

Analyse von Ultraschallmikrofonsystemen zur Detektion und Identifikation von Fledermäusen

Bachelor-Thesis
zur Erlangung des akademischen Grades B.Sc.

Finn Bayer



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

Erstprüfer: Prof. Dr. Tessa Taefi

Zweitprüfer: Marc Roswag

Hamburg, 24. August 2022

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Stand der Technik	9
2.1	Theoretische Grundlagen zur Fledermauserfassung	9
2.1.1	Akustische Erfassung	10
2.1.2	Weitere Möglichkeiten der Fledermauserfassung	14
2.2	Hardware zur Aufnahme von Fledermausrufen	15
2.2.1	Batcorder	16
2.2.2	Prototyp auf Basis eines Dodotronic-Mikrofons	19
2.3	Software zur Auswertung von Fledermausrufen	21
2.3.1	bcAdmin/bcIdent/bcAnalyse	22
2.3.2	Kaleidoskop	22
2.3.3	BatScope	22
3	Anpassungen	25
3.1	Anpassungen an der Software des Dodotronic-Systems	25
3.1.1	Anforderungen	25
3.1.2	Anpassungen	26
3.2	Anpassung der Forschungsfrage	30
3.2.1	Präzisierung des Teilbereichs Detektion	30
3.2.2	Präzisierung des Teilbereichs Identifikation	30
4	Methodik	32
4.1	Detektion von Fledermausrufen	32
4.2	Identifikation von Fledermausrufen	34
4.2.1	Aufnahmequalität in Bezug auf Merkmalsextraktion	34
4.2.2	Aufnahmequalität in Bezug auf Artenbestimmung	36
5	Ergebnisse	38
5.1	Ergebnisse des Versuchs zur Detektion von Fledermausrufen	38
5.2	Ergebnisse der Versuche zur Identifikation von Fledermausrufen	39
5.2.1	Versuch zur Merkmalsextraktion	39
5.2.2	Versuch zur Artenbestimmung	41
6	Diskussion	43
6.1	Detektion	43

6.2	Identifikation	44
6.2.1	Merkmalsextraktion	44
6.2.2	Klassifikation	45
7	Fazit	47
A	Anhang	49
	Abbildungsverzeichnis	55
	Tabellenverzeichnis	56
	Literatur	57

Abkürzungsverzeichnis

B. bar. Barbastella barbastellus

E. ser. Eptesicus serotinus

HAW Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg

M. bec. Myotis bechsteinii

M. dau. Myotis daubentonii

M. em. Myotis emarginatus

M. myo. Myotis myotis

M. myst. Myotis mystacinus

M. nat. Myotis nattereri

N. noc. Nyctalus noctula

Pl. aur. Plecotus auritus

Pl. aus. Plecotus austriacus

P. pip. Pipistrellus pipistrellus

P. nath. Pipistrellus nathusii

P. kuh. Pipistrellus kuhlii

R. fer. Rhinolophus ferrumequinum

V. mur. Vespertilio murinus

WEA Windenergieanlagen

Abstract

The expansion of renewable energy, especially wind energy, requires evidence-based species protection. Therefore species protection specifications are an important component in construction projects and the operation of wind turbines. Species at risk include bats that die from collisions with rotors or from internal bleeding caused by so-called barotrauma. In order to reduce the number of victims, one research focus is on recording bat populations using acoustic detector systems at wind turbines.

As part of the „Drones4Bats“ research project, drones are being developed for this purpose and their potential applications evaluated. The bat detector systems required for this purpose must provide high-quality recordings of the ultrasonic calls of bats. The devices currently available on the market do not meet this requirement for various reasons (including delivery difficulties, lack of adjustment options).

For this reason, a prototype was developed to meet the necessary requirements. The present work investigates to what extent this prototype corresponds to the standard of commercial systems and can be used within the scope of the research project.

To this end, tests for the detection and identification of bat calls were designed and further developed. These investigate the detection range of the systems as well as feature extraction from calls and their classification. The data obtained in this work lead to the conclusion that the prototype is not yet operational. More detailed verification of the microphone calibration and some follow-up tests are required to make a conclusive statement.

The detection range is currently shorter than that of the commercial system (Mini-Batcorder, ecoObs GmbH); as the correct calibration of the prototype microphone was unclear, the input signal was attenuated during the tests. However, feature extraction and classification experiments indicate that the prototype's recordings are qualitatively equivalent to those of the Batcorder. Nevertheless, the microphone's attenuation had an impact on the number of recordings, so the results for identification must be interpreted with caution. Further research is needed to more accurately determine the performance of the prototype in order to make a robust statement about its usability in the „Drones4Bats“ project.

Zusammenfassung

Der Ausbau erneuerbarer Energien, speziell der Windenergie, erfordert einen evidenzbasierten Artenschutz. Die Vorgaben des Artenschutzes sind daher ein wichtiger Bestandteil bei Bauvorhaben und dem Betrieb von Windenergieanlagen (WEA). Zu den gefährdeten Arten gehören Fledermäuse, die durch Kollisionen mit den Rotoren oder durch innere Blutungen, hervorgerufen durch sog. Barotraumatata, sterben. Um die Anzahl dieser Schlagopfer zu verringern liegt ein Forschungsschwerpunkt auf der Erfassung der Fledermausbestände mithilfe von akustischen Detektorsystemen an WEA.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Drones4Bats“ werden zu diesem Zweck Drohnen entwickelt und ihre Einsatzmöglichkeiten evaluiert. Die dafür erforderlichen Fledermausdetektorsysteme müssen qualitativ hochwertige Aufnahmen von den Ultraschallrufen der Fledermäuse liefern. Diesem Anspruch werden die derzeit am Markt verfügbaren Geräte aus verschiedenen Gründen (u.a. Lieferschwierigkeiten, fehlende Einstellungsmöglichkeiten) nicht gerecht.

Aus diesem Grund wurde an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW) ein Prototyp entwickelt, der die notwendigen Anforderungen erfüllen soll. Die vorliegende Arbeit untersucht, inwiefern dieser Prototyp dem Standard kommerzieller Systeme entspricht und im Rahmen des Forschungsprojekts eingesetzt werden kann.

Zu diesem Zweck wurden Tests zur Detektion und Identifikation von Fledermausrufen konzipiert und weiterentwickelt. Diese untersuchen die Erkennungsreichweite der Systeme sowie die Merkmalsextraktion aus Rufen und ihre Klassifikation. Die in dieser Arbeit gewonnenen Daten führen zu der Schlussfolgerung, dass der Prototyp im aktuellen Zustand nicht einsatzfähig ist. Für eine abschließende Aussage ist eine genauere Überprüfung der Kalibrierung des Mikrofons sowie die Durchführung einiger Folgetests erforderlich.

Die Detektionsreichweite ist derzeit kürzer als die des kommerziellen Systems (Mini-Batcorder der ecoObs GmbH), da aufgrund der unklaren Kalibrierung eine Dämpfung des Eingangssignals am Mikrofon des Prototypen eingestellt werden musste. Die Versuche zur Merkmalsextraktion und zur Klassifikation deuten allerdings darauf hin, dass die Aufnahmen des Prototypen qualitativ gleichwertig mit denen des Batcorders sind. Die unklare Kalibrierung des Mikrofons hat jedoch einen Einfluss auf die Anzahl an Aufnahmen bei diesen Tests, weshalb die Ergebnisse zur Identifikation zurückhaltend interpretiert werden müssen. Es bedarf weiterer Untersuchungen zur genaueren Bestimmung der Leistungsfähigkeit des Prototyps, um eine belastbare Aussage über seine Einsatzfähigkeit im Projekt „Drones4Bats“ zu treffen.

1 Einleitung

Der Ausbau von Windenergie ist fester Bestandteil des Koalitionsvertrags der derzeitigen Bundesregierung, die zwei Prozent der Bundesfläche für Windenergie ausweisen möchte [1, S. 44]. Dazu soll eine „bundeseinheitliche Bewertungsmethode bei der Artenschutzprüfung von Windenergieanlagen entwickelt werden“ [1, S. 44]. Einen Teil der zu schützenden Arten stellen die verschiedenen, in Deutschland vorkommenden Fledermausarten dar. In den letzten Jahren wurde vermehrt hinsichtlich der Reduzierung der Schlagopferzahlen von Fledermäusen an WEA geforscht (s. u.a. [2], [3], [4], [5]).

Um Fledermauspopulationen an WEA zu beobachten und dadurch das potentielle Schlagrisiko zu bestimmen, werden verschiedene Methoden genutzt. So wird z.B. die Nachsuche zur Bestimmung der Schlagopferzahlen angewendet [6, S. 356]. Weitere Methoden sind Netzfänge, Wärmebildaufnahmen oder die akustische Detektion von Aktivität. Bei letzterer werden mithilfe von Ultraschallmikrofonen Fledermausrufe aufgenommen und analysiert, um eine Artzuweisung zu ermöglichen. Ein großer Nachteil der akustischen Erfassung ist die geringe Erfassungsreichweite der Geräte, wodurch nur eine kleine Fläche vermessen werden kann [5]. Deswegen wurden Tests mit an Heliumballons [7] oder Zeppelinen [8] angebrachten Detektoren durchgeführt. Beide Ansätze haben jedoch aufgrund der Fluggeräte Schwierigkeiten bei größeren Windstärken. In den letzten Jahren gab es einige Veröffentlichungen, die Drohnen als mögliche Fluggeräte für die Beobachtung von Fledermäusen als geeignet eingestuft haben [9] [10]. Dieser Ansatz wird auch im Forschungsprojekt der HAW „Drones4Bats“ [11] verfolgt. Dort werden Drohnen hinsichtlich ihrer technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Anwendbarkeit für die Erfassung von Fledermäusen entwickelt und evaluiert. Dieser Ansatz soll es ermöglichen, genauere Aussagen über die Fledermauspopulationen an WEA zu treffen. Die dabei eingesetzten kommerziellen Ultraschalldetektoren besitzen jedoch Nachteile hinsichtlich ihrer Benutzerfreundlichkeit und Verfügbarkeit. Aus diesem Grund wurde an der HAW im Rahmen des Moduls „IT-Systeme“ ein Ultraschallrekorder-Prototyp entwickelt. Dieser Prototyp soll die Anforderungen des Projekts hinsichtlich der Handhabung und Lieferbarkeit erfüllen und dabei qualitativ hochwertige Audioaufnahmen von Fledermausrufen erzeugen. Ebenso muss sichergestellt werden, dass ein ähnlich großer Luftraum überwacht werden kann, also die Erfassungsreichweite des Prototypen nicht bedeutend schlechter ist als die eines kommerziell erhältlichen Systems. Anderenfalls würden weniger Fledermausrufe aufgezeichnet und Fledermausvorkommen womöglich unterschätzt werden.

Hieraus leitet sich die Aufgabenstellung und Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ab:

1 Einleitung

Über den Vergleich der Aufnahmequalität des Prototypen der HAW mit dem eines kommerziellen Systems hinsichtlich der Erfassungsreichweite (Detektion von Rufen) sowie der Möglichkeit der Artenbestimmung (Identifikation von Rufen) soll untersucht werden, ob der Prototyp eine Alternative zu den bestehenden Systemen darstellt und bspw. im Projekt „Drones4Bats“ und auch darüber hinaus zur Aufnahme von Fledermausrufen eingesetzt werden kann.

Auf Grundlage des aktuellen Forschungsstands sollen ausgewählte Testmethoden (weiter-)entwickelt werden, mit denen praxisnahe vergleichende Untersuchungen zur Detektion und Identifikation von Fledermausrufen durchgeführt werden können. Ziel ihres Einsatzes ist es, Erkenntnisse über die verschiedenen Systeme hinsichtlich ihrer Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten bei der Erkennungsreichweite, Merkmalsextraktion und Klassifikation der Fledermausrufe zu gewinnen.

2 Stand der Technik

Um festzustellen, ob die Qualität der Aufnahmen des Prototyps für die Detektion und Identifikation von Fledermausrufen ausreichend ist, wird im Folgenden der derzeitige Stand der Technik beleuchtet. Dafür werden zunächst die Möglichkeiten der Fledermauserkennung mit Fokus auf der akustischen Erfassung betrachtet (s. Abschnitt 2.1). Dort werden u.a. die Parameter eines Audiosignals beschrieben, die später für die Merkmalsextraktion und die Klassifikation von Rufen genutzt werden. Anschließend wird in Abschnitt 2.2 die Hardware zur Aufnahme von Ultraschallrufen analysiert und verglichen. Dabei wird der Batcorder spezifischer betrachtet, da er im Rahmen der Arbeit als Referenzsystem für die Bewertung der Aufnahmequalität genutzt wird. Außerdem wird der zu untersuchende Prototyp beschrieben. In Abschnitt 2.3 werden die Programme zur Analyse und Auswertung der aufgenommenen Fledermausrufe dargestellt. Um ein geeignetes Programm zur Analyse der Signalqualität auszuwählen, werden sie anhand projektspezifischer Kriterien miteinander verglichen und anschließend wird die im Projekt verwendete Software BatScope eingehender erläutert.

2.1 Theoretische Grundlagen zur Fledermauserfassung

In Deutschland gibt es derzeit 25 bekannte Fledermausarten [12], von denen alle nach §44 Absatz 1, 1–3 BNatSchG unter Artenschutz stehen. Fledermäuse gehören zu der Klasse der Säugetiere und zeichnen sich u.a. durch die Nutzung von Ultraschall aus [13]. Diese nachtaktiven Tiere orientieren sich mithilfe von Ultraschall und setzen Echolokalisation ein, um ihre überwiegend aus Insekten bestehende Beute zu jagen [14] (s. Abbildung 2.1). Während lange Zeit der Forschungsschwerpunkt auf der Vogelschlagproblematik an WEA lag, wurde in den letzten Jahren auch der Einfluss von WEA auf die Fledermauspopulationen ausgiebig erforscht [15]. Fledermäuse sterben sowohl durch die direkte Kollision mit den sich bewegenden Rotorblättern, als auch durch die starken Luftverwirbelungen, die zur Verletzung von inneren Organen führen (Barotrauma) [6] [16]. Um dem entgegenzuwirken und Fledermausaktivitäten mit zu berücksichtigen, sollen die Abschaltalgorithmen von WEA angepasst werden [3] [4] [6]. Um Fledermausaktivitäten im Umkreis von WEA zu bestimmen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine Methode besteht in der akustischen Erfassung der Fledermäuse, die in Unterabschnitt 2.1.1 ausführlich beschrieben wird. Weitere Verfahren der Aktivitätserfassung und Populationsmessung werden in Unterabschnitt 2.1.2 vorgestellt. Diese werden meist zusammen mit der akustischen Erfassung eingesetzt, um

eine umfassende, unvoreingenommene und belastbare Aussage über die Fledermausaktivitäten bzw. -populationen treffen zu können [5].

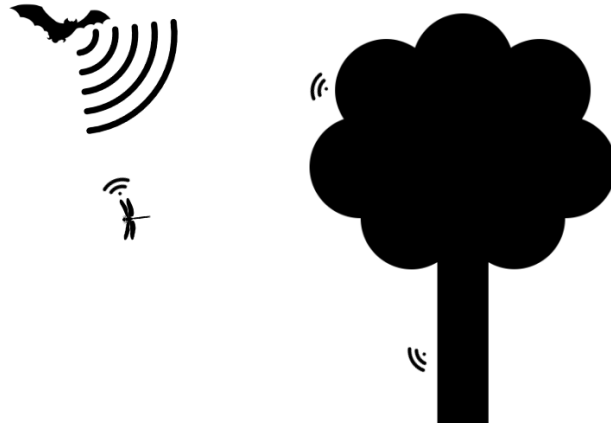


Abbildung 2.1: Darstellung eines Fledermausrufes. Durch das Aussenden von Ultraschall können sich Fledermäuse orientieren und jagen, da sie die Reflexion der ausgesendeten Rufe an Objekten wahrnehmen können.

2.1.1 Akustische Erfassung

Das Aufnehmen und Analysieren von Fledermausrufen stellt einen wichtigen Bestandteil in der Bewertung von möglichen Standorten für WEA [17] sowie deren Abschaltalgorithmen dar [18]. Im Folgenden wird aufgezeigt, wie Fledermausrufe detektiert werden, welche Einflüsse es auf die Rufe von Fledermäusen gibt, welche Merkmale bzw. Parameter sich in den Rufen zur Identifikation einer Art wiederfinden und wie diese analysiert werden.

