit den ermittelten Messwerten aus der reinen Impulsantwortmessung (vgl. Tab. 5.1 mit Tab. 5.6).

F (Hz)	T <sub>30</sub> (s)	T <sub>20</sub> (s)	T <sub>10</sub> (s)
63	2,39	1,16	0,62
125	1,55	0,98	0,86
250	1,14	0,89	0,78
500	0,97	0,91	0,88
1000	0,84	0,87	0,82
2000	0,74	0,72	0,71
4000	0,62	0,59	0,45
8000	0,52	0,55	0,43

Tabelle 5.6: Nachhallzeiten für DP2 für die Oktavbänder von 63 Hz bis 8 kHz im HS i2.

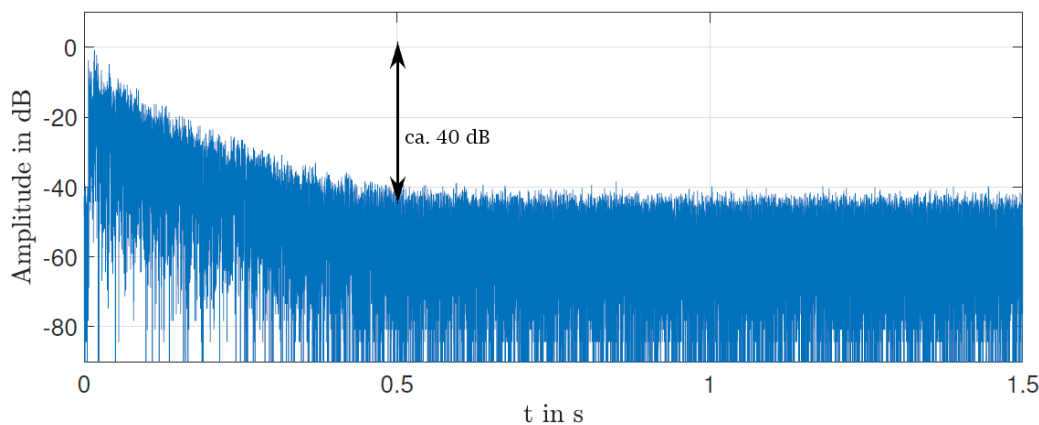


Abbildung 5.12: Impulsantwort mit Quadrocopter unterhalb des Messmikrofons in dB.

In Abb. 5.13 sieht man die EDC in Oktavbändern. Was auffällt, ist die etwas höhere und für unser Vorhaben auch notwendige Dynamik von ca. 40 dB (siehe Abb. 5.12). Aus der Raumimpulsantwort ist aber nicht direkt ablesbar, dass diese zu besseren Ergebnissen führt. Da diese viel mehr Peaks und hochfrequente Anteile aufweist, als im Vergleich in Abb. 5.5 zu sehen ist. Bei dieser Quadrocopterposition kam ein ausreichend hoher PNR zustande, um eine vernünftige Auswertung starten zu können. In Abb. 5.14 wurde als Störschallkompensationstechnik das Abschneiden der Impulsantwort angewendet (vgl. Kap. 2.2). Diese Methode produziert zwar wie bereits erwähnt eine weiteren Fehler, jedoch liefert sie für diese Position des Quadrocopters schon relativ gute Ergebnisse. Als Vergleich liefert hier zum Beispiel das 250 Hz-Band einen Wert von 0,89 s und die Referenzmessung einen Wert von 0,9 s (vgl. Tab. 6.1 und Tab. 6.2).

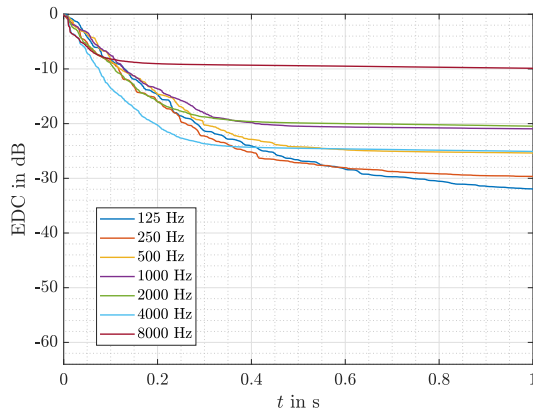


Abbildung 5.13: Energy Decay Curve in Oktavbändern mit Quadrocopterposition unter dem Messmikrofon (volle Impulsantwort).

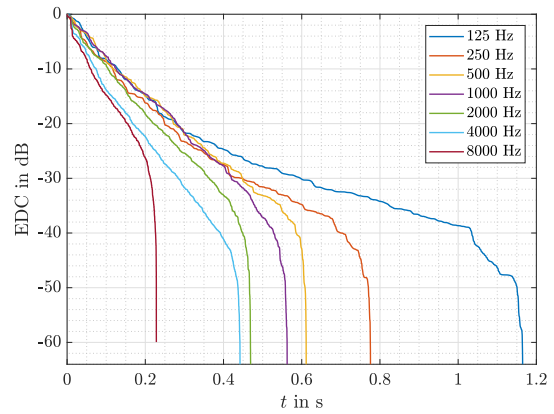


Abbildung 5.14: Energy Decay Curve mit abgechnittener Impulsantwort.

In Tab. 5.7 ist der Vergleich in Oktavbändern zwischen den Werten aus der *CSV*-Datei von *ARTA* und den *Matlab*-Werten, bei Verwendung der vollen Impulsantwort dargestellt. Hier ist gut zu erkennen, dass bei gewissen Frequenzbändern die Nachhallzeit der *Matlab*-Werte bereits relativ gut mit den *ARTA*-Werten übereinstimmt; zumindest im niederfrequenten Bereich. In den höher liegenden Frequenzbändern kommt es aber auch hier zu einer starken Überschätzung der Nachhallzeit. Wenn also eine raumakustische Messung mit einem Quadrocopter durchgeführt werden soll, ist der Einsatz von Störschallkompensationstechniken zwingend erforderlich.

F (Hz)	T (s)		%Abweichung
	ARTA	MATLAB	
125	0,99	1,1	11,11%
250	0,89	1,02	14,61%
500	0,91	1,79	96,70%
1000	0,87	10,56	1113,79%
2000	0,72	11,48	1494,44%
4000	0,59	2,67	352,54%
8000	0,55	17,2	3027,27%

Tabelle 5.7:  $T_{20}$  für DP2 in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz im Vergleich zwischen der Messsoftware *ARTA* und *MATLAB*. In der letzten Spalte ist die prozentuelle Abweichung zwischen *ARTA* und *Matlab* zu sehen.

Die weiteren Störschallkompensationstechniken aus Kap. 2 liefern für diese Position relativ adäquate Ergebnisse in jedem Frequenzband. Dies zeigt sich auch in Abb. 5.15. Hier liegt die Nachhallzeit des anfangs erwähnten 250 Hz-Bandes bei 0,89 s. Diese Methode weist für diese Quadrocopterposition somit geringfügige Verbesserungen, beziehungsweise Änderungen, in den ermittelten Nachhallzeitwerten auf. Weitere Werte sind der Tab. 6.3 zu entnehmen.