Fledermäuse nutzen Rufe im Ultraschallbereich, um sich durch das Echo zu orientieren und mögliche Beute zu identifizieren. Die Rufe sind dabei artenspezifisch und unterscheiden sich durch verschiedene Parameter wie z.B. die Dauer oder Frequenz des Rufes. Die Bandbreite der Ruffrequenzen von in Deutschland beheimateten Fledermäusen liegt zwischen ca. 18 kHz bei Fledermäusen der Art *Nyctalus noctula* (N. noc.) und bis zu 150 kHz bei einigen Arten der *Myotis*-Gattungen [19, S. 27]. Des Weiteren unterscheiden sich die Rufe von Fledermäusen situationsbedingt. So nutzen sie verschiedene Rufmuster zur Orientierung, Jagd oder zur Kommunikation mit anderen Fledermäusen und passen diese je nach Habitat, in dem sie sich bewegen, an [20]. Während sich Fledermäuse in Wäldern zwischen Bäumen bewegen und Beute in engerer Umgebung fangen, jagen sie auf offenen Feldern ohne Hindernisse. Dementsprechend werden diese Rufe in ihrer Frequenz und Dauer angepasst, um den Anforderungen der Umgebung gerecht zu werden [21] [22]. Diese intra- und interspe-

zifische Variabilität der Rufe erschwert die Differenzierung der sich teilweise überlappenden Rufmuster der verschiedenen Arten [23]. Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) hat deshalb 2020 einen Leitfaden veröffentlicht, in dem der derzeitige Kenntnisstand zusammengefasst ist und klare Kriterien festgelegt werden, um Fledermausarten verlässlich zu identifizieren [19]. Die im folgenden Abschnitt erläuterten Bezeichnungen beziehen sich, wenn nicht anders angegeben, auf diese Publikation. Es gibt drei verschiedene Rufarten, in die Fledermausrufe unterteilt werden: Ortungsrufe (Echolokalisierungsrufe), Fanglaute und Soziallaute. Sowohl Fanglaute als auch Soziallaute sind wenig artspezifisch bzw. bisher noch nicht ausreichend untersucht und werden deshalb nicht oder nur selten zur Differenzierung genutzt [19]. Aus diesem Grund beziehen sich die folgenden Ausführungen ausschließlich auf Ortungsrufe. Diese lassen sich auf Basis ihres Frequenzverlaufs in drei Kategorien sortieren (s. auch [5, S. 49]).

Quasi-konstantfrequente Rufe (qcf/cf) Konstantfrequente Rufe (cf) beinhalten eine Frequenz, welche über die gesamte Dauer gehalten wird. Oftmals nutzen Fledermäuse, wie z.B. die Zweifarbfledermaus (*Vespertilio murinus*, s. Abbildung 2.2, links) quasi-konstantfrequente Rufe (qcf), bei denen die Frequenz nur um wenige Hertz abfällt oder ansteigt. Diese Rufe werden vor allem im offenen Gelände zur Orientierung genutzt, während im unwegsamen Luftraum eher frequenzmodulierte Rufe verwendet werden [24].

Frequenzmodulierte Rufe (fm) Frequenzmodulierte Rufe zeichnen sich durch einen sehr starken Anstieg bzw. Abfall der Frequenz innerhalb eines Rufes aus. Diese Rufe werden vor allem von Fledermäusen der *Myotis*-Gattung, wie z.B. der Wimperfledermaus (*Myotis emarginatus*, s. Abbildung 2.2, Mitte) ausgestoßen und dienen oftmals als klarer Hinweis auf diese Gattung.

Rufe mit Anteilen von qcf- und fm-Rufen (qcf-fm) Viele Arten nutzen eine Kombination aus Rufen mit qcf- und fm-Anteilen. Dabei besteht meist der Anfang aus einem fm-Teil, der dann in einen qcf-Anteil übergeht (s. z.B. den Ruf einer *Pipistrellus pipistrellus* in Abbildung 2.2, rechts).

Für die Unterscheidung zwischen den fm- und qcf-Anteilen haben Markmann und Pfeiffer (2020, S. 15) [19] folgende Kriterien festgelegt:

- **cf-Teil:** Steigung $< 0,1 \text{ kHz/ms}$
 - **qcf-Teil:** Steigung $\geq 0,1$ und $< 1 \text{ kHz/ms}$
 - **fm-Teil:** Steigung $\geq 1 \text{ kHz/ms}$
-
- **cf-Ruf:** durchschnittliche Steigung des gesamten Rufs $< 0,1 \text{ kHz/ms}$
 - **qcf-Ruf:** durchschnittliche Steigung des gesamten Rufs $\geq 0,1$ und $< 1 \text{ kHz/ms}$

2 Stand der Technik

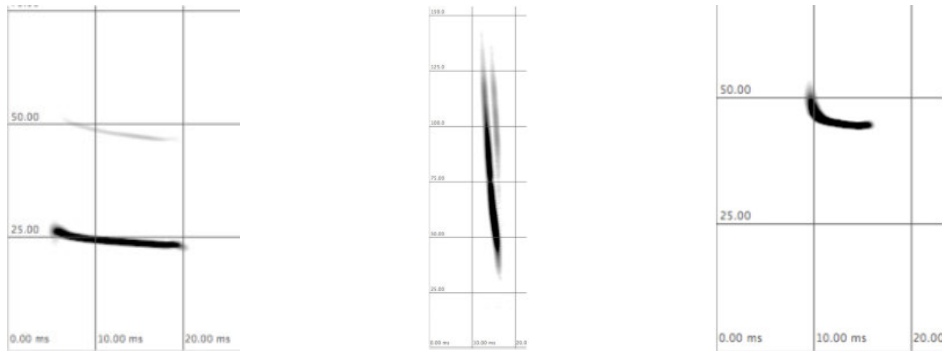


Abbildung 2.2: Die Rufe der Arten *Vespertilio murinus* (links, qcf-Ruf), *Myotis emarginatus* (Mitte, fm-Ruf) und *Pipistrellus pipistrellus* (rechts, fm-qcf-ruf). Auf der y-Achse ist die Frequenz in kHz und auf der x-Achse die Zeit in ms angegeben. Je dunkler eine Fläche, desto höher ist die Energie in dem Frequenzband zu dem Zeitpunkt im Ruf. Entnommen aus [19, S. 5, 8, 11]

- **fm-qcf-Ruf:** Der Ruf enthält fm- und qcf-Abschnitte, die jeweils mindestens 1 ms lang sind. Die durchschnittliche Steigung des gesamten Rufs muss ≥ 1 kHz betragen, ansonsten handelt es sich noch um einen qcf-Ruf.
- **fm-Ruf:** Der Ruf enthält keine Abschnitte über 1 ms Länge, deren Steigung < 1 kHz/ms ist.

Damit lassen sich die Rufe eindeutig in die verschiedenen Kategorien einordnen. Hinsichtlich der weiteren Klassifizierung der Arten gibt es einige Parameter, die sich aus der zeitlichen oder spektralen Analyse des Signals extrahieren lassen. Diese werden in Abbildung 2.3 anhand eines Beispielerufes dargestellt.

Zeitliche Parameter Der Hauptparameter im Zeitbereich ist die **Rufdauer** (D) in ms. Zusätzlich kann der **Rufabstand** in ms genutzt werden, wenn mehrere Rufe in einer Sequenz aufgezeichnet wurden. Der Rufabstand kann z.B. bei der Breitflügel-fledermaus (*Eptesicus serotinus* (E. ser.)) als klarer Anhaltspunkt zur Identifikation dienen [19, S. 44].

Spektrale Parameter Im Frequenzbereich gibt es eine Vielzahl von Merkmalen, die zur Unterscheidung der Arten genutzt werden. Die folgende Auflistung ist übernommen aus Markmann und Pfeiffer (2020, S. 18) [19]:

- **$F_{\max E}$** Frequenz maximaler Energie (= Hauptfrequenz); Frequenz mit der meisten Energie über den gesamten Rufverlauf
- **F_{start}** Startfrequenz; Frequenz am Beginn des Rufes
- **F_{end}** Endfrequenz; Frequenz am Ende des Rufes
- **$F_{\min}$** Minimalfrequenz; tiefste Frequenz im Rufverlauf; häufig fallen $F_{\min}$ und F_{end} zusammen.

- **$F_{\max}$** Maximalfrequenz; höchste Frequenz im Rufverlauf; häufig fallen $F_{\max}$ und F_{start} zusammen.
- **F_{knee}** Kniefrequenz; Frequenz am Übergang zwischen dem steileren Anfangsteil des Rufes und dem flacheren Hauptteil
- **F_{Mk}** Frequenz am Myotisknick; Knick am Ende der Rufe der Myotis-Arten, nach denen die Frequenz stark abfällt; hinter dem Knick schließt sich das sogenannte Myotisschwänzchen an
- **F_c** Charakteristische Frequenz; die niedrigste Frequenz im flacheren Hauptteil des Rufes (bei schlüsselförmigen Rufen ist hier die Steigung Null); falls sich am Ende des Rufes ein Auf- oder Abwärtshäkchen anschließt, liegt F_c immer davor; nur bei qcf- oder fm-qcf Rufen sinnvoll
- **Bandbreite** Frequenzbereich, den der Ruf von der Maximal- bis zur Minimalfrequenz überstreicht; $F_{\max} - F_{\min}$

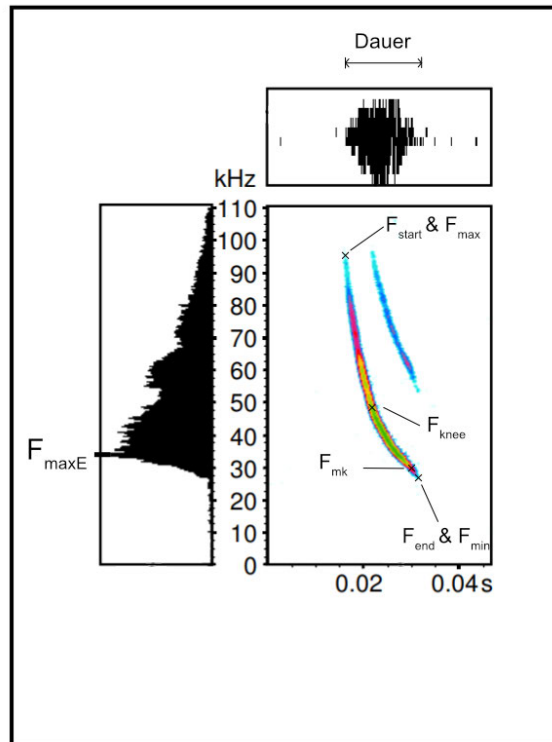


Abbildung 2.3: Fledermausruf einer *Myotis bechsteinii* (M. bec.) zur Darstellung einiger Parameter zur Identifikation einer Art. Oben ist das Oszillogramm des Rufes zur Bestimmung der Dauer dargestellt. Auf der linken Seite ist das Spektrum zu sehen, aus dem die Frequenz der maximalen Energie ($F_{\max E}$) extrahiert wird. Auf der rechten Seite ist das Spektrogramm des Rufes dargestellt. Dort sind die minimale ($F_{\min}$), maximale ($F_{\max}$), Start- und Endfrequenz (F_{start} F_{end}) sowie die Kniefrequenz (F_{knee}) und die Frequenz des Myotisknicks (F_{mk}) eingetragen. Entnommen und angepasst aus Pfalzer (2002, S. 16) [24]

Bei der Betrachtung der spektralen Parameter ist es wichtig zu beachten, dass die Ausbreitung von Schall frequenzabhängig geschieht. Die Luftabsorption der Schallenergie korreliert mit der Frequenz sowie der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit [25, Tab. 7.6]. Dabei gilt: Je höher die Frequenz, desto stärker ist die Dämpfung des Rufes. Das kann dazu führen, dass die detektierte maximale Frequenz (und damit oft auch die Startfrequenz) von aufgenommenen Rufen tiefer ist als in dem Originalruf. Dieser Effekt verstärkt sich mit steigender Entfernung zwischen Mikrofon und Fledermaus.

2.1.2 Weitere Möglichkeiten der Fledermauserfassung

Für die Erfassung von Fledermauspopulationen und deren Aktivitätsmustern an WEA gibt es verschiedene Methoden, die in diesem Unterabschnitt beschrieben werden. Dabei ist zu beachten, dass für die Sicherstellung der Qualität von Untersuchungen eine Kombination aus mehreren Methoden gewählt werden sollte, um eine fundierte Aussage treffen zu können [5] [26].

Fangnetze

Die klassische Methode zum Beobachten und Untersuchen von Fledermäusen ist die Nutzung von Fangnetzen [27]. Die Netze werden z.B. in bekannten Flugschneisen oder an Wasserstellen aufgespannt. Dabei werden verschiedene habitat- und artspezifische Varianten von Netzen und Aufspannorten genutzt, um die Fangquote und damit die Aussagekraft der Forschung zu erhöhen [28]. Vorteile des Fangens liegen vor allem in der Vielfalt der gewonnenen Informationen. Neben der Art können auch weitere biologische Parameter wie Geschlecht und Alter bestimmt werden. Außerdem ist die Ungenauigkeit bei der Artenbestimmung sehr gering [5]. Ein großer Nachteil der Netze entsteht jedoch durch ihre stationäre Anbringung in Bodennähe. Dadurch werden hochfliegende Arten sowie solche Arten, welche die Netze erkennen und ihnen ausweichen können, schlechter erfasst [26].

Telemetrie

Zur Erkennung von Flugrouten und Lebensräumen von Fledermäusen ist der Einsatz von Telemetriegeräten möglich [5]. Hier werden einzelne Tiere mit Radiotransmitter ausgestattet, um Flugdaten der Tiere zu erhalten und so z.B. Aussagen über mögliche Verhaltensänderungen durch WEA treffen zu können. Die Transmitter werden entweder extern (Halsband oder per Kleber direkt auf die Haut) angebracht oder implantiert [29]. Die dadurch gewonnenen Informationen ermöglichen spezifische Aussagen über das Verhalten von Fledermäusen an WEA, geben jedoch keine Anhaltspunkte z.B. über die Größe der Population. Diese Methode ist ein hilfreiches Instrument, um Fledermausquartiere ausfindig zu machen, damit weitergehende Tests zu ermöglichen

und so die Erfolgschancen für eine umfassende Dokumentation der Fledermausaktivitäten zu optimieren [5]. Nachteile der telemetrischen Erfassung von Fledermäusen sind das hohe Gewicht der Transmitter sowie die schwierige Befestigung an den Fledermäusen, wodurch die Aufnahmezeiträume meist begrenzt sind, da die Transmitter nach einigen Tagen abfallen [30].

Schlagopfernachsuche

Die Schlagopfernachsuche beschreibt das manuelle Durchsuchen des Gebiets um eine WEA, um tote Fledermäuse aufzufinden. Dabei wird meist morgens, vereinzelt mehrmals pro Nacht [31] oder im mehrtägigen Rhythmus [32, S. 171] gesucht, wobei der Suchradius in der Regel 50 m um die WEA beträgt [33] [34] [35]. Bei der Auswertung muss berücksichtigt werden, dass die Zahl der gefundenen Tiere u.a. durch die Genauigkeit der Suchenden und das Entwerden von Tieren durch Aasfresser beeinträchtigt wird [36] [37, S. 155]. Im Rahmen der Entwicklung von Abschaltalgorithmen für WEA eignet sich diese Methode durch die geringe zeitliche Auflösung vor allem zum Testen der Effektivität von entwickelten Algorithmen. Es lässt sich zwar keine konkrete Aussage über den Zeitpunkt der Fledermausaktivität in einer Nacht treffen, aber die ermittelten Daten können deutlich machen, ob die Algorithmen zu einer Reduktion der Schlagopferzahlen führen [38, S. 215].

2.2 Hardware zur Aufnahme von Fledermausrufen

In der Praxis werden hauptsächlich zwei verschiedene Ansätze für Mikrofonsysteme genutzt: die Aufnahme des kompletten Signals als (meist) 16 bit-Aufnahme und die Aufzeichnung von Nulldurchgängen (engl. zero-crossing) [39] [40]. Die Nulldurchgangsaufzeichnung wurde Ende des letzten Jahrtausends populärer, als die Hardware zum Aufnehmen und Analysieren von kompletten Audiosignalen im Ultraschallbereich technisch noch nicht allzu fortgeschritten war, sodass Auswertungen lange dauerten und die geringe Auflösung Probleme bei der Analyse verursachte [41]. Die zero-crossing-Aufnahme hingegen ist nicht so rechenintensiv und gibt Aufschluss über die Dauer des Rufes und über Parameter wie die Maximal- und Minimalfrequenz. Daraus lassen sich Aussagen über die Artenzugehörigkeit treffen [42, S. 118]. Durch die Verbesserung der Rechenkapazitäten ist heutzutage die in den meisten Fällen angewendete Methode die Aufnahme von kompletten Audiosignalen. Damit können alle in Unterabschnitt 2.1.1 beschriebenen Parameter ermittelt werden, um eine möglichst spezifische Identifikation der Art zu ermöglichen.