Die Methode der Subtraktion des Störschalls, welche allerdings nicht mehr in der *ISO* aufscheint, liefert ebenfalls gute Ergebnisse (siehe Tab.6.4). Wenn man die Werte der letzten Methode genauer ansieht, stellt man allerdings fest, dass es zu einer Unterschätzung kommt (siehe Tab. 6.5). Es wurde eigentlich davon ausgegangen, dass diese Methode die besten Ergebnisse liefert, jedoch ist das hier nicht der Fall. Genauere Erläuterungen hierzu sind in Kap. 6.7 zu finden.

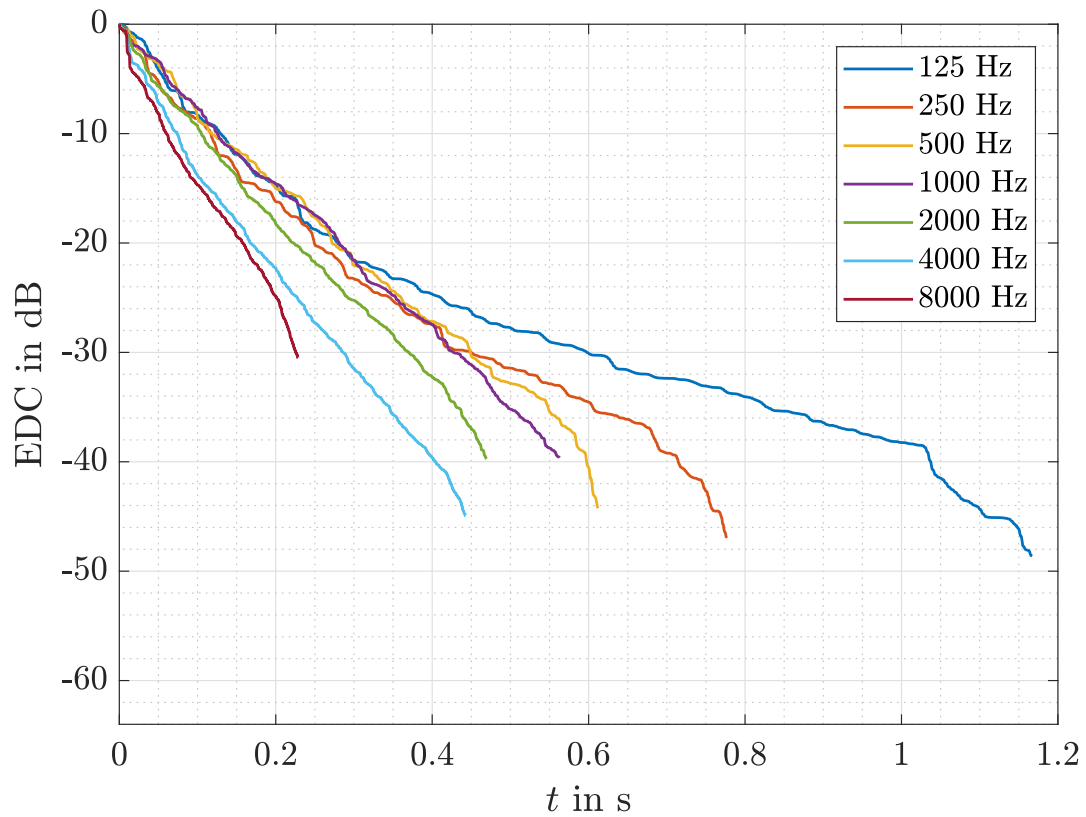


Abbildung 5.15: Energy Decay Curve mit abgeschnittener Impulsantwort und zusätzlichem Korrekturterm.

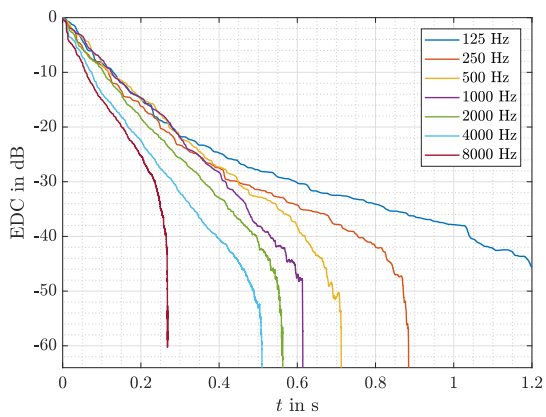


Abbildung 5.16: Energy Decay Curve mit subtrahiertem Störschall.

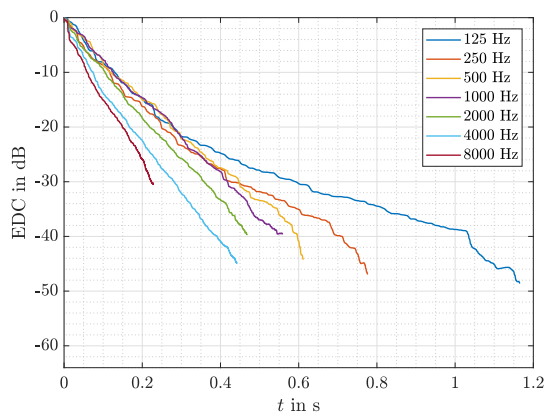


Abbildung 5.17: Energy Decay Curve mit subtrahiertem Störschall und zusätzlicher Korrektur.



### 5.2.3 Quadrocopterposition an DP3 ( $r = 1m$ , $\theta = -30^\circ$ )

Die Quadrocopterposition mit  $30^\circ$  Elevation (DP3) zur Horizontalen sollte laut [11] das beste Ergebnis liefern. Bei dieser Position sollte also der Einfluss des Störgeräusches der Drohne am niedrigsten ausfallen. In Tab. 5.8 kann man die ermittelten Nachhallzeitwerte aus der CSV-Datei von ARTA ablesen. Hier kann man bereits eine relativ gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten aus der reinen Impulsantwort (siehe Kap. 5.1) feststellen.

F (Hz)	T <sub>30</sub> (s)	T <sub>20</sub> (s)	T <sub>10</sub> (s)
63	3,0	1,34	0,6
125	1,37	0,95	0,85
250	1,13	0,86	0,77
500	0,93	0,9	0,91
1000	0,88	0,87	0,79
2000	0,76	0,72	0,71
4000	0,6	0,59	0,47
8000	0,53	0,54	0,43

Tabella 5.8: Nachhallzeiten für DP3 für die Oktavbänder von 63 Hz bis 8 kHz im HS i2.

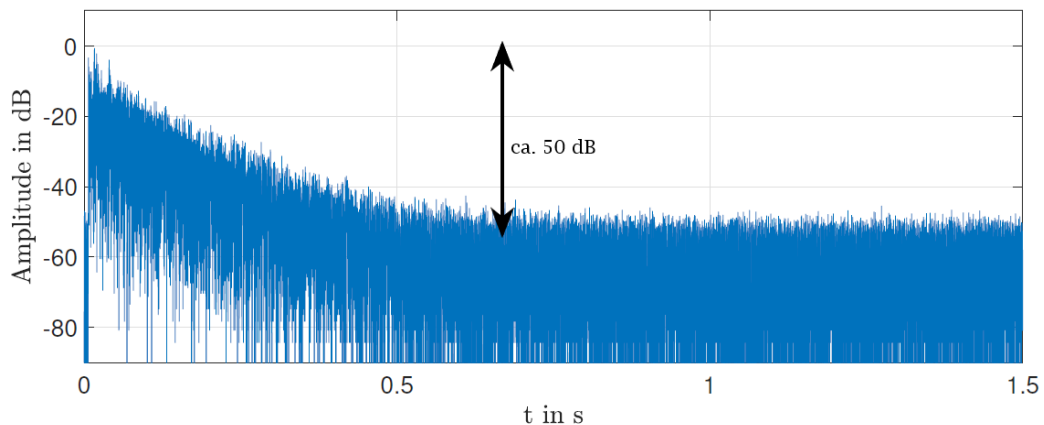


Abbildung 5.18: Impulsantwort mit Quadrocopter an DP3 in dB.