Im Forschungsprojekt „Drones4Bats“ [11] wird mit den Batcorder-Systemen der Firma ecoObs GmbH ebenfalls diese Aufnahmeart verwendet. Im Rahmen des Projekts wurden jedoch folgende Anforderungen an das genutzte System gestellt, die vom Batcorder nicht oder nicht umfänglich erfüllt werden:

- **Upload der Daten** Die aufgezeichneten Daten sollen neben dem lokalen Speichern auf einer Speicherkarte zusätzlich direkt in einen Cloud-Speicher hochgeladen werden, um eine direkte und unkomplizierte Auswertung der Daten zu ermöglichen.
- **GPS** Die Daten sollen mit GPS-Koordinaten als Metadaten versehen werden.
- **Flexibilität** Die genutzten Einstellungsparameter wie z.B. die Triggerschwelle sollen flexibel anpassbar sein.
- **Manuelle Aufnahmen** Es soll eine Aufnahme manuell gestartet und gestoppt werden können.
- **Individuelle Wahl der Einstellungen** Die Einstellungen (z.B. Triggerschwelle, Grenzfrequenzen von Filter) sollen individuell wählbar sein.
- **Verfügbarkeit** Die genutzten Systeme sollen während des Projektes erhältlich und lieferbar sein.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Lehrveranstaltung „IT-Systeme“ an der HAW von Studierenden ein System entwickelt, welches die oben beschriebenen Anforderungen umsetzt und dessen Audioaufnahmen qualitativ vergleichbar mit denen des Batcorders sein sollen. Im Folgenden werden die beiden Systeme vorgestellt und eingehender betrachtet. Auf die Beschreibung von weiteren bestehenden Aufnahmesystemen wie z.B. das UltraSoundGate von Avisoft [43] oder das Sound Meter von Wildlife Acoustics [44] wird hier verzichtet, da diese im Projekt „Drones4Bats“ nicht genutzt werden und deswegen über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen.

2.2.1 Batcorder

Die Batcorder-Reihe der Firma ecoObs GmbH besteht aus drei verschiedenen Geräten: dem Batcorder (Version 1, 2, 3, 3.1), dem GSM-Batcorder und dem Mini-Batcorder (s. Abbildung 2.4) [45]. Alle Geräte nutzen ein - laut Hersteller - omnidirektionales Elektret-Mikrofon der Firma Knowles und zeichnen die Signale mit einer Samplingrate von 500 kHz und 16 bit Amplituden-Auflösung auf. Für das Mikrofon enthält das Datenblatt keine Angaben über den Frequenzgang oder die genaue Richtcharakteristik [46]. Laut Hersteller sind die Geräte für Rufe zwischen 16 und 160 kHz geeignet und können damit die gesamte Bandbreite der Fledermausrufe aufnehmen. Die verschiedenen Batcorder-Geräte haben grundsätzlich die gleiche Funktionalität. Die Aufnahme wird über eine Triggerschwelle gesteuert. Wenn die Amplitude des vom Mikrofon eingehenden Signals über einer vorher am System einstellbaren Schwelle liegt, wird eine Aufnahme gestartet. Die möglichen Schwellwerte (engl. **Threshold**) sind beim Batcorder -18, -24, -27, -30, -36 und -42 dB und beziehen sich auf den Referenzwert von 96 dB SPL bei 40 kHz, der zum Vollausschlag führt. Auf diesen Wert ist das System laut Hersteller kalibriert. Simon, Hochradel, Mages u. a. (2016) [40] stellen fest, dass es dabei zu Abweichungen kommen kann und empfehlen deshalb eine eigene Kalibrierung mithilfe von Messmikrofonen. Wenn von einer korrekten Kalibrierung ausgegangen wird, bedeutet das, dass bei der Wahl von -36 dB als Trig-



Abbildung 2.4: Der im Projekt genutzte Mini-Batcorder der Firma ecoObs GmbH.

gerschwelle ein Signal mit 58 dB SPL zum Auslösen einer Aufnahme führt. Dabei soll laut Herstellerangaben jedoch nicht jedes Signal eine Aufnahme auslösen. Durch das Verändern der **Quality**-Einstellung am Batcorder sollen Störgeräusche erkannt und nicht aufgenommen werden [47, S. 13]. Es gibt keine genaue Erläuterung, welchen Einfluss das Ändern der Einstellung auf den Signalweg hat bzw. welche möglichen Filter oder Funktionen auf das eingehende Signal angewendet werden. Es kann ein Wert zwischen 0 und 40 sowie 99 gewählt werden, wobei 0 sehr spezifisch ist und laut Hersteller auch Fledermausrufe von der Aufnahme ausschließt und 99 unspezifisch. Des Weiteren kann eine **Critical Frequency** gewählt werden, sodass alle Signale mit einer Frequenz unter dieser **Critical Frequency** keine Aufnahme auslösen. Der Batcorder 3.1 besitzt zusätzlich eine **Noise-Filter**-Einstellung. Dort können Werte zwischen 1-10 gewählt werden, um eine hohe bis mäßige Entstörung des Signals zu erzielen. Welche Anpassungen im Signalweg durch diese Einstellung geschehen, wird nicht genauer beschrieben. Sobald die Triggerschwelle erreicht und der **Quality**-Test bestanden wurde, wird das Signal für eine bestimmte Zeit aufgezeichnet. Dieser sog. **Posttrigger**-Wert kann zwischen 0 und 800 ms in 200 ms Abständen gewählt werden. Wenn innerhalb dieses Zeitraums die Triggerschwelle erneut überschritten wird, verlängert sich die Aufnahme um den **Posttrigger**-Wert. Zusätzlich gibt es einen **Pretrigger**-Zeitraum. Dies ist ein Audiospeicher, welcher die letzten 50 ms des Mikrofonsignals zwischenspeichert und beim erstmaligen Überschreiten des **Threshold** vor das aufgezeichnete Signal gespeichert wird. Dadurch werden auch Rufe, die leise starten und dann lauter werden, komplett aufgezeichnet. Nach Ablauf des Aufnahmezeitraums wird die aufgenommene Rufsequenz auf eine SD-Karte gespeichert. Ein Ablauf der Aufnahme mit **Pre**- und **Posttrigger**ern ist in Abbildung 2.5 zu sehen. Alle Signale werden durch einen Tiefpass- und einen Hochpass-Butterworth Filter 10. Ordnung gefiltert. Der Hochpass hat eine Grenzfrequenz von 16 kHz und der Tiefpass von 150 kHz.

Die Geräte sind mit einem Akkupack ausgestattet, um autonome Aufzeichnungen

Pretrigger/Posttrigger

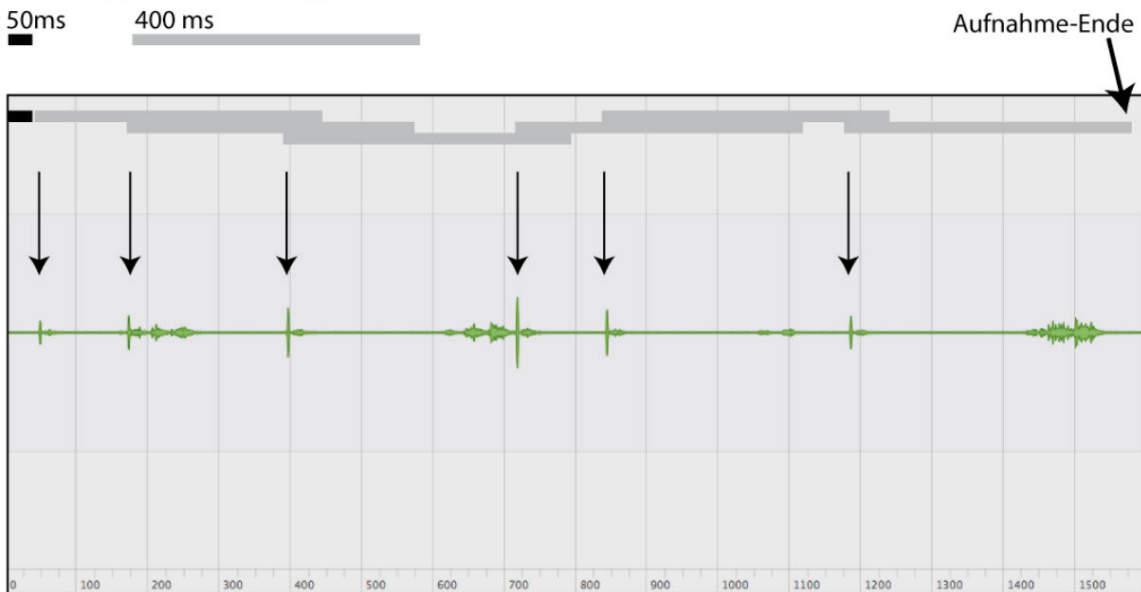


Abbildung 2.5: Visualisierung der Pre-/Posttriggerfunktionalität. Es wird ein beispielhaftes Signal einer Aufnahme dargestellt. Die x-Achse zeigt die Zeit in Millisekunden an. Die Pfeile zeigen an, wann das Signal die eingestellte Triggerschwelle überschreitet. Darüber sind die Pre- und Posttriggerzeiträume eingezeichnet. Entnommen aus ecoObs GmbH (2018, S. 15) [47]

im Feld ohne externe Stromquelle zu ermöglichen. Es gibt drei Aufnahmemodi, aus denen gewählt werden kann: der Auto + Timer Modus, der automatische und der manuelle Modus.

- **Manuell** Wenn der manuelle Modus gewählt wurde, müssen die Aufnahmen manuell gestartet und gestoppt werden. Die Erkennungsalgorithmen und Triggerschwellen sind in dem Modus ausgesetzt.
- **Automatisch** Beim automatischen Modus wird die Ruferkennung durch das Drücken der Rec-Taste gestartet und beendet. In dem Zeitraum der Ruferkennung werden Signale, die den eingestellten Parametern entsprechen, automatisch abgespeichert.
- **Auto + Timer** Im Auto + Timer Modus lässt sich eine Start- und Stoppzeit für die Ruferkennung einstellen. Dadurch lassen sich Feldtests über mehrere Tage durchführen, ohne dass die Erkennung händisch an- oder ausgeschaltet werden muss.

Der Funktionsumfang der Batcorder-Geräte (ab Version 2) kann mit Erweiterungen vergrößert werden. Diese umfassen eine Windkraftanlagen (WKA)-Erweiterung zum Einsatz an WEA, eine Box-Erweiterung zur Langzeiterfassung von Fledermäusen und

ein Turmmikrofon zur Erfassung von Audiosignalen an WEA. Sowohl die WKA- als auch die Box-Erweiterung beinhalten Tools zum täglichen, automatisierten Testen der Mikrofonempfindlichkeit.

Der GSM-Batcorder ist speziell für den Einsatz in WEA entwickelt worden. Er erweitert den Batcorder 3.1. Dabei wird die Box- und die Turmmikrofon-Erweiterung direkt mitgeliefert. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit, über ein GSM-Modul Statusmeldungen zu versenden, um bei Fehlern schneller reagieren zu können. Außerdem ist ein USB-Port vorhanden, mit dem die Daten z.B. über einen angeschlossenen Raspberry Pi in eine Cloud exportiert werden können [48].

Der Mini-Batcorder ist eine einfachere Variante des Batcorders. Es gibt keine Erweiterungsmöglichkeiten und der Funktionsumfang wurde reduziert. So ist der automatische Aufnahmemodus festgelegt und kann nicht geändert werden. Die aufgenommenen Daten können nach der abgeschlossenen Aufnahme per USB an einen Computer übertragen werden. Dort können auch per Software die Einstellungen für den Mini-Batcorder gewählt werden (**Threshold**, **Posttrigger**, **Quality**, **Critical Frequency**). Der Mini-Batcorder besitzt aber im Vergleich zum Hauptgerät zusätzlich ein eingebautes GPS-Modul, welches den genauen Standort in die Meta-Daten der Aufnahme abspeichert.

Ein großer Nachteil bei den Batcordern ist ihre schlechte Verfügbarkeit. Laut Hersteller können aufgrund von anhaltenden Lieferschwierigkeiten seit 2020 keine neuen Geräte produziert werden und die früheste Wiederaufnahme der Produktion wird auf Ende 2022/Anfang 2023 geschätzt [49]. Bis auf den Mini-Batcorder hat keiner der anderen Batcorder ein eingebautes GPS-Modul zum Aufzeichnen des Standorts, welches für die genaue Standortbestimmung im Rahmen des „Drones4Bats“-Forschungsprojekts notwendig ist. Das Speichern der Daten in der Cloud ist nur beim GSM-Batcorder möglich, welcher jedoch für den Einsatz in einer WEA entwickelt wurde und dadurch mit vielen, für das Forschungsprojekt unnötigen Zusatzkomponenten (Box, GSM-Modul, Turmmikrofon, etc.) geliefert wird. Die Anpassung der Parameter ist beim Batcorder nur in vorgegebenen Schritten möglich und kann nicht individuell von der nutzenden Person bestimmt werden. Manuelle Aufnahmen sind nur beim Batcorder bzw. GSM-Batcorder möglich, jedoch nicht beim Mini-Batcorder. In der vorliegenden Arbeit wird der Mini-Batcorder als Vergleichssystem genutzt, da die anderen Systeme zum Projektzeitpunkt nicht verfügbar waren.

2.2.2 Prototyp auf Basis eines Dodotronic-Mikrofons

Im Rahmen der Lehrveranstaltung „IT-Systeme“ der HAW wurden die besprochenen Probleme der kommerziellen Systeme analysiert und daraufhin ein Prototyp für ein Mikrofonssystem auf Basis der Anforderungen aus Abschnitt 2.2 entwickelt.

Als Grundlage des Systems wurde ein Raspberry Pi 3 Model B+ verwendet [50]. Der Einplatinencomputer mit den in Tabelle 2.1 dargestellten Spezifikationen dient als Grundlage für eine Vielzahl von Hardwareprojekten sowohl in der Industrie als auch in Privathaushalten und ist durch seinen geringen Anschaffungspreis und seine

gute Verfügbarkeit als Plattform zum Entwickeln von Prototypen geeignet [51].

Tabelle 2.1: Spezifikationen des Raspberry Pi 3 Model B+ [52]

Parameter	Beschreibung
Prozessortaktung	1.2 Ghz
Prozessorkerne	4 Quad Core
Arbeitsspeicher	1 GB
Kommunikation	Wlan, Bluetooth, Ethernet
Speicher	MikroSD-Karte
USB	4 x 2.0
Stromversorgung	5V/2.5A über microUSB

Als Mikrofon zur Aufnahme der Signale wird das **Dodotronic Ultramic 384K Evo** genutzt [53]. Es hat einen eingebauten A/D-Wandler und nutzt eine Samplingrate von 384 kHz und eine 16 bit Amplituden-Auflösung. Der Frequenzgang und die Richtcharakteristik sind in Abbildung 2.6 dargestellt. Im Frequenzdiagramm wird deutlich, dass das Mikrofon die für Fledermausrufe notwendigen Frequenzen von 16-130 kHz gut abdeckt. Ausschließlich die Frequenzen um 80 und 120 kHz werden mit bis zu -20 dB Dämpfung schlechter aufgezeichnet [54]. Die Daten wurden dem Bedienhandbuch des Herstellers entnommen und konnten aufgrund von fehlenden Messmikrofonen für den Ultraschallbereich im Projekt nicht selber getestet werden. Das Mikrofon besitzt einen Vier-Stufen-Gain Regler, mit dem eine Verstärkung bzw. Dämpfung von -33/-10/0/10 dB eingestellt werden kann. Für das GPS wird das VK-172 USB GPS Dongle der Firma DIYMall verwendet.