In der Abb. 5.19 und Abb. 5.20 sind wieder die Energie-Zerfallskurven in Oktavbändern für die volle Impulsantwort, sowie die abgeschnittene Impulsantwort dargestellt. Man sieht, dass die Dynamik bei der Benutzung der vollen Impulsantwort noch etwas größer ist, als bei der Quadrocopterposition unterhalb des Messmikrofons (vgl. Abb. 5.13, Abb. 5.18). Die Werte dieser zwei Positionen gleichen einander in einzelnen Oktavbändern stark.

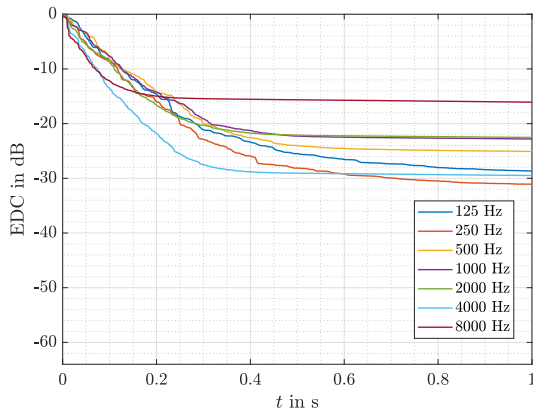


Abbildung 5.19: Energy Decay Curve in Oktavbändern mit Quadrocopterposition 30 Grad zur Horizontalen (volle Impulsantwort).

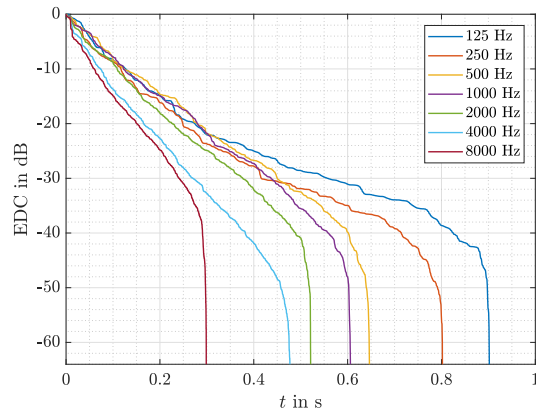


Abbildung 5.20: Energy Decay Curve mit abgeschnittener Impulsantwort.

In Tab. 5.9 ist der Vergleich zwischen den gemessenen *ARTA*-Werten und den berechneten *Matlab*-Werten für  $T_{20}$  bei voller Impulsantwort zu sehen. Man sieht, dass die *Matlab*-Werte in den ersten zwei Frequenzbändern relativ nah an den *ARTA*-Messwerten liegen. In den anderen Frequenzbändern gibt es jedoch eine große Überschätzung von  $T_{20}$ . Daraus lässt sich folgern, dass man bei keiner Drohnenposition ohne den Einsatz von Störschallkompensationstechnik auskommen wird, wenn man ein vernünftiges Messergebnis erreichen will.

F (Hz)	T (s)		%Abweichung
	ARTA	MATLAB	
125	0,95	1,2	26,32%
250	0,86	0,94	9,30%
500	0,9	2,49	176,66%
1000	0,87	8,63	891,95%
2000	0,72	9,5	1219,44%
4000	0,59	0,62	5,08%
8000	0,54	15,79	2824,07%

Tabelle 5.9:  $T_{20}$  für DP3 in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz im Vergleich zwischen der Messsoftware *ARTA* und *MATLAB*. In der letzten Spalte ist die prozentuelle Abweichung zwischen *ARTA* und *Matlab* zu sehen.

Die Methode des Abschneidens mit Korrektur (Abb. 5.21) liefert sehr gute Ergebnisse (vgl. Tab. 6.3). Die Störschallkompensationstechnik der Subtraktion, welche in Abb. 5.22 angewandt wurde, liefert gleich wie auch die letzte der fünf Methoden für diese Quadrocopterposition gute Ergebnisse (siehe 5.23, vgl. Tab. 6.4, Tab. 6.5).

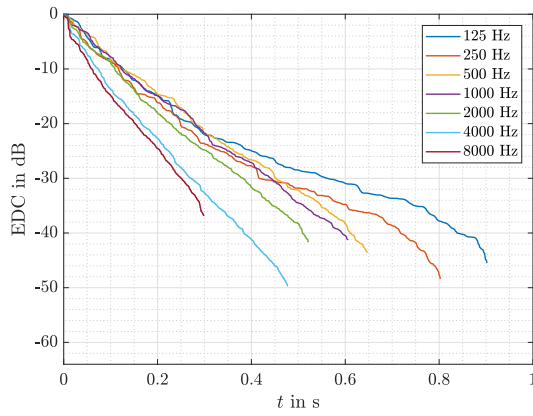


Abbildung 5.21: Energy Decay Curve mit abgescchnittener Impulsantwort und zusätzlicher Korrektur.

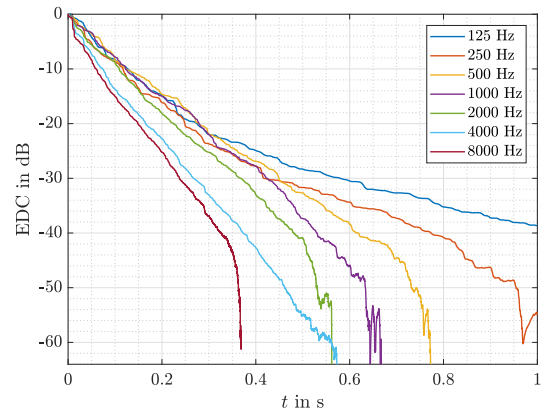


Abbildung 5.22: Energy Decay Curve mit subtrahiertem Störschall.

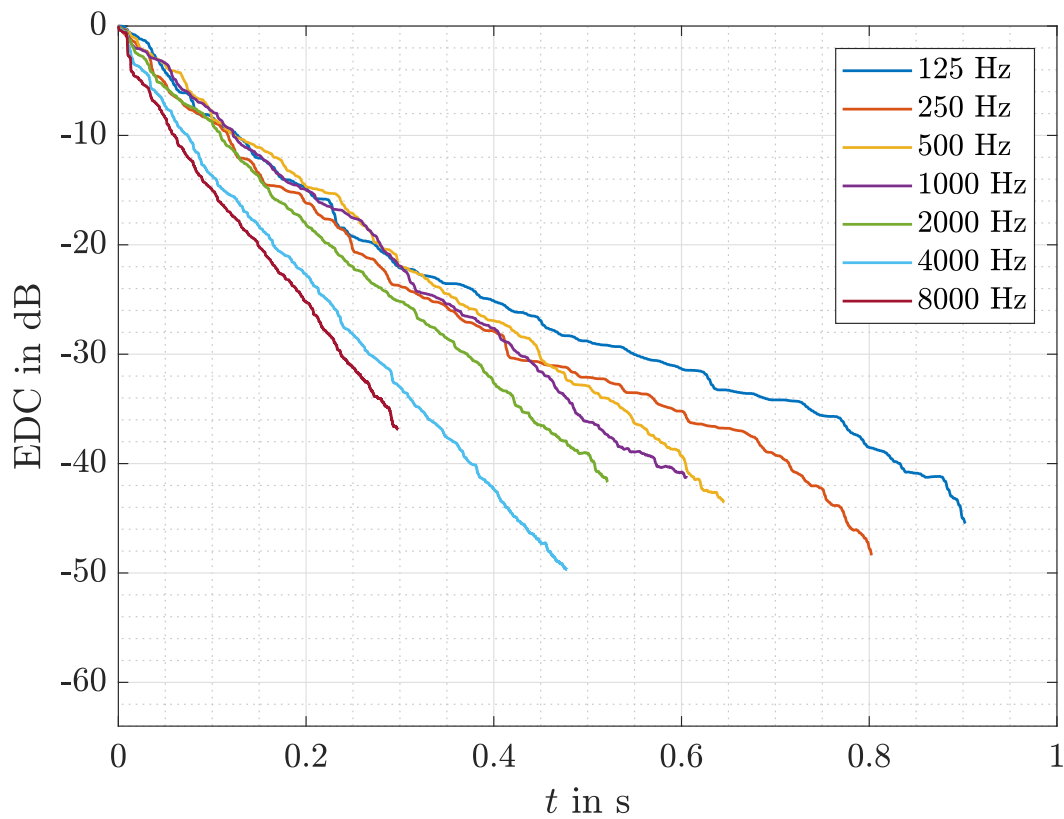


Abbildung 5.23: Energy Decay Curve mit subtrahiertem Störschall und zusätzlicher Korrektur.



## 6

## Diskussion

In diesem Kapitel sollen noch einmal detaillierte Vergleiche zwischen den einzelnen Störschallkompensationstechniken in Verbindung mit den verschiedenen Quadrocopterpositionen durchgeführt werden.

In den folgenden Tabellen wurden die ermittelten Nachhallzeitwerte auf zwei Nachkommastellen gerundet, um eine gute Übersicht zu gewährleisten. Die Werte wurden per *Matlab*-Skript und für die jeweiligen Störschallkompensationstechnik ermittelt. DP1 bis DP3 stehen für die verschiedenen Drohnenpositionen der Messung.

### 6.1 Methode mit gesamter Impulsantwort

In Tab. 6.1 befinden sich die Nachhallzeitwerte für  $T_{20}$ , ermittelt für die Referenzmessung ohne Störeinfluss im HS i2 und für die drei verschiedenen Positionen des Quadrocopters. Klar deutlich, dass es hier bei allen drei Quadrocopterpositionen, zumindest in gewissen Frequenzbändern, zu einer starken Überschätzung der Nachhallzeit kommt. Am deutlichsten ist dies jedoch bei der ersten Position festzustellen. Dies lässt sich auf den Störschall, den der Quadrocopter hauptsächlich nach unten hin abstrahlt, erklären. Bei den anderen zwei Positionen befinden sich die Werte für das 125 und 250 Hz-Band im Bereich der Referenzwerte. In den anderen Frequenzbändern lässt sich jedoch eine starke Überschätzung von  $T_{20}$  feststellen.

Somit ist zu schlussfolgern, dass eine raumakustische Messung mit einem Quadrocopter ohne jegliche Art der Störschallkompensation kaum adäquat durchzuführen ist, da es in den meisten Frequenzbändern zu einer massiven Überschätzung der Nachhallzeit  $T$  kommt.

F (Hz)	$T_{20}$ (s)			
	HS i2	DP1	DP2	DP3
125	1,05	10,55	1,1	1,22
250	0,9	17,15	1,02	0,94
500	0,88	17,2	1,79	2,49
1000	0,91	17,15	10,56	8,63
2000	0,77	16,1	11,49	9,51
4000	0,58	8,51	2,67	0,62
8000	0,53	17,15	17,2	15,8

Tabelle 6.1: Nachhallzeitwerte in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz für die verschiedenen Drohnenpositionen bei Benutzung der vollen Impulsantwort.

### 6.2 Methode mit abgeschnittener Impulsantwort

In Tab. 6.2 sind die ermittelten Nachhallzeitwerte für die Methode der abgeschnittenen Impulsantwort zu finden. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die reine Impulsantwortmessung des HS i2, welche uns als Referenz dient, mit keiner Kompensationstechnik behandelt wurde.

Für die erste Drohnenposition ist nun für  $T_{20}$  in gewissen Oktavbändern eine starke Unterschätzung festzustellen. Laut [6] soll diese Methode bei mittleren und hohen PNRs zu einer effizienten

Störgeräuschreduktion führen. In unserem Fall ist jedoch der PNR so niedrig, dass diese Technik eben zu einer starken Unterschätzung führt. Außerdem führt diese Methode zu einem weiteren Fehler ( $EDC \rightarrow \infty$ , siehe Kap. 2.2 und Kap. 5.2.1).

Für die anderen beiden Positionen führt diese Störschallkompensationstechnik in allen Oktavbändern zu relativ guten Ergebnissen und es gibt geringfügige Abweichungen in den Nachkommastellen. Für die Störschallkompensation eines Quadrocopters ist jedoch eine der folgenden Methoden zu bevorzugen.

F (Hz)	T <sub>20</sub> (s)			
	HS i2	DP1	DP2	DP3
125	1,05	0,36	1,06	1,03
250	0,9	0,59	0,89	0,86
500	0,88	0,67	0,87	0,88
1000	0,91	0,74	0,87	0,86
2000	0,77	0,76	0,75	0,79
4000	0,58	0,56	0,58	0,57
8000	0,53	0,46	0,5	0,54

*Tabelle 6.2: Nachhallzeitwerte in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz für die verschiedenen Drohnenpositionen bei abgeschnittener Impulsantwort.*

### 6.3 Methode mit abgeschnittener Impulsantwort und Korrektur

Bei dieser Methode existiert durch den zusätzlichen Korrekturterm kein Abschneidefehler mehr. Es gibt unter Umständen lediglich eine geringfügige energetische Überschätzung vor dem Schnittzeitpunkt, da hier die Impulsantwort ja noch störrauschbehaftet ist. Problem bei dieser Methode ist, dass die Auswertung von Frequenzbändern mit zu geringem PNR nicht möglich ist. Durch den geringen PNR können die Werte erst gar nicht berechnet werden (vgl. Kap. 2.3). Dieses Verhalten ist in Tab. 6.3 bei DP1 des 125 Hz-Bandes zu sehen. Weiterhin weisen die Nachhallzeiten der anderen Oktavbänder der ersten Position bei dieser Methode eine leichte Unterschätzung von T<sub>20</sub> auf.