Die im Folgenden aufgelisteten Funktionalitäten entsprechen dem Stand zum Abschluss der Lehrveranstaltung. Die Aufnahme wird durch ein Pythonskript auf dem Raspberry Pi gesteuert. Das Programm arbeitet nicht mit einer generellen Triggerschwelle wie das Batcorder System, sondern transformiert die eingehenden Werte in den spektralen Bereich und berechnet, ob der Maximalwert im Frequenzbereich über einem vorher eingespeicherten Triggerwert liegt. Damit findet die Auslösung der Aufnahme nicht auf Basis der Amplitude des Signals statt, sondern anhand der Last in einzelnen Frequenzbändern. Es lässt sich eine minimale Frequenz angeben, ab der getriggert werden soll (vergleichbar mit der **Critical Frequency** des Batcorders). Die Dauer der Aufnahme wird, wie beim Batcorder, durch einen **Posttrigger**-Wert bestimmt und die Aufnahme wird verlängert, falls der Schwellwert wieder überschritten wird. Eine Implementation des Pretriggers gibt es nicht. Es werden keine Hoch- oder Tiefpassfilter genutzt. Die Abtastfrequenz wurde auf 44100 Hz eingestellt, wodurch nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem nur Rufe bis ca. 22 kHz korrekt aufgezeichnet werden können. Dadurch sind die mit der derzeitigen Software erstellten Aufnahmen für Fledermausrufe unbrauchbar. Um die

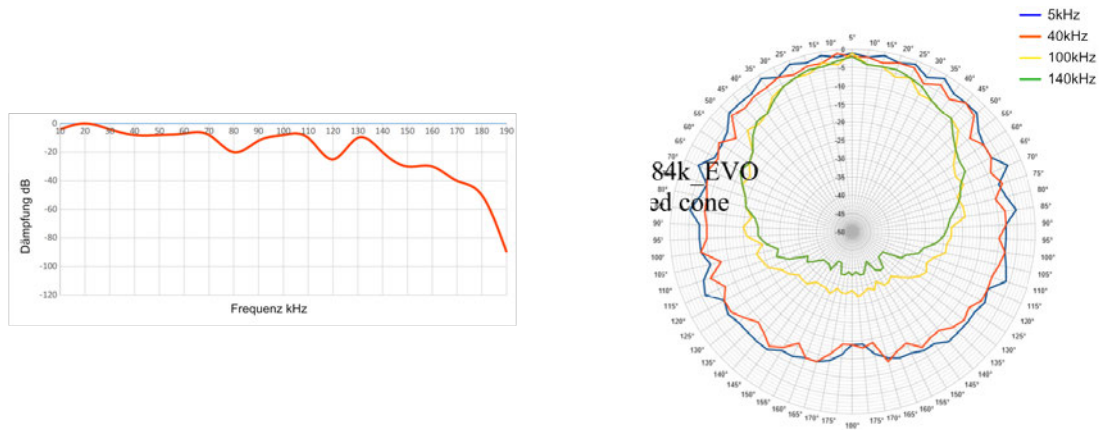


Abbildung 2.6: Auf der linken Seite ist das Frequenzdiagramm des Dodotronic Ultramic 384K EVO dargestellt. Auf der x-Achse ist die Frequenz in kHz und auf der y-Achse die Dämpfung in dB dargestellt. Auf der rechten Seite ist die Richtcharakteristik für die Frequenzen 5, 40, 100 und 140 kHz dargestellt. Die Gradzahlen am Kreis geben den Einfallswinkel des Signals an. Je näher die aufgetragene Linie am Kreistradius ist, desto geringer ist die Dämpfung. Die Zahlen sind in dB aufgetragen. Übernommen und angepasst aus [54].

Funktionalität des Systems sicherzustellen und eine bestmögliche Vergleichbarkeit mit dem Batcorder zu ermöglichen, wurden in dieser Arbeit Anpassungen an dem Code vorgenommen, die in Abschnitt 3.1 beschrieben werden. Die Grundfunktionalitäten für GPS und Cloud-Upload sind in gesonderten Skripten implementiert, werden hier aber nicht weiter behandelt, da der Fokus der Arbeit auf dem Vergleich der Aufnahmequalität liegt. Der Quellcode des hier beschriebenen Stands ist unter https://github.com/LeonFalk/ITS_A-Team/tree/Abgabe-Final/DIY-Batcorder zu finden. Die Anpassungen und der Stand nach Abschluss dieser Arbeit sind unter <https://git.haw-hamburg.de/ack137/bat-analyser> abgelegt.

2.3 Software zur Auswertung von Fledermausrufen

Zur Auswertung der aufgenommenen Daten gibt es eine Vielzahl von Programmen verschiedener Hersteller. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Kriterien aufgestellt, um zu ermitteln, welche Software zur Analyse geeignet ist.

- **Preis** Die Software soll max. 100 € kosten, um das Projektbudget nicht zu übersteigen.
- **Ausgabe der Parameter** Die Software soll die in Unterabschnitt 2.1.1 aufgelisteten Parameter berechnen und ausgeben.
- **Automatische Klassifikation** Die Software soll die aufgenommenen Rufe automatisch klassifizieren und - wenn möglich - einer bestimmten Art zuordnen.
- **Trainingsdaten aus Europa** Die Klassifikationsalgorithmen sollen mit euro-

päischen Fledermausrufen trainiert sein.

- **Visuelle Darstellung der Rufe** Die Software soll die Rufe sowohl im zeitlichen als auch spektralen Raum darstellen können.
- **Plattformunabhängigkeit** Die Software soll sowohl auf Windows als auch auf macOS nutzbar sein.

Nach Befragung von Teilnehmern des Projekts „Drones4Bats“ wurde eine Vorauswahl von drei Programmen getroffen, die hinsichtlich dieser Kriterien untersucht wurden. Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

2.3.1 bcAdmin/bcIdent/bcAnalyse

Die Firma ecoObs GmbH, die auch den Batcorder entwickelt, bietet ein Softwarepaket zur Untersuchung, Detektion und Identifikation von Fledermausrufen an. Eine Lizenz wurde bereits im Forschungsprojekt erworben, sodass die Preisanforderung erfüllt ist. Auch die Ausgabe der Parameter, die automatische Klassifikation und die visuelle Darstellung sind möglich. Jedoch ist das Programm nur unter macOS nutzbar, weswegen es in dieser Arbeit nicht eingesetzt wird.

2.3.2 Kaleidoskop

Kaleidoskop ist ein von Wildlife Acoustics Inc. entwickeltes Programm, welches in einer Lite- und einer Pro-Version erhältlich ist. Die Pro-Version kostet 399\$ und ist deswegen für dieses Projekt ungeeignet. Die Lite-Version ermöglicht es nicht, die Rufe automatisch zu klassifizieren. Deswegen ist diese Software für dieses Projekt ebenfalls nicht nutzbar.

2.3.3 BatScope

BatScope 4 ist eine von der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) entwickelte Software [55]. Sie ist kostenfrei für Windows als auch macOS verfügbar und ermöglicht die Analyse, Auswertung und Strukturierung von Fledermausrufen. Die verschiedenen auswählbaren Klassifikatoren wurden mit 19 636 Rufen von 23 verschiedenen europäischen Fledermausarten trainiert und eine Ausgabe der ermittelten Parameter sowie die visuelle Darstellung der Rufe ist möglich [55]. Damit sind die oben genannten Kriterien erfüllt und BatScope wurde als Software für dieses Projekt ausgewählt. Im Folgenden wird die Funktionalität des Programms bzw. der Ablauf der Analyse eingehender beschrieben.

Zuerst werden die aufgenommenen Rufsequenzen in das Programm importiert. Anschließend unterteilt sich die Datenverarbeitung in die folgenden Schritte (s. Abbildung 2.7):

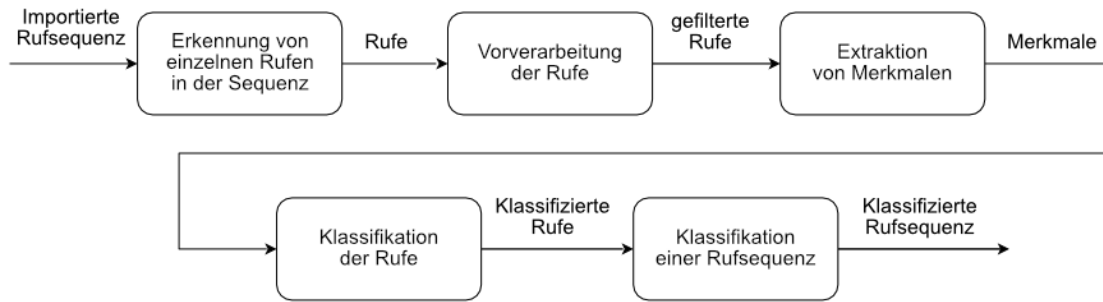


Abbildung 2.7: Flussdiagramm der Datenverarbeitung in BatScope 4

Die Unterteilung der Aufnahme in einzelne Rufe findet durch den Vergleich der Standardabweichung und dem Mittelwert der Zeitwerte des Rufes statt. Bei jedem erkannten Ruf werden 8192 Samples aus dem Signal ausgeschnitten (entspricht ca. 26 ms bei der softwareinternen Abtastrate von 312,5 kHz). Falls Rufe länger sind, wird nur ein Teil des Rufes ausgeschnitten. Da längere Rufe hauptsächlich durch Fledermausarten der Gattung *Rhinolophidae* ausgestoßen werden, die durch ihren langen cf-Anteil im Ruf trotzdem erkennbar sind, hat diese Kürzung des Originalrufes laut Hersteller keinen negativen Einfluss auf die Klassifikation [55, S. 943].

Für die Extraktion der Merkmale aus den Rufen müssen diese zuerst vorverarbeitet werden. Der Ablauf ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Um Rauschen aus dem Signal zu entfernen, wird der Mittelwert der Energie im Spektrogramm bestimmt und alles unterhalb des Wertes als Rauschen klassifiziert. Zusätzlich wird ein Hochpassfilter genutzt, um mögliches Rauschen in Frequenzen unterhalb der Fledermausruffrequenzen zu entfernen. Anschließend werden 61 Merkmale aus dem Ruf extrahiert (s. [55, Tabelle 2 und Abbildung 8]), von denen 40 für die Klassifikation genutzt werden. Die hohe Anzahl an Merkmalen ergibt sich aus der hohen zeitlichen Auflösung. Jeder Ruf wird in fünf Teilbereiche unterteilt, für den dann z.B. die mittlere Steigung und die mittlere Frequenz berechnet wird. Daraus ergeben sich dann fünf Werte pro Parameter für die einzelnen Zeitbereiche des Signals.



Abbildung 2.8: Flussdiagramm der Vorverarbeitung von Rufen durch BatScope 4

Es werden sechs verschiedene Klassifikatoren genutzt, um auf Basis der Merkmale eine Zuordnung des Rufes zu einer Art zu ermöglichen. Der Ablauf der Klassifikation ist in Abbildung 2.9 dargestellt. In früheren Versionen der Software wurden aus-

schließlich K-Nearest-Neighbours (KNN), Weighted-K-Nearest-Neighbours (KKNN) und die quadratische Diskriminanzanalyse (QDA) als Klassifikatoren genutzt. Diese wurden in BatScope 4 zur Vergleichbarkeit beibehalten und um Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM) und Neuronale Netze (NN) ergänzt. Für die Klassifikation kann einzeln gewählt werden, welcher Klassifikator genutzt werden soll. Dabei sind im Programm standardmäßig alle Klassifikatoren ausgewählt. Die Klassifikatoren melden für jeden Ruf die möglichen Fledermausarten zurück. Zusätzlich wird die Wahrscheinlichkeit (Confidence), mit der das Ergebnis ihrer Klassifikation zutrifft, ausgegeben. Die Confidence-Werte werden dann aufaddiert und die Art mit dem höchsten Wert wird als klassifizierte Art ausgewählt. Dies wird für alle Rufe einer Sequenz wiederholt. Im Anschluss werden die klassifizierten Rufe zusammengezählt und die Art mit den meisten Rufen als Klassifikationsergebnis der Aufnahme zurückgemeldet.

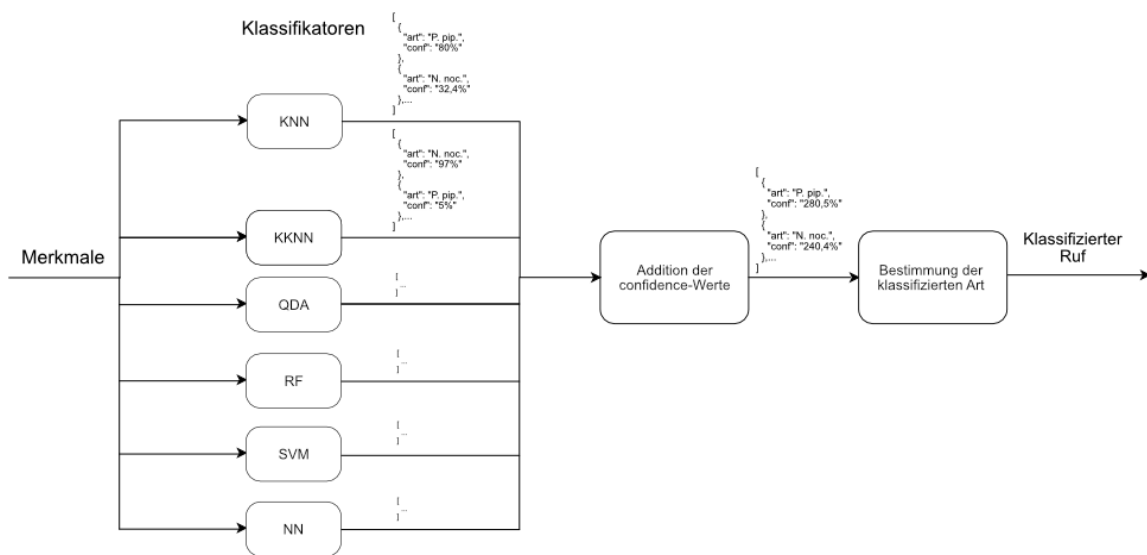


Abbildung 2.9: Flussdiagramm der Klassifikation von Rufen durch BatScope 4

3 Anpassungen

Im folgenden Kapitel werden die Schlussfolgerungen aus den Erkenntnissen des Stands der Technik für die Bachelorarbeit sowie die sich daraus ergebenden Anpassungen beschrieben. Wie bereits in Unterabschnitt 2.2.2 dargelegt, ist die Software des Dodotronic-Systems noch nicht für einen Vergleich mit anderen Systemen ausgelegt, sodass Funktionalitäten hinzugefügt bzw. erweitert werden müssen. Die Anforderungen und Anpassungen dafür werden in Abschnitt 3.1 beschrieben. Des Weiteren ergibt sich nach Betrachtung der dargelegten theoretischen Grundlagen die Notwendigkeit, die in der Einleitung beschriebene Forschungsfrage zu verfeinern. Dies wird in Abschnitt 3.2 ausgeführt.

3.1 Anpassungen an der Software des Dodotronic-Systems

Um eine Vergleichbarkeit zwischen dem Dodotronic-System und dem Batcorder zu ermöglichen sind Änderungen an der Software erforderlich. Diese notwendigen Anpassungen ergeben sich aus den Erkenntnissen aus dem vorangegangenen Kapitel. Zum einen müssen die in Unterabschnitt 2.2.2 beschriebenen fehlenden oder fehlerhaften Funktionalitäten hinzugefügt oder angepasst und zum anderen die in Abschnitt 2.2 aufgelisteten Anforderungen erfüllt werden. Eine Zusammenfassung der Anforderungen ist in Unterabschnitt 3.1.1 festgehalten. Die sich daraus ergebenden Anpassungen sind in Unterabschnitt 3.1.2 aufgeführt.

3.1.1 Anforderungen

Die sich aus der Betrachtung des Stands der Technik ergebenden Anforderungen an das System sind folgende:

- **Abtastrate** Die Abtastrate des aufgenommen Signals soll min. 400 kHz betragen [19, S. 27].
- **Pretrigger** Es soll ein zum Batcorder vergleichbarer Pretrigger-Audiospeicher erstellt werden, der einen festgelegten Zeitraum umfasst und beim Auslösen der Triggerschwelle vor die Aufnahme gespeichert wird. Für eine visuelle Darstellung des Pretriggers wird auf Abbildung 2.5 verwiesen.
- **Triggerschwelle** Das Auslösen einer Aufnahme soll, wie beim Batcorder, auf Basis der Signalstärke/des Schalldruckpegels erfolgen.

- **Filterung** Das eingehende Signal soll außerhalb der Frequenzbereiche von Fledermausrufen gefiltert werden. Als Grenzfrequenzen können hier standardmäßig die vom Batcorder genutzten Frequenzen von 16 kHz für den Hoch- und 150 kHz für den Tiefpass gewählt werden.
- **Individuelle Wahl der Einstellungen** Die Triggerschwelle, die Pre- und Posttriggerdauer sowie die Filterfrequenzen und -ordnungen sollen individuell gewählt werden können.