Für die Nachhallzeitwerte der zwei anderen Drohnenpositionen erzeugt diese Methode vernachlässigbare Abweichungen. Wenn man also die Ergebnisse für DP2 und DP3 für die Methoden mit abgeschnittener Impulsantwort und mit der Methode mit zusätzlicher Korrektur vergleicht, treten nur minimale Veränderungen im Millisekundenbereich auf. Allerdings sei an dieser Stelle erwähnt, dass bereits die Nachhallzeiten der unbehandelten EDCs der DP2 und DP3 sehr gut mit denen der Referenzmessung übereinstimmen. Somit gilt es zu untersuchen, ob die letzten zwei nicht ISO-konformen Methoden noch genauere Ergebnisse liefern.

F (Hz)	T <sub>20</sub> (s)			
	HS i2	DP1	DP2	DP3
125	1,05	x	1,06	1,03
250	0,9	0,6	0,89	0,86
500	0,88	0,72	0,87	0,88
1000	0,91	0,8	0,88	0,86
2000	0,77	0,78	0,75	0,79
4000	0,58	0,57	0,58	0,57
8000	0,53	0,48	0,53	0,54

Tabelle 6.3: Nachhallzeitwerte in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz für die verschiedenen Drohnenpositionen bei abgeschnittener Impulsantwort mit Korrektur. Bei dem mit einem 'x' gekennzeichnetem Wert war der PNR für eine Auswertung zu gering.

## 6.4 Methode mit Subtraktion des Störschalls

Auf den ersten Blick liefert die Methode mit Subtraktion des Störschalls ebenfalls gute Ergebnisse. Allerdings produziert diese Methode den gleichen Fehler wie die Methode mit abgeschnittener Impulsantwort (vgl. Kap. 2.2, Kap. 2.4, Kap. 6.2).

Laut [6] funktioniert diese Methode gut für das Modell, jedoch nicht für eine reale Messung. Diese Methode führt bei niedrigen PNRs zu einer Unterschätzung der Nachhallzeit T. Diese Unterschätzung ist zum Beispiel auch bei DP1 in den ersten zwei Frequenzbändern gut zu erkennen. Für die anderen Drohnenpositionen liefert diese Methode gute Ergebnisse. Diese stimmen gut mit der Referenzmessung überein und weichen meist nur im ein- bis zweistelligen Millisekundenbereich von den Werten der anderen Kompensationstechniken ab. Um einen vollständigen Überblick zu gewährleisten, soll nun noch die letzte der in Kap. 2 besprochenen Kompensationstechniken in der Praxis analysiert werden.

F (Hz)	T <sub>20</sub> (s)			
	HS i2	DP1	DP2	DP3
125	1,05	0,58	1,06	1,03
250	0,9	0,69	0,89	0,85
500	0,88	0,76	0,87	0,87
1000	0,91	0,8	0,85	0,84
2000	0,77	0,76	0,74	0,76
4000	0,58	0,56	0,57	0,57
8000	0,53	0,49	0,51	0,52

Tabelle 6.4: Nachhallzeitwerte in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz für die verschiedenen Drohnenpositionen bei Subtraktion des Störschalls.

## 6.5 Methode mit Abschneiden, Subtraktion und Korrektur

Laut [6] soll diese Kompensationstechnik die kleinste Empfindlichkeit gegenüber Störgeräuscheinflüssen aufweisen. Sie ist jedoch nicht mehr in der *ISO-3382* enthalten [3]. Diese Methode weist bei zu geringem PNR allerdings dasselbe Problem wie die Methode mit Abschnitt und Korrektur auf (vgl. Kap. 2.5, Kap. 6.3). In diesem Fall kann die Nachhallzeit nicht berechnet werden (vgl. 125 Hz-Band für DP1 in Tab. 6.5).

Für die weiteren Positionen liefert diese Technik annähernd dieselben Werte wie die Methode mit Abschneiden und Korrektur. Die Werte sind im Vergleich zur Referenzmessung um einige Milli-

sekunden geringer. Dies lässt sich wohl auf das Zusammenwirken aller Kompensationstechniken zurückführen, da hier ja alle Techniken in einer zusammengefasst werden. Die Störschallkompensationstechniken mit Abschneiden und Korrektur sowie diese Methode sind, in Hinsicht auf eine raumakustische Messung mit Störgeräuscheinflüssen, zu bevorzugen. Genauer soll darauf noch in Kap. 6.7 eingegangen werden.

F (Hz)	T <sub>20</sub> (s)			
	HS i2	DP1	DP2	DP3
125	1,05	x	1,05	1,02
250	0,9	0,6	0,89	0,85
500	0,88	0,68	0,86	0,87
1000	0,91	0,78	0,85	0,85
2000	0,77	0,73	0,74	0,76
4000	0,58	0,56	0,57	0,57
8000	0,53	0,46	0,5	0,52

Tabelle 6.5: Nachhallzeitwerte in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz für die verschiedenen Drohnenpositionen bei Abschneiden der Impulsantwort, Subtraktion des Störschalls und Korrektur. Bei dem mit einem 'x' gekennzeichnetem Wert war der PNR für eine Auswertung zu gering.

## 6.6 Auswertung über T<sub>30</sub> und EDT

In Tab. 6.6 ist eine Auswertung der unteren Frequenzbänder für T<sub>30</sub> sowie für die EDT bei Verwendung der Methode mit Abschneiden und Korrektur zu sehen. Für DP1 bekommt man hier gar keine Ergebnisse mehr aufgrund des zu niedrigen PNRs. Laut [6] sollte man einen Sicherheitsabstand von ca. 15 dB zusätzlich zur normal benötigten Dynamik für die jeweilige Nachhallzeit einhalten, welcher durch den hohen Störpegel bei DP1 nicht möglich war. Bei den anderen zwei Positionen führt die Auswertung über T<sub>30</sub>, gleich wie bei der Referenzmessung, zu einer leichten Überschätzung von T. Die Auswertung über die EDT liefert allerdings für alle Positionen Ergebnisse. Diese führen zu einer Unterschätzung von T. Bei einer Auswertung über T<sub>60</sub> würde man für keine Drohnenposition mehr ein Ergebnis bekommen, da spätestens dann die Dynamik nicht mehr ausreicht.

F (Hz)	T <sub>30</sub> (s)			
	HS i2	DP1	DP2	DP3
125	1,65	x	1,5	1,38
250	1,25	x	1,1	1,11
500	1,02	x	0,96	0,96
EDT (s)				
125	0,75	0,66	0,78	0,76
250	0,71	0,7	0,7	0,7
500	0,85	0,81	0,71	0,74

Tabelle 6.6: Nachhallzeitwerte in Oktavbändern von 125 Hz bis 500 Hz für die verschiedenen Drohnenpositionen bei Abschneiden der Impulsantwort mit zusätzlicher Korrektur. Bei dem mit einem 'x' gekennzeichnetem Wert war der PNR für eine Auswertung zu gering.



## 6.7 Vergleich der Methoden

Wie gut die einzelnen Techniken in der Theorie funktionieren sollten, wurde in Kap. 2.6 behandelt. Nun zum Vergleich aller Methoden in der Praxis. Die unterschiedlichen Kompensationstechniken sind in Abb. 6.1 dargestellt. Für diesen Vergleich wurde eine breitbandige Analyse mithilfe der *ITA-Toolbox* und *Matlab* für die Quadrocopterposition unterhalb des Messmikrofons durchgeführt. Warum dies für DP2 durchgeführt wurde, ist in Kap. 7.1 zu lesen.

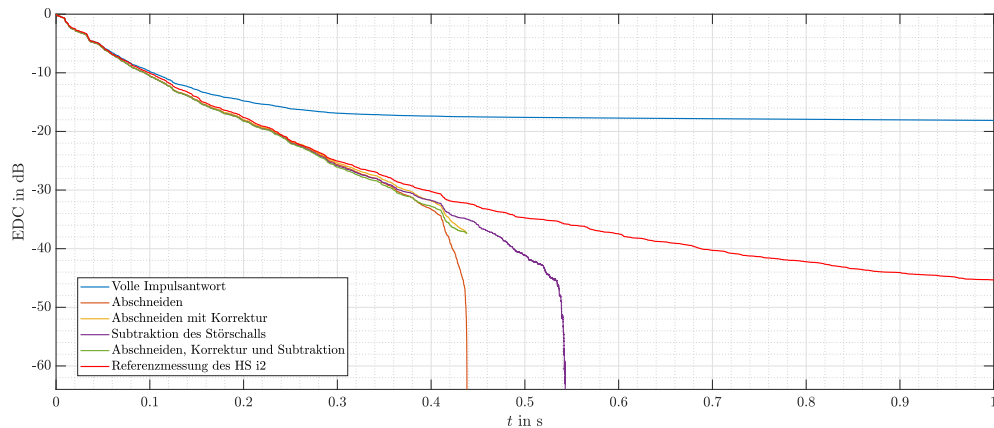


Abbildung 6.1: Hier im Vergleich für DP2 die breitbandigen EDCs für die fünf verschiedenen angewandten Störschallkompensationstechniken.

Was in Abb. 6.1 sofort ersichtlich ist, ist die starke Überschätzung der Energie-Zerfallskurve bei Nutzung der vollen Impulsantwort. Dies lässt sich auch aus Tab. 6.7 entnehmen. Es wurde ein Wert von über 14 s für die breitbandige  $T_{20}$  ermittelt. An dieser Stelle sei erwähnt, dass in Tab. 6.7 alle vier Nachkommastellen aus der *Matlab*-Auswertung angegeben wurden, um auf kleinere Details eingehen zu können. Außerdem ist hier auch die prozentuelle Abweichung zur Referenzmessung zu sehen.

Störschallkompensationstechnik	$T_{20}$ (s)	Abweichung von Referenzmessung
Volle Impulsantwort	14,4895	1808,77 %
Abschneiden	0,7435	2,05 %
Abschneiden mit Korrektur	0,7578	0,17 %
Subtraktion des Störschalls	0,7386	2,70 %
Abschneiden, Subtraktion und Korrektur	0,7365	2,98 %
Referenzmessung HS i2	0,7591	-

Tabelle 6.7: Breitbandig ausgewertete Nachhallzeitwerte für DP2 und Referenzmessung, sowie die prozentuellen Abweichungen zur Referenzmessung.

Alle weiteren Methoden liefern im Vergleich mit der Referenzmessung sehr gute Ergebnisse. Die Methode des Abschneidens soll laut [6] bei kleinem PNR zu einer Unterschätzung der Nachhallzeit  $T$  führen. Dies lässt sich bei den Ergebnissen der Messung minimal feststellen, da es zu einer Abweichung von ca. 15 ms zwischen Abschneiden und der Referenzmessung kommt.

Bei zu geringem PNR führt diese Methode zu weiteren Problemen. Dies war für diese Quadrocopterposition jedoch nicht der Fall. Mit einer Abweichung von ca. 1 ms zwischen der Referenzmessung und dieser Methode sind das äußerst zufriedenstellende Ergebnisse.

Die Methode mit Subtraktion des Störschalls liefert mit ca. 20 ms Abweichung von der Referenzmessung

renzmessung eine etwas größere Unterschätzung von  $T_{20}$ . Was laut [6] zu erwarten ist (vgl. Kap. 2.4, Kap. 2.6). Dies spiegelt sich aufgrund der relativ geringen Abweichungen in unserer Messung jedoch nicht hundertprozentig wieder.

Die letzte Methode sollte die besten Ergebnisse in Hinsicht auf Störschallkompensation liefern. Interessanterweise ist mit 22 ms die Abweichung von der Referenzmessung am größten. Dies lässt sich womöglich darauf zurückführen, dass bei dieser Methode alle Methoden angewandt werden und uns so ein wenig Energie der Impulsantwort fehlt. Bei Störschall mit hohem Pegel ist diese Methode vermutlich trotzdem zu bevorzugen. Ein weiterer Grund für die Unterschätzung ist vermutlich, dass diese Störschallkompensationstechniken von Guski und Vorländer hauptsächlich für die Unterdrückung eines Störgeräusches mit konstantem Leistungsdichtespektrum (weißes Rauschen) entwickelt wurden.

## 7

## Fazit und Ausblick

### 7.1 Fazit

Prinzipiell hat sich gezeigt, dass unter gewissen Voraussetzungen eine raumakustische Messung mit einer Drohne durchführbar ist. Man muss aber auch bedenken, dass das Behandeln der Impulsantwort mit einer Störschallkompensationstechnik immer ein Eingriff in die natürlich aufgenommene Impulsantwort darstellt.

Außerdem ist aufgrund der eingeschränkten Dynamik in den meisten Fällen nur eine Evaluierung von  $T_{20}$  möglich. Die Auswertung der Messung hat gezeigt, dass die Positionen DP2 und DP3 gegenüber DP1 zu bevorzugen sind. Um eine korrekte Auswertung ohne weitere Fehlerproduktion zu gewährleisten, kommen wohl nur zwei Störschallkompensationstechniken in Frage. Diese wären das Abschneiden mit Korrektur (vgl. Kap. 2.3, Kap. 6.3) oder die nicht *ISO*-konforme Technik mit Abschneiden der Impulsantwort, Subtraktion des Störschalls und Korrektur (vgl. Kap. 2.5, Kap. 6.5). Bei diesen Techniken muss man allerdings auf einen ausreichend hohen PNR achten. Andernfalls können in gewissen Frequenzbändern (vgl. Tab. 6.3 und Tab. 6.5) Ergebnisse ausbleiben. Da die letztere der genannten Methoden die geringste Empfindlichkeit gegenüber Störschalleinflüssen aufweist, wäre diese Methode bei einem sehr hohen Pegel der Drohne zu bevorzugen. Es wäre sinnvoll, diese Methode mit in die *ISO-3822-1* aufzunehmen [3]. In Kap. 6.7 hat sich bei der breitbandigen Analyse allerdings gezeigt, dass die Störschallkompensationstechnik mit Abschneiden und Korrektur das beste Ergebnis liefert. Diese wies bei der Auswertung die geringste Abweichung von der Referenzmessung auf. Ein Vorteil bei der Nutzung dieser Methode wäre natürlich auch, dass diese bereits in der *ISO-Norm* enthalten ist. Die Positionen DP2 und DP3 liefern beide, bei Anwendung der passenden Kompensationstechnik, sehr gute Ergebnisse.