3.1.2 Anpassungen

Abtastrate Hinsichtlich der Abtastrate ist zu beachten, dass die Vorgabe von 400 kHz durch Markmann und Pfeiffer (2020, S. 27) [19] mit dem Dodotronic-System nicht erfüllbar ist, da das Mikrofon nur eine Abtastrate von 384 kHz unterstützt. Die Quelle hält in dem Absatz, in dem die Anforderung von 400 kHz aufgestellt wird, jedoch ebenfalls fest, dass das System nur „für hohe Frequenzen bis etwa 150 kHz ausreichend empfindlich sein [muss]“ [19, S. 27]. Dies wird durch eine Abtastrate von 384 kHz ermöglicht. Deswegen wird die Abtastrate in der Software auf 384 kHz gesetzt, um die korrekten Daten vom Mikrofon aufnehmen zu lassen.

Pretrigger Der Pretriggerpeicher wird durch ein Array gelöst, in dem die vom Mikrofon aufgenommenen Daten abgespeichert werden. Sobald das Array gefüllt ist, werden die ältesten Daten gelöscht. Wenn die Triggerschwelle zum Auslösen einer Aufnahme überschritten wird, wird dieses Array der Aufnahme vorangestellt. Die Größe des Pretriggerpeichers lässt sich in einem Config-File anpassen.

Triggerschwelle Die Daten vom Mikrofon werden als 16-bit Integer Werte eingelesen. Das ergibt einen Wertebereich von ± 32767 . Ein maximaler Ausschlag kann als 0 dBFS interpretiert werden. Um eine Triggerschwelle auf Basis der Signalstärke einzurichten, wird das quadratische Mittel (engl. root mean square RMS) des eingehenden Signals berechnet (s. Gleichung 3.1) und anschließend dieser Wert im Verhältnis zum maximalen Ausschlag gesetzt (s. Gleichung 3.2). Daraus ergibt sich dann ein dBFS-Wert. Dieser wird im Anschluss mit dem in der Config-Datei einstellbaren Triggerschwellwert verglichen. Wird der Schwellwert überschritten, wird eine Aufnahme ausgelöst.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

mit RMS = Quadratisches Mittel (3.1)

x_i = i-ter Wert

n = Anzahl an Werten

$$dB\ FS = 20 * \log \frac{|RMS|}{32768} \quad (3.2)$$

mit RMS = Quadratisches Mittel

Bei dem RMS-Wert, der die Grundlage für die Triggerschwelle liefert, ist zu beachten, dass das eingehende Signal in Stücken (engl. Chunks) eingelesen wird. Ein Chunk besitzt 16384 Abtastwerte und ist dadurch bei einer Abtastrate von 384000 Hz ca. 42 ms lang. Die Länge eines Fledermausrufs beträgt zwischen 2 und 30 ms [19]. Der Rest des Chunks beinhaltet also ausschließlich das Grundrauschen und damit kleinere Werte als bei einem Ruf. Dadurch ist der RMS-Wert des Chunks geringer als der eigentliche RMS-Wert des Rufes. Das führt zu einer Unterschätzung des dB FS-Wertes eines Rufes und damit zu einer tieferen Triggerschwellwert-Einstellung des Dodotronics. Um zum Batcorder identische Werte nutzen zu können, muss für Folgeprojekte die Implementierung der dB FS-Berechnung des Batcorders ermittelt und in der Software des Dodotronic-Systems entsprechend angepasst werden.

Filterung Die Filterung des Signals soll Frequenzen unter 16 kHz und über 150 kHz herausfiltern, um ungewollte Störgeräusche und damit einen fälschlicherweise erhöhten RMS-Wert zu verhindern. Dadurch soll es zu weniger irrtümlichen Auslösern der Aufnahme kommen. Das vom Mikrophon eingehende Signal wird - wie oben beschrieben - durch die Software in Chunks von 16384 Abtastwerten eingelesen. Um das eingehende Signal zu filtern, ist es nicht ausreichend, die Chunks einzeln zu filtern und anschließend wieder zusammenzufügen. Das führt bei der Nutzung der Fouriertransformation zur Entstehung von ungewollten Artefakten, die im Originalsignal nicht zu finden sind. Dieses Phänomen wird Leckeffekt genannt [56]. Ursache dafür ist, dass das beobachtete Signal nur endlich lang ist. Ein endlich langes Signal ist vergleichbar mit einem unendlich langen Signal, welches im Zeitbereich mit einer Rechteckfunktion multipliziert wurde, sodass alle Werte vor und nach dem Beobachtungszeitraum null sind. Diese Multiplikation des Signals im Zeitbereich führt im Frequenzbereich zu einer Faltung des Rechteckfensters (s. Abbildung 3.1, links) mit dem Originalsignal. Dadurch entstehen ungewollte Signalanteile im resultierenden gefilterten Ergebnis [57, S. 141]. Um den Leckeffekt zu verringern, gibt es verschiedene Fensterfunktionen, wie z.B. das von-Hann-Fenster (auch Hann-Fenster), die anstelle des Rechteckfensters genutzt werden. Das Hann-Fenster ähnelt, wie in Abbildung 3.1 (rechts) dargestellt, einer Glockenkurve, wodurch Signalanteile zu Beginn und zum Ende des Zeitfensters mit kleineren Zahlen multipliziert werden. Die spektralen Eigenschaften des Hann-Fensters führen zu einer Verringerung des Leckeffekts [57, S. 142]. Im Anschluss an die Fensterung kann das Signal gefiltert werden. Durch die Nutzung des Hann-Fensters wird jedoch ebenfalls die Gesamtamplitude des Signals verringert und Teile des Signals werden unterschiedlich stark gedämpft. Um dem entgegenzuwirken und das Signal nach der Filterung wieder originalgetreu herzustellen, muss

3 Anpassungen

das Fenster immer um die halbe Fensterlänge verschoben werden (50% Überlappung (engl. Overlap) [58, S. 18]) und das anschließend gefensterte und gefilterte Signal mit dem vorherigen Teil aufaddiert werden. In Abbildung 3.2 ist das Fenster der einzelnen Chunks dargestellt. Die einzelnen Teilsignale (Graphen 2-5) werden anschließend gefiltert und dann wieder aufaddiert. Es wird deutlich, dass ein Chunk erst komplett wieder zusammengesetzt werden kann, wenn ein neuer Chunk eingelesen wurde, da der zweite Teil des Chunks erst komplett wieder hergestellt werden kann, wenn er zusammen mit dem ersten Teil des neuen Chunks gefiltert wurde. Dadurch entsteht eine Zeitverzögerung, die der Größe eines Chunks entspricht. Bei einer Chunkgröße von 16384 Abtastwerten und einer Abtastrate von 384000 Hz beträgt diese ca. 42 ms.

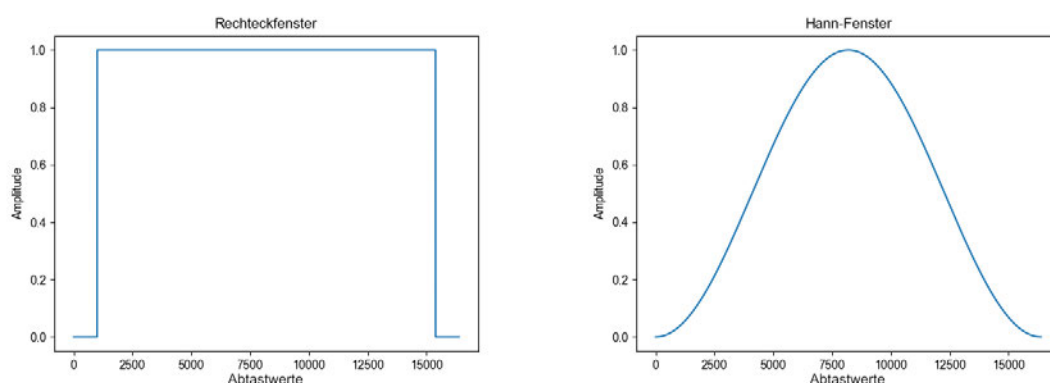


Abbildung 3.1: Links: Darstellung eines Rechteckfensters. Rechts: Darstellung eines Hann-Fensters. Auf der y-Achse ist die Amplitude dargestellt und auf der x-Achse die Abtastwerte des Fensters. Die Anzahl der Abtastwerte ist gleich der Fenstergröße (hier 16384).

Individuelle Wahl der Einstellungen Damit das System individuell genutzt werden kann, sollen bestimmte Einstellungen per Konfigurationsdateien angepasst werden können. Dafür wurden zwei Dateien erstellt. Die eine Konfigurationsdatei `config.py` enthält generelle Einstellungen, wie z.B. die Chunk-Größe, die Abtastfrequenz, die Länge von Post- und Pretrigger, die Triggerschwelle sowie die Parameter für die Hoch- und Tiefpassfilter und den Pfad, in dem die aufgenommenen Daten gespeichert werden sollen. Diese Datei wird in die Versionskontrolle mit aufgenommen. Die andere Datei (`localconf.py`) umfasst Einstellungen, die sich je nach Zielrechner unterscheiden oder je nach Anwendungsfall angepasst und deswegen nicht in der Versionskontrolle festgehalten werden sollen. Dort ist der Name des genutzten Audiogeräts eingetragen, eine Option zur Nutzung von voraufgezeichneten Rufen anstelle des Mikrofons (Funktionalität wurde eingeführt, um Code testen zu können) sowie eine Möglichkeit, die Ausführlichkeit der Konsolenausgaben des Programms anzupassen.

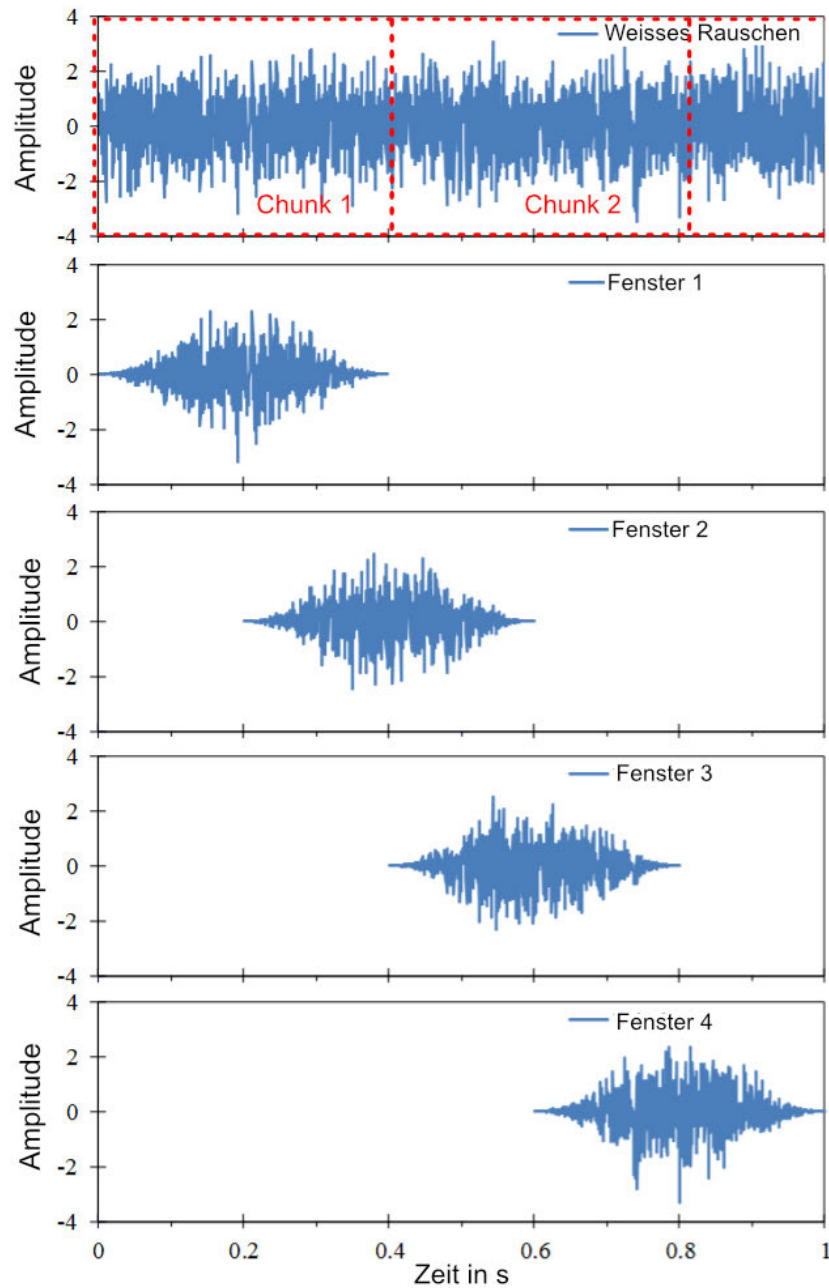


Abbildung 3.2: Fensterung eines Zeitsignals durch ein Hann-Fenster mit 50% Überlappung. Der Graph ganz oben stellt ein beispielhaftes Eingangssignal dar. In rot gestrichelt sind die einzelnen Chunks dargestellt, die die Software vom Mikrofon einliest. Im zweiten Graph wird das Ergebnis des Fensterns des Chunks mit dem Hann-Fenster dargestellt. In den weiteren Graphen wurde das Hann-Fenster um jeweils 50% der Fenster-/Chunkgröße verschoben. Übernommen und angepasst aus [59].

3.2 Anpassung der Forschungsfrage

Die Erkenntnisse aus dem Stand der Technik führen zu einer Präzisierung der ursprünglichen Forschungsfrage: Inwiefern sind die Aufnahmen von Fledermausrufen des Dodotronic-Prototypen hinsichtlich der Detektion und Identifikation von Arten mit denen des Batcorders vergleichbar? Dazu werden die Bereiche Detektion und Identifikation getrennt betrachtet.

3.2.1 Präzisierung des Teilbereichs Detektion

Die Detektion beschreibt das Erkennen eines Lauts durch das Mikrofonsystem und das anschließende Auslösen einer Aufnahme. Die Anzahl an Aufnahmen durch ein System ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Neben den in Unterabschnitt 2.1.1 beschriebenen Unterschieden in den Fledermausrufen ist vor allem die Erfassungsbereichweite des Mikrofonsystems ausschlaggebend [39]. Falls die Erfassungsbereichweite von der des Batcorders abweicht, hat dies einen Einfluss auf die Anzahl an aufgenommenen Rufen und damit möglicherweise auf die Evidenz der geschätzten Fledermausvorkommen. Deswegen soll die Erfassungsbereichweite in der Arbeit eingehender betrachtet werden, woraus sich folgende Frage ergibt:

1. Wie hoch ist die Erfassungsbereichweite des Dodotronic-Prototypen im Vergleich zum Batcorder?

3.2.2 Präzisierung des Teilbereichs Identifikation

Die Identifikation beschreibt die Zuordnung der Rufsequenzen zu Gattungen oder spezifischer Arten von Fledermäusen. Diese Klassifizierung findet mithilfe der in Unterabschnitt 2.1.1 beschriebenen spektralen und zeitlichen Rufparameter statt. Die Möglichkeit der präzisen Bestimmung dieser Parameter aus dem aufgenommenen Signal ist also wichtig für die korrekte Artenzuordnung. Deswegen muss das Signal so originalgetreu wie möglich aufgezeichnet werden. Um zu überprüfen, ob dies stattfindet, wird folgende Fragestellung überprüft:

2. Wie groß sind die quantitativen Unterschiede in den für die Klassifikation genutzten Parametern der aufgenommenen Signale des Dodotronic-Prototypen im Vergleich zu Aufnahmen mit dem Batcorder?