### 7.2 Ausblick

Da gewisse Untersuchungen und weiterführende Schritte den zeitlichen Rahmen der Arbeit gesprengt hätten, möchte ich an dieser Stelle einen kurzen Ausblick geben. Um in naher Zukunft eine raumakustische Messung mit einem auf der Drohne fixierten Mikrofon zu tätigen, ist aus praktischen Gründen DP2 zu bevorzugen. Bei dieser Position befand sich der Quadrocopter unterhalb des Messmikrofons. Man könnte also eine Vorrichtung für einen Quadrocopter entwickeln, um das Messmikrofon an einer Antenne am Flugobjekt zu befestigen. Hier müsste man einen geeigneten Radius zwischen Quadrocopter und Mikrofon finden. Als Kompensationstechnik gegen den Störschall würde ich die Methode mit Abschneiden und Korrektur, oder jene nicht *ISO*-konforme Methode, welche alle Kompensationstechniken beinhaltet, verwenden, um gute Ergebnisse zu bekommen. Des Weiteren gibt es noch viele Gegebenheiten eines Quadrocopters in Zusammenhang mit raumakustischen Messungen, die man untersuchen könnte. Ein möglicher nächster Schritt wäre, sich Wissen über die genaue Abstrahlcharakteristik von Quadrocoptern anzueignen. Hierzu könnte man eine Messung mit einem Quadrocopter im Mittelpunkt und Messmikrofonen in gewissen Azimutwinkeln angeordnet über einen Halbkreis durchführen. Dadurch könnte sich vielleicht eine noch besser geeignete Mikrofonposition für eine Messung finden. Weitere Schritte wären, genauere Untersuchungen am Markt der erhältlichen Quadroco-

pter durchzuführen, um sicher gehen zu können, dass man den am geeignetsten Copter für eine raumakustische Messung zur Verfügung hat. Damit gehen die Planungsmöglichkeiten einher, die vorab einer Messung festlegbar wären. Die *DJI Mavic 2 Pro* beispielsweise hat ein Feature, wo der Messflug vorab planbar wäre. Mittels Computer, Tablet oder Ähnlichem kann man vorab eine Flugroute sowie das Verharren an gewissen Messpunkten festlegen. Dadurch könnte man eine vollautomatisierte raumakustische Messung mit einer hohen Messpunktdichte durchführen. Um einen Vergleich zwischen den Messungen im HS i2 ziehen zu können, könnte man Messungen in diversen anderen Räumen oder Konzerthäusern durchführen. Als letzten hier erwähnten Schritt wäre eine weitere Recherche über Störschallkompensationstechniken möglich und ob andere nicht in der Arbeit erwähnte Methoden zu noch besseren Ergebnissen führen (z.B. Beamforming).

# Literaturverzeichnis

- [1] S. Weinzierl, *Handbuch der Audiotechnik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [2] E. Kurz, “Raumakustik Laborskript,” *Technische Universität Graz*, pp. 16–24, 39–46, 2019.
- [3] “ISO 3382-1: Akustik - Messung von raumakustischen Parametern - Teil 1: Aufführungsplätze,” *Österreichisches Normungsinstitut*, 2009.
- [4] H. W. Löllmann and P. Vary, “Estimation of the Reverberation Time in noisy Environments,” *Institute of Communication Systems and Data Processing RWTH Aachen University*, 2008.
- [5] M. R. Schroeder, “New Method of Measuring Reverberation Time,” *Acoustical Society of America*, vol. 37, pp. 409–412, 1965.
- [6] M. Guski and M. Vorländer, “Comparison of Noise Compensation Methods for Room Acoustic Impulse Response Evaluations,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 100, pp. 320–327, 2014.
- [7] A. Lundeby, T. E. Vigran, H. Bietz, and M. Vorländer, “Uncertainties of Measurements in Room Acoustics,” *Acustica*, vol. 81, pp. 344–355, 1995.
- [8] W. T. Chu, “Comparison of reverberation measurements using Schroeder’s impulse method and decay-curve averaging method,” *Acoustical Society of America*, vol. 63, pp. 1444–1450, 1978.
- [9] Duden, “Drohne,” <https://www.duden.de/node/35249/revision/35278>, [Online; accessed 05-01-2020].
- [10] Y. Zeng, Q. Wu, and R. Zhang, “Accessing From the Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and Beyond,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 12, pp. 2327,2328, Dec. 2019.
- [11] J. Klug, D. Hollosi, A. Volgenandt, C. Rollwage, and J. Bitzer, “Analyse akustischer Emissionen und Profile ziviler Drohnen,” *DAGA 2016 Aachen*, 2016.
- [12] C. E. Tinney and J. Sirohi, “Multirotor Drone Noise at Static Thrust,” *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, vol. 56, no. 7, pp. 1–11, Jul. 2018.
- [13] G. Graber and W. Weselak, “Raumakustik Vorlesungsskript,” *Technische Universität Graz*, pp. 56–57, 196–205, 2016.
- [14] ITA-Toolbox, “A MATLAB Toolbox for the needs of acousticians,” Institute of Technical Acoustics, RWTH Aachen University, 2013, <http://www.ita-toolbox.org/>.
- [15] I. Mateljan, “Arta Program for Impulse Response Measurement and Real Time Analysis of Spectrum and Frequency Response - User Manual,” *Artalabs*, 2019.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	LTI-System mit Addition des Drohnenstörschalls. . . . .	7
1.2	Beispiel einer Abklingkurve [2]. . . . .	8
2.1	Beispiel einer Raumimpulsantwort mit zugehöriger Energy Decay Curve, bei Benutzung der vollen Impulsantwort für die Rückwärtsintegration [6]. . . . .	14
2.2	Beispiel einer Raumimpulsantwort und zugehöriger Energy Decay Curve mit abgeschnittener Impulsantwort [6]. . . . .	14
2.3	Beispiel einer Raumimpulsantwort und zugehöriger Energy Decay Curve mit abgeschnittener Impulsantwort und Korrekturterm für das Abschneiden [6]. . . . .	16
2.4	Beispiel einer Raumimpulsantwort und zugehöriger Energy Decay Curve mit Subtraktion des geschätzten Störschallpegels [6]. . . . .	16
2.5	Beispiel einer Raumimpulsantwort und zugehöriger Energy Decay Curve mit abgeschnittener Impulsantwort, Subtraktion des Störschalls und Korrektur für das Abschneiden [6]. . . . .	18
2.6	Relativer Fehler der Nachhallzeit $T_{40}$ für Modellmessung (oben) und reale Messung (unten) [6]. . . . .	19
3.1	DJI Mavic 2 Pro. . . . .	22
3.2	Ausgeprägte Pulshaftigkeit im Zeitsignal einer Drohne (Align M480L) [11]. . . . .	23
3.3	Zeitsignal einer Drohne im Fernfeld (realer Flug) [11]. . . . .	23
3.4	Schalldruckpegel für eine Drohne mit ca. 23 cm großen Propellerdurchmesser für verschiedene Propellerdrehfrequenzen. [12]. . . . .	24
3.5	Spektrogramm für eine bestimmte Richtung mit (a) schneller werdender Drehzahl eines Propellers, (b) schneller werdender Drehzahl von vier Propellern, (c) asynchron laufender Propeller [11]. . . . .	25
3.6	Richtcharakteristiken für verschiedene Oktavbänder der gemessenen Drohnen [11].	26
4.1	Der für die Messung genutzte Quadrocopter <i>DJI Mavic 2 Pro</i> . . . . .	27
4.2	Der Messaufbau im HS i2 inklusive Lautsprecher und Mikrofonposition. . . . .	29
4.3	Distanzen der verschiedenen Messpositionen. . . . .	30
4.4	Aufbau der Testmessung mit Bluetooth-Lautsprecher. . . . .	31
4.5	Beispiel einer aufgenommen Impulsantwort mittels <i>ARTA</i> . . . . .	32
4.6	Quadrocopter im Anflug auf eine Messposition. . . . .	32
5.1	Impulsantwort des HS i2 in dB. . . . .	33
5.2	Energy Decay Curve in Oktavbändern des HS i2. . . . .	34
5.3	Interpolation der Nachhallzeitgeraden für 250 Hz. In blau die EDC bei 250 Hz und in rot die geschätzte Nachhallzeitgerade. . . . .	35
5.4	Interpolation der Nachhallzeitgeraden für 1000 Hz. In blau die EDC bei 1000 Hz und in rot die geschätzte Nachhallzeitgerade. . . . .	35
5.5	Impulsantwort mit Quadrocopter oberhalb des Messmikrofons in dB. . . . .	36
5.6	Energy Decay Curve in Oktavbändern mit Quadrocopter (volle Impulsantwort). .	37
5.7	Nachhallzeitgerade für 1000 Hz. . . . .	37
5.8	EDC mit abgeschnittener Impulsantwort. . . . .	38
5.9	EDC mit abgeschnittener Impulsantwort und Korrektur. . . . .	38
5.10	$T_{20}$ bei 250 Hz (Subtraktion von Störschall). . . . .	39
5.11	$T_{20}$ bei 250 Hz (Subtraktion und Korrektur). . . . .	39
5.12	Impulsantwort mit Quadrocopter unterhalb des Messmikrofons in dB. . . . .	40