Die quantitativen Unterschiede geben einen ersten Eindruck über die Aufnahmequalität des Prototypen. Eine direkte Möglichkeit zum Vergleich der Identifikation von Rufen ergibt sich zusätzlich aus der Klassifikationsrate der Rufe. Als Klassifikationsrate wird die erfolgreiche Bestimmung der Rufe bzw. Rufsequenzen zu der korrekten Art oder Gattung bezeichnet. Dabei gibt es die Möglichkeit der automatischen und der manuellen Rufklassifikation [39] [40]. Die automatische Bestimmung ermöglicht überhaupt erst das Auswerten von großen Datensätzen, wie sie bei der Beobachtung

von Fledermäusen an WEA über einen längeren Zeitraum auftreten, da die manuelle Auswertung dieser Datenmengen zu lange dauern würde [5] [16, S. 9]. Dabei muss jedoch sichergestellt werden, dass die korrekte Klassifikation der Arten ähnlich gut ist wie bei der manuellen Bestimmung durch Expert*Innen. Während einige Studien darauf hindeuten, dass die automatische Rufanalyse vergleichbare oder sogar bessere Ergebnisse liefert [60], warnen andere vor möglichen Problemen und Schwierigkeiten in der automatischen Bestimmung [23], [61], [5], [42]. Bei der manuellen Rufanalyse ist das Ergebnis der Klassifikation stark von der Expertise und Erfahrung der bearbeitenden Person abhängig [42, S. 114]. Um die Vor- und Nachteile beider Varianten auszugleichen, ist es für den Vergleich der Mikrofon-Systeme sinnvoll, sowohl eine manuelle als auch eine automatische Klassifizierung durchzuführen. Daraus ergeben sich folgende Fragen:

3. Wie hoch ist die Klassifikationsrate von Fledermausrufen bei Aufnahmen mit dem Dodotronic-Prototypen im Vergleich zu Aufnahmen mit dem Batcorder?
 - a) Wie hoch ist die korrekte Klassifikationsrate bei der automatischen Auswertung durch entsprechende Computerprogramme (hier BatScope) bei Aufnahmen mit dem Dodotronic-Prototypen im Vergleich zu Aufnahmen mit dem Batcorder?
 - b) Wie hoch ist die korrekte Klassifikationsrate bei der manuellen Auswertung durch Expert*Innen bei Aufnahmen mit dem Dodotronic-Prototypen im Vergleich zu Aufnahmen mit dem Batcorder?

4 Methodik

Im Folgenden werden die Methoden aufgezeigt, die zur Beantwortung der in Abschnitt 3.2 definierten Fragen herangezogen wurden. Dabei wird die in dem vorherigen Kapitel eingeführte Unterteilung der Forschungsfrage in Detektion (Abschnitt 4.1) und Identifikation (Abschnitt 4.2) hier fortgeführt, da für die einzelnen Unterfragen verschiedene Methoden genutzt wurden.

In Vortests wurde festgestellt, dass der Raspberry Pi 3B+, der als Grundlage für den Dodotronic-Prototypen gewählt wurde, nicht leistungsfähig genug ist, um die Berechnungen für die Aufnahme und Verarbeitung der Signale schnell genug durchzuführen. Deswegen wurde für alle im folgenden beschriebenen Versuche der Raspberry Pi durch einen Laptop mit den in Tabelle 4.1 beschriebenen Spezifikationen ersetzt.

Tabelle 4.1: Die für die Versuche wichtigen Spezifikationen des genutzten Laptops.

Bezeichnung	Wert
Betriebssystem	Windows 11
Prozessor	i7-8665U
Arbeitsspeicher	16 GB

4.1 Detektion von Fledermausrufen

Um die Detektion von Fledermausrufen zwischen den Systemen zu vergleichen, musste die Erfassungsreichweite der Mikrofone bestimmt werden. Diese gibt Aufschluss darüber, wie groß der erfassbare Bereich ist, in dem Fledermausrufe aufgezeichnet werden können. Je größer der abgedeckte Bereich der Systeme ist, desto aussagekräftiger bzw. belastbarer sind die Aussagen über Fledermauspopulationen in dem untersuchten Gebiet.

Als Grundlage für diesen Versuch diente ein Versuch von Adams, Jantzen, Hamilton u. a. (2012) [39], die einen Vergleich zwischen vier verschiedenen Aufnahme-Systemen (u.a. den Batcorder 2.0) beschreiben, bei dem synthetische Signale mit vier verschiedenen Frequenzen (25, 55, 85 und 115 kHz) in 5 m Abständen zwischen 5 und 40 m aus drei verschiedenen Richtungen (0°, 45°, 90°) abgespielt wurden [39]. Dabei zeigen sie auf, dass der Batcorder 2.0 nur bis zu einer Entfernung von ca. 20 m synthetische Signale detektiert und eine Aufzeichnung startet. Die Entfernung ist geringer als bei

Simon, Hochradel, Mages u. a. (2016, Tabelle 5) [40] berechnet. Eine Ursache dafür kann die **Quality**-Eigenschaft des Batcorders sein, die von Adams, Jantzen, Hamilton u. a. (2012) [39] auf 40 gesetzt wurde und womöglich die Detektion von synthetischen Signalen gestört hat.

Diese Methode ermöglicht es, die Detektionsrate der Aufnahmegeräte für die verschiedenen Entfernungen und Winkel im Vergleich zueinander zu bestimmen und wurde deshalb auch in dieser Arbeit gewählt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Da die Detektionsreichweite des Batcorders bei dem Versuch von Adams, Jantzen, Hamilton u. a. (2012) [39] womöglich durch die Nutzung von synthetischen Signalen reduziert wurde, werden in der vorliegenden Arbeit Anpassungen getätigt. Anstatt der synthetischen Signale wurden Rufsequenzen von verschiedenen Fledermausarten verwendet, die in Vortests durch den Batcorder erkannt und aufgenommen wurden. Die Sequenzen umfassten folgende Arten: *Plecotus auritus* (Pl. aur.), *Pipistrellus pipistrellus* (P. pip.), *Myotis myotis* (M. myo.), *Pipistrellus nathusii* (P. nath.), *Myotis nattereri* (M. nat.), *Nyctalus noctula* (N. noc.) und *Myotis mystacinus* (M. myst.). Diese Rufe wurden gewählt, da sie bereits für den in diesem Projekt genutzten BatWav PCM384 Lautsprecher der Firma Peersonic vorverarbeitet wurden [62]. Sie decken verschiedene Frequenzbereiche ab und geben so einen Eindruck über Sensitivität der Mikrofone für einen Großteil des Frequenzbereichs von Fledermausrufen. Die Rufe wurden auf einen USB-Stick gespielt, der dann an den BatWav angeschlossen wurde. Anschließend wurden die Rufe durch Druck des „Play All“-Knopfes automatisch hintereinander abgespielt. In diesem Versuchsaufbau wurden fünf Entfernungen zwischen 1 m und 18 m genutzt (1, 5, 10, 14, 18 m). Insgesamt wurden pro Entfernung die sieben verschiedenen Rufsequenzen je dreimal abgespielt, also insgesamt 105 Sequenzen pro Mikrophon. Die Temperatur betrug 20° C bei einer Luftfeuchtigkeit von 50 %.

Es wurden für die Systeme folgende Einstellungen gewählt: Der Batcorder wurde mit einem **Threshold** von -36 dB FS, einer **Quality** von 20, einer **Critical Frequency** von 16 kHz und einem **Posttrigger** von 800 ms betrieben. Die Werte waren, mit Ausnahme des Posttriggers, aus Weber, Nagy, Hochradel u. a. (2018) [63] entnommen. Der Posttrigger wurde von 200 ms auf 800 ms erhöht, da Simon, Hochradel, Mages u. a. (2016, S. 73) [40] festgestellt haben, dass verschiedene Fledermausarten Rufabstände von 200 - 1000 ms haben können und deswegen ein höherer Posttrigger empfohlen wird. Für das Dodotronic-System wurde ebenfalls ein Posttrigger von 800 ms verwendet. Da in Vortests festgestellt wurde, dass das Dodotronic-Mikrophon bei einem geringeren Schalldruckpegel übersteuert als der Batcorder und die Kalibrierung der Mikrofone wie bereits beschrieben nicht einzeln durchgeführt werden konnte, wurde der Gain-Regler am Dodotronic-Mikrophon zur Verhinderung von Übersteuerungen auf -10 dB gestellt. Als **Threshold** wurde -100 dB FS verwendet.

Hypothese Das Dodotronic-Mikrophon nimmt dieselbe Anzahl an Rufsequenzen auf, wie der Batcorder.

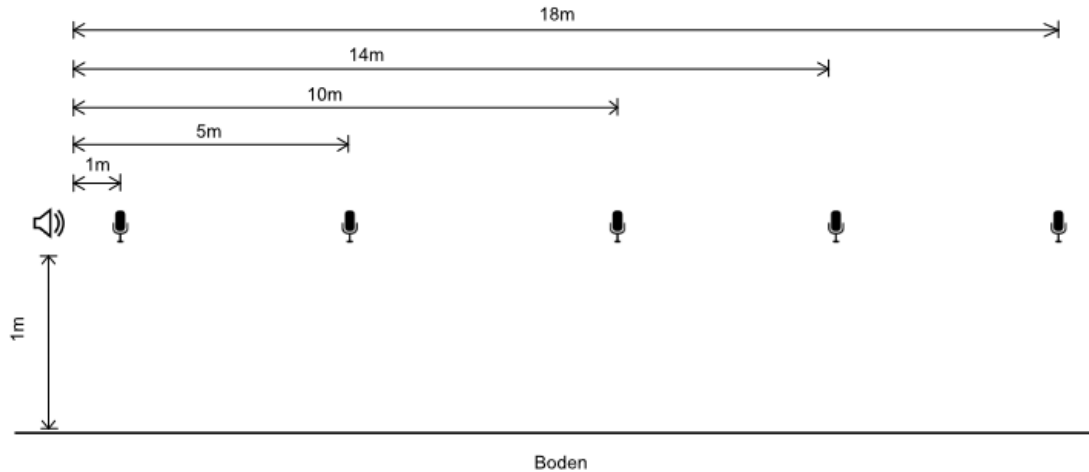


Abbildung 4.1: Der Versuchsaufbau zur Bestimmung der Erfassungsreichweite des Dodotronic-Mikrofons im Vergleich zum Batcorder. Der Lautsprecher war an einer festen Position 1 m über dem Boden angebracht. Die Mikrofone wurden nacheinander im Abstand von 1, 5, 10, 14 und 18 m vom Lautsprecher entfernt in 1 m Höhe positioniert. Der Schalleinfallswinkel auf die Mikrofonmembran entsprach dabei 0° . Bei jeder Entfernung wurden für jedes Mikrofon 21 Rufsequenzen vom Lautsprecher abgespielt.

4.2 Identifikation von Fledermausrufen

Die Forschungsfrage unterteilt die Identifikation von Fledermausrufen in zwei Teilbereiche, nämlich die originalgetreue Aufnahme und Extrahierung von Rufmerkmalen sowie die anschließende Klassifikation von Rufen. Beide Teile bauen aufeinander auf, da die Klassifikation stark von der korrekten Aufnahme der Parameter abhängt. Im Folgenden wird deswegen zuerst in Unterabschnitt 4.2.1 der Versuch zur Feststellung der Aufnahmequalität hinsichtlich der Merkmalsextraktion beschrieben und im Anschluss in Unterabschnitt 4.2.2 das Experiment zum Vergleich der Aufnahmen der Aufnahmesysteme hinsichtlich der Klassifikation von Arten.

4.2.1 Aufnahmequalität in Bezug auf Merkmalsextraktion

In diesem Test ging es darum zu ermitteln, ob es Ungenauigkeiten in der Aufnahme von Rufmerkmalen gab, die es bei der späteren Klassifikation zu berücksichtigen galt. Dafür wurden die Mikrofone in einem Abstand von 1 m vom Lautsprecher mit einem Schalleinfallswinkel von 0° aufgestellt (s. Versuchsaufbau in Abbildung 4.2). Der Lautsprecher spielte zwei verschiedene Fledermausrufsequenzen ab. Jede Sequenz wurde fünfmal abgespielt. Der Test wurde für jedes Mikrofon einzeln nacheinander durchgeführt, sodass die Mikrofone ausgewechselt und an die gleiche Position gestellt werden konnten, um Unterschiede in den Aufnahmen durch unterschiedliche Schalleinfallswinkel zu vermeiden. Die Fledermausrufe stammten von einer Pipistrel-

4 Methodik

lus pipistrellus (P. pip.) und einer Nyctalus noctula (N. noc.). Die beiden Arten wurden ausgewählt, um verschiedene Frequenzbereiche (45-75 kHz und 18-20 kHz) und verschiedene Ruftypen (fm-qcf und qcf) zu untersuchen. Um die Signalqualität der Aufnahmen zu vergleichen, wurde ein Ruf aus der Originalsequenz gewählt, welcher in allen Aufnahmen zweifelsfrei wiedergefunden werden konnte. Anschließend wurden folgende Rufparameter aus dem Ruf extrahiert und miteinander verglichen: Dauer (D), Startfrequenz (F_{start}), maximale Frequenz (F_{max}), Frequenz der maximalen Energie (F_{maxE}), minimale Frequenz (F_{min}) und Endfrequenz (F_{end}).

Für den Vergleich wurde der Mittelwert der aus den Aufnahmen extrahierten Parameter, deren Abstände zu den Originalwerten sowie die Standardabweichung der Stichprobe berechnet. Die Formeln für den Mittelwert sowie die Standardabweichung finden sich in Gleichung 4.3 und Gleichung 4.4.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\text{mit } \bar{x} = \text{Mittelwert} \tag{4.3}$$

x_i = i-ter Wert

n = Anzahl an Werten

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$\text{mit } s_x = \text{Standardabweichung der Stichprobe} \tag{4.4}$$

x_i = i-ter Wert

n = Anzahl an Werten

$\bar{x}$ = Mittelwert

Der Ruf, der für die Parameterextraktion gewählt wurde, musste in jeder der Rufsequenzen eindeutig identifizierbar sein. Die Identifikation fand durch Vergleich der Abstände des Rufes zu benachbarten Rufen (Werte aus BatScope entnommen) sowie einer visuellen Betrachtung des Spektrogramms der Rufsequenzen statt.

Aus den Ergebnissen der Merkmalsextraktion ergaben sich zwei Teilbereiche, die analysiert werden sollten: Wie stark unterscheiden sich die aufgenommenen Werte der Parameter der Mikrofone von den Ursprungsparameterwerten und wie stark variieren die aufgenommenen Werte der Parameter eines Mikrofons bei gleichem Rufsignal? Um über den ersten Teilbereich eine Aussage treffen zu können, wurde mit Hilfe von Markmann und Pfeiffer (2020) [19] ein tolerierbarer Fehler festgelegt. Dieser gibt den Abstand an, in dem die aufgenommenen Werte von den Originalparametern maximal liegen sollen. Die Quelle gibt für die Identifikation eines Rufes spezifische Merkmale bzw. Parameter an. Für die Merkmale wird ein Bereich festgelegt, in dem sich der

Tabelle 4.2: Die Merkmalsbereiche für die Bestimmung von Fledermausarten aus Rufen sowie die sich daraus ergebenden tolerierbaren Fehler der extrahierten Merkmale aus den aufgenommenen Rufen der Testsysteme.

Fledermausart	Merkmale		10 % Fehler	
	F_c (kHz)	D (ms)	Frequenz (kHz)	Dauer (ms)
P. pip.	40-50	5-10	1	0,5
N. noc.	17-22	15-30	0,5	1,5

extrahierte Wert befinden muss, damit der Ruf einer spezifischen Art zugeordnet werden kann. Wenn der Wert außerhalb dieses Bereiches liegt, kann der Ruf nicht dieser Art zugeordnet werden. In Tabelle 4.2 sind die Merkmalsbereiche aufgeführt. Außerdem werden die Fehlerbereiche angegeben, die für die Systeme im Rahmen dieser Arbeit als tolerierbar festgelegt wurden. Diese betragen 10 % des Wertebereichs der Merkmale. Der Fehlerbereich bezieht sich hier auf den Wertebereich der Merkmale, denn je spezifischer der Wertebereich ist, desto kleiner sollte auch die Abweichung der Aufnahme sein, um später eine korrekte Klassifikation zu ermöglichen. Bsp.: Der Wertebereich für die charakteristische Frequenz liegt für Rufe der Art *Pipistrellus pipistrellus* (P. pip.) bei 10 kHz (50 kHz-40 kHz). Dadurch ergibt sich ein tolerierbarer Fehler von 1 kHz. Für Rufe der Art *Nyctalus noctula* (N. noc.) ist der Wertebereich, in dem sich die charakteristische Frequenz befindet, kleiner (5 kHz), deswegen ist auch der tolerierbare Fehler kleiner (0,5 kHz). Da es bisher noch keine Literatur gibt, in der ein Wert für die Fehlertoleranz für aufgenommene Werte festgelegt wurde, wurde hier ein Wert von 10 % vorgeschlagen.

Um eine Aussage zur zweiten Fragestellung - also die Variation der Parameter zwischen zwei Aufnahmen desselben Mikrofons - treffen zu können, wurde die Standardabweichung der Ergebnisse betrachtet. Je größer die Standardabweichung der extrahierten Parameter, desto stärker variieren die Aufnahmen der Systeme bei gleichen Rufen.