---

5.13	Energy Decay Curve in Oktavbändern mit Quadrocopterposition unter dem Messmikrofon (volle Impulsantwort). . . . .	41
5.14	Energy Decay Curve mit abgeschnittener Impulsantwort. . . . .	41
5.15	Energy Decay Curve mit abgeschnittener Impulsantwort und zusätzlichem Korrekturterm. . . . .	42
5.16	Energy Decay Curve mit subtrahiertem Störschall. . . . .	42
5.17	Energy Decay Curve mit subtrahiertem Störschall und zusätzlicher Korrektur. . .	42
5.18	Impulsantwort mit Quadrocopter an DP3 in dB. . . . .	43
5.19	Energy Decay Curve in Oktavbändern mit Quadrocopterposition 30 Grad zur Horizontalen (volle Impulsantwort). . . . .	44
5.20	Energy Decay Curve mit abgeschnittener Impulsantwort. . . . .	44
5.21	Energy Decay Curve mit abgeschnittener Impulsantwort und zusätzlicher Korrektur. .	45
5.22	Energy Decay Curve mit subtrahiertem Störschall. . . . .	45
5.23	Energy Decay Curve mit subtrahiertem Störschall und zusätzlicher Korrektur. . .	45
6.1	Hier im Vergleich für DP2 die breitbandigen EDCs für die fünf verschiedenen angewandten Störschallkompensationstechniken. . . . .	51

# Tabellenverzeichnis

5.1	Nachhallzeiten der Referenzmessung für die Oktavbänder von 63 Hz bis 8 kHz im HS i2. . . . .	34
5.2	$T_{20}$ in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz im Vergleich zwischen der Messsoftware <i>ARTA</i> und <i>MATLAB</i> . In der letzten Spalte ist die prozentuelle Abweichung zwischen <i>ARTA</i> und <i>Matlab</i> zu sehen. . . . .	35
5.3	Nachhallzeiten für DP1 für die Oktavbänder von 125 Hz bis 8 kHz im HS i2. . . . .	36
5.4	$T_{20}$ in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz im Vergleich zwischen der Messsoftware <i>ARTA</i> und <i>MATLAB</i> bei voller Impulsantwort. In der letzten Spalte ist die prozentuelle Abweichung zwischen <i>ARTA</i> und <i>Matlab</i> zu sehen. . . . .	37
5.5	$T_{20}$ in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz im Vergleich zwischen der Messsoftware <i>ARTA</i> und <i>MATLAB</i> bei abgeschnittener Impulsantwort. In der letzten Spalte ist die prozentuelle Abweichung zwischen <i>ARTA</i> und <i>Matlab</i> zu sehen. . . . .	38
5.6	Nachhallzeiten für DP2 für die Oktavbänder von 63 Hz bis 8 kHz im HS i2. . . . .	40
5.7	$T_{20}$ für DP2 in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz im Vergleich zwischen der Messsoftware <i>ARTA</i> und <i>MATLAB</i> . In der letzten Spalte ist die prozentuelle Abweichung zwischen <i>ARTA</i> und <i>Matlab</i> zu sehen. . . . .	41
5.8	Nachhallzeiten für DP3 für die Oktavbänder von 63 Hz bis 8 kHz im HS i2. . . . .	43
5.9	$T_{20}$ für DP3 in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz im Vergleich zwischen der Messsoftware <i>ARTA</i> und <i>MATLAB</i> . In der letzten Spalte ist die prozentuelle Abweichung zwischen <i>ARTA</i> und <i>Matlab</i> zu sehen. . . . .	44
6.1	Nachhallzeitwerte in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz für die verschiedenen Drohnenpositionen bei Benutzung der vollen Impulsantwort. . . . .	47
6.2	Nachhallzeitwerte in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz für die verschiedenen Drohnenpositionen bei abgeschnittener Impulsantwort. . . . .	48
6.3	Nachhallzeitwerte in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz für die verschiedenen Drohnenpositionen bei abgeschnittener Impulsantwort mit Korrektur. Bei dem mit einem 'x' gekennzeichnetem Wert war der PNR für eine Auswertung zu gering. . . . .	49
6.4	Nachhallzeitwerte in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz für die verschiedenen Drohnenpositionen bei Subtraktion des Störschalls. . . . .	49
6.5	Nachhallzeitwerte in Oktavbändern von 125 Hz bis 8 kHz für die verschiedenen Drohnenpositionen bei Abschneiden der Impulsantwort, Subtraktion des Störschalls und Korrektur. Bei dem mit einem 'x' gekennzeichnetem Wert war der PNR für eine Auswertung zu gering. . . . .	50
6.6	Nachhallzeitwerte in Oktavbändern von 125 Hz bis 500 Hz für die verschiedenen Drohnenpositionen bei Abschneiden der Impulsantwort mit zusätzlicher Korrektur. Bei dem mit einem 'x' gekennzeichnetem Wert war der PNR für eine Auswertung zu gering. . . . .	50
6.7	Breitbandig ausgewertete Nachhallzeitwerte für DP2 und Referenzmessung, sowie die prozentuellen Abweichungen zur Referenzmessung. . . . .	51



# Anhang

## Geräteliste der Messung

- Dodekaeder: Nor276(Norsonic)
- Preamp: Power Amplifier NOR28
- Akustikanalysator NTI XL2
- Messmikrofone: 2x NTI M2230, NTI M4260
- Interface: RME Fireface UCX
- Temperatur-/Hygromesser: Testo 610
- Laserdistanzmesser: Bosch DLE70
- Kalibrator: B&K 4231
- Laptop: Lenovo T500
- Software: ARTA