Hypothesen Es ergaben sich für die beiden Fragestellungen folgende Hypothesen:

1. Die aus den Aufnahmen extrahierten Parameter sind, unter Berücksichtigung des tolerierbaren Fehlers, identisch mit den Parametern der Originalaufnahme.
2. Die extrahierten Parameter zeigen bei wiederholten Aufnahmen des gleichen Rufes keine Unterschiede.

4.2.2 Aufnahmequalität in Bezug auf Artenbestimmung

Um festzustellen, inwieweit das Dodotronic-System die korrekte Bestimmung der Art aus den Rufsequenzen ermöglicht, wurde folgender Versuch durchgeführt: Der Aufbau

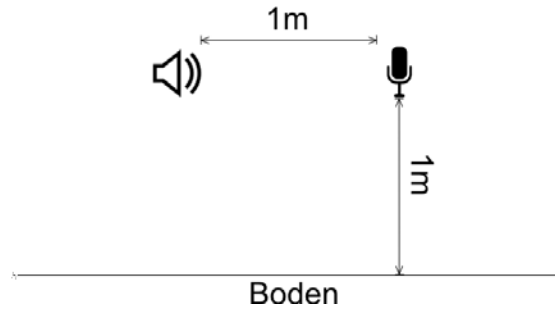


Abbildung 4.2: Der Versuchsaufbau zur Bestimmung der Aufnahmequalität der Systeme. Der Lautsprecher und die Mikrofone waren 1 m voneinander entfernt in 1 m Höhe so aufgestellt, dass der Schalleinfallswinkel auf der Mikrofonmembran 0° betrug. Die Mikrofone wurden nacheinander angebracht, sodass die Entfernung zum Lautsprecher und der Einfallswinkel des Schalls derselbe war.

war identisch mit dem im vorherigen Test (s. Abbildung 4.2). Es wurden die sieben aus dem Detektionsversuch in Abschnitt 4.1 bekannten Fledermausrufsequenzen abgespielt und von den Mikrofonen aufgenommen. Falls ein Mikrofon mehrere Aufnahmen pro Rufsequenz startete, wurden diese im Anschluss händisch durch Vergleich der Aufnahmezeitpunkte und des Spektrums den Originalsequenzen zugeordnet.

Anschließend wurden die Rufsequenzen sowohl automatisch als auch manuell einer Art zugeordnet. Als Referenz wurden zusätzlich die Originalsequenzen klassifiziert. Die automatische Klassifikation fand mit dem Programm BatScope 4 statt. Dafür wurden die aufgenommenen Rufsequenzen importiert, in einzelne Rufe unterteilt, anschließend die Merkmale extrahiert und dann klassifiziert. Für alle Schritte wurden die Werkseinstellungen genutzt. Bei der manuellen Analyse wurden die aufgenommenen Dateien so umbenannt, dass sie für die bearbeitende Person keinen Aufschluss über den Ursprung der Aufnahme zuließen, aber nach der Bestimmung wieder einwandfrei zuordenbar waren. Die Rufsequenzen wurden von einer Expertin klassifiziert.

Die Ergebnisse der Klassifikationen wurden im Anschluss verglichen. Dabei wurde zwischen der korrekten Bestimmung der Gattung und der Art unterschieden. Eine Art wurde nur als korrekt bestimmt gewertet, wenn sie eindeutig der korrekten Art zugeordnet wurde. Bei der manuellen Klassifikation konnte für einige Rufsequenzen nur eine Auswahl von verschiedenen Arten als Ergebnis gegeben werden. In diesem Fall wurde die Bestimmung der Art als falsch gewertet.

Hypothese Die Klassifikationsraten der Aufnahmen des Dodotronic-Systems stimmen mit denen des Batcorders und der Originalrufsequenzen überein.

5 Ergebnisse

Im Kapitel werden die Ergebnisse der in der Methodik beschriebenen Versuche dargestellt. Die Daten der Detektion werden in Abschnitt 5.1 und die der Identifikation in Abschnitt 5.2 vorgestellt.

5.1 Ergebnisse des Versuchs zur Detektion von Fledermausrufen

Mithilfe des Versuchs zur Detektion sollte festgestellt werden, inwiefern sich die Erkennungsreichweiten der Systeme unterscheiden. Es wurden für jedes System 21 Rufsequenzen bei jeweils fünf Entfernungen abgespielt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Tabelle 5.1: Anzahl an ausgelösten Aufnahmen der beiden Geräte bei entsprechendem Abstand zum Lautsprecher

Entfernung	Geräte	
	Batcorder	Dodotronic
1 m	23	22
5 m	26	22
10 m	14	5
14 m	6	3
18 m	9	3

Der Batcorder hatte bei 1 m Abstand 23 Aufnahmen ausgelöst, während es beim Dodotronic-System 22 Aufnahmen waren. Es gab mehr Aufnahmen als abgespielte Rufsequenzen, da eine abgespielte Rufsequenz für einen längeren Zeitraum (länger als der eingestellte Posttriggerwert von 800 ms) unter die Triggerschwelle gefallen sein konnte. Wenn die Triggerschwelle dann wieder überschritten wurde, wurde eine weitere Aufnahme für diese Rufsequenz gestartet. Für die weiteren Entfernungen machte der Batcorder 26 (5 m), 14 (10 m), 6 (14 m) und 9 (18 m) Aufnahmen. Beim Dodotronic-System waren es 22 (5 m), 5 (10 m), 3 (14 m) und 3 (18 m).

5.2 Ergebnisse der Versuche zur Identifikation von Fledermausrufen

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Versuche zum Teilbereich der Identifikation von Fledermausrufen dargestellt. In Unterabschnitt 5.2.1 wird der in der Methodik beschriebene Versuch zur Bestimmung der Genauigkeit der Aufnahme hinsichtlich der Merkmalsextraktion ausgewertet. In Unterabschnitt 5.2.2 werden die Ergebnisse des Tests der Klassifikationsraten beschrieben.

5.2.1 Versuch zur Merkmalsextraktion

Die hier dargestellten Ergebnisse stammen aus dem Versuch zum Vergleich der korrekten Aufzeichnung der Rufparameter. Ziel war es festzustellen, wie präzise die Systeme die Merkmale eines Rufes aufzeichnen. Die Daten wurden getrennt für die Rufe der Arten *Pipistrellus pipistrellus* (s. Tabelle 5.2) und *Nyctalus noctula* (s. Tabelle 5.3) aufgelistet.

Die Tabellen stellen die Ergebnisse wie folgt dar: In jeder Reihe wird ein Merkmal betrachtet. Das erste Merkmal z.B. ist die Dauer des Rufes. Die erste Spalte zeigt den extrahierten Parameter aus dem Originalsignal (x_{orig}). Anschließend werden die beiden Systeme aufgelistet. Dabei sind für beide der Mittelwert der extrahierten Parameter ($\bar{x}$), die Standardabweichung der Stichprobe (s_x) und der Abstand des Mittelwerts zum Originalparameter ($|\bar{x} - x_{orig}|$) dargestellt. Bsp.: Bei der Fledermaus der Art *Nyctalus noctula* (s. Tabelle 5.3) betrug die Dauer des Originalrufes 11,69 ms. Die Dauer des extrahierten Rufes war beim Batcorder im Mittel $11,486 \text{ ms} \pm 0,076 \text{ ms}$. Der Abstand des Mittelwerts zum Originalwert betrug 0,204 ms. Beim Dodotronic-System lag der Mittelwert der Dauer des extrahierten Rufes bei $11,918 \text{ ms} \pm 0,093 \text{ ms}$. Der Abstand des Mittelwerts zum Originalwert war 0,228 ms.

Um die in Unterabschnitt 4.2.1 aufgestellten Hypothesen zu überprüfen, wird die Abweichung des Mittelwerts vom Originalwert sowie die Standardabweichung der Stichprobe betrachtet. Bei den Rufen der Art *Pipistrellus pipistrellus* betrug der tolerierbare Fehler für die Dauer 0,5 ms. Dieser wurde von allen Aufnahmen beider Systeme eingehalten. Für die Frequenz betrug die Fehlergrenze 1 kHz. Dieser wurde beim Batcorder bei der maximalen Energie überschritten. Dort war der Mittelwert der aufgenommenen Parameter 1,23 kHz vom Originalwert entfernt. Beim Dodotronic wurde die Fehlergrenze für die Startfrequenz (1,34 kHz), der maximalen Frequenz (1,34 kHz) und der Frequenz der maximalen Energie (1,23 kHz) überschritten.

Die Standardabweichung betrug beim Batcorder bei der Dauer 0,072 ms und bei der Startfrequenz und der maximalen Frequenz 0,134 kHz. Die anderen Parameter wurden bei allen Aufnahmen identisch extrahiert, die Standardabweichung betrug 0 kHz. Beim Dodotronic-System betrug die Standardabweichung bei der Dauer 0,076 ms, bei der Startfrequenz und der maximalen Frequenz 0,164 kHz und bei der minimalen Frequenz und der Endfrequenz 0,273 kHz. Bei der Frequenz der maximalen Energie

Tabelle 5.2: Die extrahierten Parameter aus einem Ruf einer Fledermaus der Art *Pipistrellus pipistrellus*. Die Extraktion wurde mit BatScope 4 durchgeführt. Dargestellt werden die Parameter aus dem Originalsignal (x_{orig}) sowie der Mittelwert $\bar{x}$, die Standardabweichung s_x sowie Absolutwert des Abstands des Mittelwertes vom Originalwert ($|\bar{x} - x_{orig}|$) für den Batcorder und das Dodotronic-System. Die Parameter sind die Dauer in ms sowie die Startfrequenz des Rufes F_{start} , die maximale Frequenz F_{max} , die Frequenz mit der maximalen Energie F_{maxE} , die minimale Frequenz F_{min} und die Endfrequenz F_{end} in kHz.

	Original	Baticorder			Dodotronic		
	x_{orig}	$\bar{x}$	s_x	$ \bar{x} - x_{orig} $	$\bar{x}$	s_x	$ \bar{x} - x_{orig} $
Dauer	3,01	3,138	0,072	0,128	2,806	0,076	0,204
F_{start}	52,64	51,79	0,134	0,85	51,3	0,164	1,34
F_{max}	52,64	51,79	0,134	0,85	51,3	0,164	1,34
F_{maxE}	48,07	46,84	0	1,23	46,84	0	1,23
F_{min}	46,84	46,84	0	0	46,352	0,273	0,488
F_{end}	47,15	46,84	0	0,31	46,352	0,273	0,798

waren alle extrahierten Werte identisch und die Standardabweichung somit 0 kHz. Für eine ausführliche Betrachtung der einzelnen Aufnahmen der Fledermaus der Art *Pipistrellus pipistrellus* wird auf Tabelle A.1 für den Batcorder und Tabelle A.2 für den Dodotronic-Prototypen im Anhang verwiesen.

Bei den Rufen der Art *Nyctalus noctula* betrug der tolerierbare Fehler für die Dauer 1,5 ms. Dieser wurde von allen Aufnahmen beider Systeme eingehalten. Für die Frequenz betrug die Fehlergrenze 0,5 kHz. Diese wurde nur vom Batcorder bei der Endfrequenz mit einer Abweichung von 0,61 kHz vom Originalparameter überschritten. Alle anderen aufgenommenen Parameter beider Systeme lagen innerhalb des tolerierbaren Fehlers.

Die Standardabweichung beim Batcorder betrug bei der Dauer des Rufes 0,076 ms. Aus allen anderen Parameter wurden dieselben Werte aus den Aufnahmen extrahiert, sodass die Standardabweichung 0 kHz betrug. Beim Dodotronic-System wurden die Startfrequenz und die Frequenz der maximalen Energie mit einer Standardabweichung von 0 extrahiert. Alle anderen Parameter hatten eine Standardabweichung ungleich 0 (Dauer: 0,093 ms, F_{max} : 0,139 kHz, F_{min} : 0,334 kHz, F_{maxE} : 0,255 kHz).

Für eine ausführliche Betrachtung der einzelnen Aufnahmen der Fledermaus der Art *Nyctalus noctula* wird auf Tabelle A.3 für den Batcorder und Tabelle A.4 für den Dodotronic-Prototypen im Anhang verwiesen.

Tabelle 5.3: Die extrahierten Parameter aus einem Ruf einer Fledermaus der Art *Nyctalus noctula*. Für eine ausführliche Beschreibung wird auf Tabelle 5.2 verwiesen.

	Original	Batcorder			Dodotronic		
	x_{orig}	$\bar{x}$	s_x	$ \bar{x} - x_{orig} $	$\bar{x}$	s_x	$ \bar{x} - x_{orig} $
Dauer	11,69	11,486	0,076	0,204	11,918	0,093	0,228
F_{start}	20,9	20,9	0	0	20,9	0	0
F_{max}	21,21	21,21	0	0	21,148	0,139	0,062
F_{maxE}	19,68	19,68	0	0	19,68	0	0
F_{min}	19,68	19,38	0	0,3	19,436	0,334	0,244
F_{end}	19,99	19,38	0	0,61	20,048	0,255	0,058

5.2.2 Versuch zur Artenbestimmung

Die Zusammenfassung der Versuchsergebnisse zur korrekten Klassifikation der Rufsequenzen sind in Tabelle 5.4 dargestellt. Die ausführlichen Klassifikationsergebnisse für jede Rufsequenz sind im Anhang in Tabelle A.5 und Tabelle A.6 zu finden.

Tabelle 5.4: Die korrekten Klassifikationen in Relation zur Gesamtheit der Rufsequenzen. Aufgelistet sind die Originalrufsequenzen, die Batcorder-Aufzeichnungen und die Aufnahmen des Dodotronic-Systems. Die erste Reihe zeigt die korrekten Klassifikationen hinsichtlich der Gattung und der Art bei der automatischen Klassifikation durch BatScope an, die zweite Reihe die manuelle Klassifikation durch eine Expertin. Bei der manuellen Auswertung wurden nur Artklassifikationen als korrekt gewertet, bei denen eine eindeutige Klassifikation vorlag. Die ausführlichen Ergebnisse sind in Tabelle A.5 und Tabelle A.6 aufgelistet.

	Original		Batcorder		Dodotronic	
	Gattung	Art	Gattung	Art	Gattung	Art
Automatisch	6 / 8	3 / 8	4 / 11	3 / 11	7 / 11	5 / 11
Manuell	5 / 7	3 / 7	8 / 11	2 / 11	7 / 11	3 / 11

Bei der automatischen Rufbestimmung wurden acht anstatt sieben Originalsequenzen ausgewertet. Das lag daran, dass BatScope 4 Rufsequenzen über zehn Sekunden Länge in mehrere Teile teilt und einzeln klassifiziert. Dies war beim Ruf der Art *Plecotus auritus* der Fall.

5 Ergebnisse

Die automatische Klassifikation gab bei der Bestimmung der Gattung der Originalsequenzen in sechs von acht Fällen das richtige Ergebnis zurück. Bei den Aufnahmen des Batcorder wurden vier von elf Bestimmungen korrekt ausgeführt und beim Dodotronic-System sieben von elf. Bei den Arten waren es drei von acht für die Originalsequenzen, drei von elf beim Batcorder und fünf von elf beim Dodotronic System. Bei der manuellen Bestimmung wurden fünf von sieben Originalsequenzen der korrekten Gattung zugeordnet. Beim Batcorder waren es acht von elf korrekte Bestimmungen und beim Dodotronic-System sieben von elf. Bei den Arten wurden drei von sieben Originalsequenzen korrekt klassifiziert. Beim Batcorder waren es zwei von elf und beim Dodotronic-System drei von elf.

6 Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Versuchsergebnisse in Bezug zu den gestellten Forschungsfragen gesetzt. Dafür werden die aufgestellten Hypothesen überprüft sowie Vorschläge für künftige Versuche aufgezeigt, die die entwickelten Methoden verbessern und eine präzisere Aussage hinsichtlich der Forschungsfragen ermöglichen können.

6.1 Detektion

Ziel des Versuchs war es festzustellen, wie groß die Erfassungsreichweite des Dodotronic-Prototypen im Vergleich zum Batcorder war. Dabei war die Hypothese, dass die Erfassungsreichweite der Mikrofone gleich groß sein wird. Die Ergebnisse zeigten eindeutig, dass das Dodotronic-System mit den gewählten Einstellungen eine geringere Erfassungsreichweite als der Batcorder hatte. Bereits bei zehn Metern wurden nur noch zwei der sieben verschiedenen Rufsequenzen detektiert (aufgeteilt auf fünf Aufnahmen). Der Batcorder hat bei der gleichen Entfernung noch 14 Aufnahmen gestartet. Damit konnte die Hypothese für die gewählten Einstellungen eindeutig falsifiziert werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass das Dodotronic-Mikrofon aufgrund der Probleme hinsichtlich des Übersteuerns des Eingangssignals mit 10 dB Dämpfung betrieben wurde. Dies führte zu einer reduzierten Erfassungsreichweite.

Um einen präziseren Vergleich zu ermöglichen, sollten weitere Schritte durchgeführt werden. Zuerst müssen die Mikrofone kalibriert werden. Der Ablauf der Kalibrierung wird von Simon, Hochradel, Mages u. a. (2016, S. 46) [40] beschrieben. Im Anschluss daran sollten für beide Mikrofone der Frequenzgang und die Richtcharakteristik bestimmt werden. Beide Eigenschaften haben laut Simon, Hochradel, Mages u. a. (2016, S. 67) [40] einen Einfluss auf die Erfassungsreichweite und ermöglichen eine Berechnung des Erfassungsvolumens der Systeme. Um den Frequenzgang eines Mikrofons zu bestimmen, wird ein bekanntes Audiosignal abgespielt und anschließend mit dem aufgenommenen Signal des Mikrofons verglichen. Aus den Unterschieden lassen sich dann die akustischen Eigenschaften des Mikrofons herauslesen [64]. Für das Testen der Richtcharakteristik wird derselbe Aufbau gewählt, wobei jedoch der Einfallswinkel der Schallwellen auf das Mikrofon angepasst wird. Hersteller von Mikrofonen geben manchmal den Frequenzgang des Mikrofons sowie die Richtcharakteristik im Handbuch an (s. z.B. Abbildung 2.6 für das Dodotronic-Mikrofon). Das Datenblatt des vom Batcorder genutzten Knowles-Mikrofon gibt keine Auskunft über diese Charakteristika. Außerdem haben Mikrofone einen gewissen Kalibrierungsfehler, weswegen

immer eigene Tests durchgeführt werden sollten, um die spezifischen Eigenschaften des im Projekt genutzten Mikrofons zu ermitteln [40, S. 46] [63, S. 32]. In der vorliegenden Arbeit konnte diese Methode zur Berechnung des Erfassungsvolumens nicht angewendet werden, da kein Messlautsprecher mit einem bekannten Frequenzgang im Bereich zwischen 16 kHz und 150 kHz vorhanden war.

Hinsichtlich der Forschungsfrage 1 (s. Unterabschnitt 3.2.1) ist festzuhalten, dass die Erfassungsreichweite des Prototypen mit den gewählten Einstellungen schlechter als die des Batcorders war. Jedoch wird - wie im vorangegangenen Absatz beschrieben - empfohlen, weitere Tests zur präziseren Bestimmung der Erfassungsreichweite durchzuführen.

6.2 Identifikation

Die Einordnung der Versuchsergebnisse zur Identifikation wird im Folgenden vorgenommen. Dafür werden zuerst die Implikationen aus dem Versuch zur Merkmalsextraktion genauer betrachtet. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Klassifikation der Rufsequenzen eingeordnet.

6.2.1 Merkmalsextraktion

Der Versuch der Merkmalsextraktion diente zur Klärung der Forschungsfrage, wie groß die quantitativen Unterschiede in den für die Klassifikation genutzten Parametern der aufgenommenen Signale der beiden Systeme sind. Die Versuche haben gezeigt, dass beide Systeme den Ausgangsruf nicht originalgetreu aufzeichneten und teilweise über den festgelegten Fehlergrenzen lagen. Außerdem unterschieden sich die extrahierten Parameter zwischen den Aufnahmen eines Systems einer Rufsequenz. Damit wurden beide aufgestellten Hypothesen falsifiziert. Es ist aus den Ergebnis auch deutlich abzulesen, dass die Abweichungen bei dem Ruf der Art *Pipistrellus pipistrellus* (P. pip.) bei beiden Systemen größer waren als bei den Rufen der Art *Nyctalus noctula* (N. noc.). Das deutet darauf hin, dass die Unterschiede in der Merkmalsextraktion vor allem bei höheren Frequenzen auftreten, was unter Berücksichtigung der frequenzabhängigen Dämpfung von Schall in der Luft Sinn ergibt.

Hinsichtlich der in Unterabschnitt 3.2.2 beschriebenen Forschungsfrage 2, die die Größe der quantitativen Unterschiede in den für die Klassifikation genutzten Parametern der aufgenommenen Signale der beiden Systeme hinterfragt, ist folgendes festzuhalten: Für die korrekte Aufnahme der Dauer der Rufe sind beide Systeme geeignet, da sich die Unterschiede im tolerierbaren Bereich befanden. Bei den Frequenzparametern unterschieden sich die Ergebnisse für die beiden Rufe. Die aus den P. pip.-Aufnahmen extrahierten Werte der Parameter des Prototyps waren ungenauer als die des Batcorders. Bei den N. noc.-Aufnahmen waren die Werte des Prototyps näher an den Originalwerten als die des Batcorders. Im Mittel über beide Arten waren die Aufnahmen des Batcorders jedoch präziser.

Für eine genauere Untersuchung der Unterschiede und Ursachen sollte ein Folgeversuch durchgeführt werden, in dem die Anzahl an aufgenommenen Sequenzen erhöht wird, um die Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung robuster gegenüber Ausreißern zu machen. Des Weiteren sollten mehrere verschiedene Rufe einer Art analysiert werden, um mögliche Einflüsse eines bestimmten Rufes zu verringern. Zusätzlich sollten weitere Arten überprüft werden, um ein umfassenderes Bild über verschiedene Frequenzbereiche zu bekommen. Um diese Ergebnisse im Anschluss einordnen zu können und Ursachen für Unterschiede zu finden, ist es notwendig, die im vorherigen Abschnitt erwähnte Messung des Frequenzgangs der Mikrofone durchzuführen.

6.2.2 Klassifikation

Die in Unterabschnitt 3.2.2 beschriebene Forschungsfrage 3 soll im Folgenden auf Basis der Ergebnisse beantwortet werden. Auf den ersten Blick lässt sich aus den Ergebnissen des Versuches herauslesen, dass die Aufnahmen des Dodotronic-Systems im Vergleich zum Batcorder besser abschneiden. Das gilt sowohl für die automatische als auch für die manuelle Klassifikation. Bei beiden hat das Dodotronic-System mehr Aufnahmen produziert, die der korrekten Art zugeordnet wurden.

Die Ergebnisse des Versuches sind jedoch nur bedingt aussagekräftig. Wie bereits ausgeführt, haben die Systeme bei manchen Rufsequenzen mehrere Aufnahmen ausgelöst. Die Sequenzen mit mehr als einer Aufnahme unterschieden sich zwischen dem Batcorder und dem Prototypen. Das bedeutet, dass auch die Klassifikationsergebnisse nur schwer zu vergleichen sind. So hat zum Beispiel das Dodotronic-System bei der Rufsequenz der *Nyctalus noctula* zwei Aufnahmen ausgelöst, die beide korrekt klassifiziert wurden, während es beim Batcorder nur eine war.

Ein weiterer Aspekt, der die Belastbarkeit der Ergebnisse einschränkt, ist die Auswahl der genutzten Fledermausrufsequenzen. Die Sequenzen wurden ausgewählt, da sie für den genutzten Lautsprecher vorverarbeitet waren. Jedoch wird bei der Betrachtung der Ergebnisse deutlich, dass mehrere der Originalsequenzen sowohl bei der automatischen als auch bei der manuellen Analyse fehlerhaft klassifiziert wurden. Unter diesen Voraussetzungen ist es unwahrscheinlich, dass die Aufnahmen der Sequenzen korrekt klassifiziert wurden. Die aufgestellte Hypothese kann also durch die Ergebnisse nicht falsifiziert oder weiter spezifiziert werden.

Um eine belastbarere Aussage über die Klassifikationsraten der einzelnen Geräte treffen zu können, wird daher empfohlen, den Versuch mit einigen Anpassungen erneut durchzuführen. Zuerst muss der in Abschnitt 6.1 beschriebene notwendige Test zur Feststellung der Kalibrierung der Mikrofone durchgeführt werden. Anhand dessen können dann die Triggerschwellen so gewählt werden, dass eine Rufsequenz verlässlich nur eine Aufnahme bei den Systemen auslöst. Des Weiteren müssen Rufsequenzen ausgewählt werden, deren Art korrekt klassifiziert werden kann. Diese müssen im Anschluss an den Frequenzgang des Lautsprechers angepasst werden. Außerdem sollte die Anzahl an verschiedenen Rufsequenzen erhöht werden, um eine präzisere Aussage

treffen zu können. Ein weiterer Faktor, der bei künftigen Versuchen berücksichtigt werden sollte, ist die mögliche individuelle Voreingenommenheit der Expert*Innen. Diese sollte ausgeglichen werden, indem mehrere Expert*Innen die manuelle Klassifikation durchführen.

Die Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass das Dodotronic-System ähnlich gute Klassifikationsraten erzielt wie der Batcorder. Um diese Aussage belastbar abzusichern, sind jedoch - wie oben geschildert - Folgeversuche notwendig.

7 Fazit

Die umfängliche Erfassung von Fledermausaktivitäten an WEA ist zwingend erforderlich, um die Reduktion von Schlagopfern durch eine Anpassung der Abschaltalgorithmen der WEA zu erzielen. Das Projekt „Drones4Bats“ verfolgt das Ziel, die Analyse von Fledermauspopulationen mithilfe von Detektorsystemen an Drohnen zu optimieren. Im Rahmen von dort durchgeführten Forschungsarbeiten wurde deutlich, dass die dafür genutzten akustischen Detektorsysteme Mängel aufweisen und optimiert werden müssen. Der daraufhin in der Lehrveranstaltung „IT-Systeme“ der HAW entwickelte Prototyp wurde in der vorliegenden Arbeit einem Vergleich mit einem kommerziellen Detektor unterzogen mit dem Ziel, Erkenntnisse hinsichtlich der Forschungsfrage „Wie unterscheidet sich die Aufnahmequalität des Dodotronic-Prototypen im Vergleich zum Batcorder der Firma ecoObs GmbH hinsichtlich der Detektion und Identifikation von voraufgezeichneten Fledermausrufen?“ zu gewinnen.

Auf Basis der bestehenden Fachliteratur wurden mehrere Tests entwickelt, um akustische Fledermausdetektoren miteinander zu vergleichen. Diese Tests prüfen sowohl die Detektions- als auch die Identifikationsfähigkeit der Systeme. Damit ermöglichen sie es, den Vergleich zwischen Detektorsystemen mithilfe von voraufgezeichneten Fledermausrufsequenzen anzustellen und möglichst realitätsnahe und trotzdem wiederholbare Versuchsreihen durchzuführen. In der Literatur wurden derartige Vergleiche bisher entweder im Realbetrieb oder mithilfe von synthetischen Signalen durchgeführt [39] [42]. Durch die Entwicklung dieser Methoden wird eine Alternative geschaffen, um erste Vergleiche zwischen neuen und bestehenden Systemen anstellen zu können. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war, mithilfe der entwickelten Methoden den Prototypen mit dem Batcorder zu vergleichen und damit eine Aussage über die Möglichkeit seines Einsatzes im Forschungsprojekt „Drones4Bats“ zu erlauben. Die gesammelten Daten zeigen, dass der Prototyp derzeit noch nicht einsatzfähig ist. Die Hauptursache dafür liegt in der unklaren Kalibrierung des Dodotronic-Mikrofons, die zu nicht aussagekräftigen Ergebnissen bei der Detektion führt. Ohne eine korrekte Kalibrierung und der sich daraus ergebenden Einstellung der Triggerschwelle ist es aktuell nicht möglich, eine verlässliche Aussage über die Erfassungsreichweite des entwickelten Systems zu treffen.

Hinsichtlich der Identifikation der Rufsequenzen deuten die Versuche darauf hin, dass das Dodotronic-System eine ähnlich gute Klassifikationsrate von Rufsequenzen ermöglicht wie der Batcorder. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist jedoch zu beachten, dass die Kalibrierung einen Einfluss auf die Anzahl an aufgenommenen Rufsequenzen und damit auf die Menge an korrekt klassifizierten Aufnahmen hat und

einige Originalrufsequenzen für den Vergleich womöglich ungeeignet sind, da sie nicht korrekt klassifiziert werden konnten.

Eine unerlässliche Anpassung des Systems für Folgeprojekte ist der Austausch des Raspberry Pi durch einen leistungstärkeren Computer, da dieser die Aufnahme und Verarbeitung des Signals nicht schnell genug durchführen konnte. Aufgrund dieser dargestellten Faktoren bedarf es weiterer Versuche, um eine präzisere Aussage über die Qualität des Prototypen treffen zu können und die Testmethoden weiterzuentwickeln und zu verfeinern. Dabei sind vor allem Tests für die korrekte Kalibrierung der Systeme mithilfe von Messmikrofonen notwendig, um darauf aufbauend die genutzten Systemparameter für die weiteren Versuche zu optimieren. Um die Aussagefähigkeit des Klassifikationstests zu erhöhen, wird empfohlen, ein Datenset verschiedener Fledermausrufe mit gewissen qualitativen Standards anzulegen. Zu diesen Standards gehören u.a.: eine Vielzahl verschiedener Fledermausrufe, die einen breiten Bereich des Frequenz- und Artenspektrum abbilden; die Rufe müssen durch das automatische Auswertungsprogramm korrekt klassifiziert werden; eine ähnliche Lautstärke aller Rufe, um sicherzustellen, dass alle Sequenzen eine Aufnahme auslösen. Mithilfe dieser und weiterer noch auszuarbeitender qualitativer Standards lässt sich eine Datengrundlage erstellen, die einen reliablen Laborvergleich von Fledermausdetektorsystemen ermöglicht.

Um Lösungen für das Grün-Grün-Dilemma zwischen Klimaschutzzielen, speziell der Windenergieproduktion, und dem Fledermausartenschutz zu entwickeln, sind vertiefende Untersuchungen notwendig, die den Forschungsstand sukzessive erweitern. Eine noch genauere Analyse der Fledermauspopulationen an WEA ist erforderlich, um das Kollisionsrisiko weiter zu reduzieren und mithilfe von fledermausfreundlichen Betriebsalgorithmen den evidenzbasierten Fledermausschutz auszubauen. Diese Arbeit entwickelte Grundlagen für reliable, reproduzierbare Laborversuche, um Fledermausdetektoren praxisnah miteinander zu vergleichen, ohne Feldtests durchführen zu müssen. Die hier aufgezeigten Anpassungen ermöglichen es, neue Detektoren schnell und kostengünstig zu testen und ihre Anwendbarkeit in Projekten zur Fledermausforschung zu prüfen. Damit leistet diese Arbeit einen über den Artenschutz an WEA hinausgehenden Beitrag zum Fledermausschutz.

A Anhang

Tabelle A.1: Die extrahierten Parameter aus einem Ruf einer Fledermaus der Art *Pipistrellus pipistrellus* für alle Aufnahmen des Batcorders. Die Extraktion wurde mit BatScope 4 durchgeführt. Dargestellt werden die Parameter aus dem Originalsignal (Ursprung), der einzelnen Aufnahmen (1-5) sowie der Mittelwert $\bar{x}$ und die Standardabweichung der Stichprobe s_x . Die Parameter sind die Dauer in ms sowie die Startfrequenz des Rufes F_{start} , die maximale Frequenz F_{max} , die Frequenz mit der maximalen Energie F_{maxE} , die minimale Frequenz F_{min} und die Endfrequenz F_{end} in kHz.

	Ursprung	Batcorder						
		1	2	3	4	5	$\bar{x}$	s_x
Dauer	3,01	3,17	3,01	3,17	3,17	3,17	3,138	0,072
F_{start}	52,64	51,73	52,03	51,73	51,73	51,73	51,79	0,134
F_{max}	52,64	51,73	52,03	51,73	51,73	51,73	51,79	0,134
F_{maxE}	48,07	46,84	46,84	46,84	46,84	46,84	46,84	0
F_{min}	46,84	46,84	46,84	46,84	46,84	46,84	46,84	0
F_{end}	47,15	46,84	46,84	46,84	46,84	46,84	46,84	0

Tabelle A.2: Die extrahierten Parameter aus einem Ruf einer Fledermaus der Art *Pipistrellus pipistrellus* für alle Aufnahmen des Dodotronic-Prototypen. Die Extraktion wurde mit BatScope 4 durchgeführt. Dargestellt werden die Parameter aus dem Originalsignal (Ursprung), der einzelnen Aufnahmen (1-5) sowie der Mittelwert $\bar{x}$ und die Standardabweichung der Stichprobe s_x . Die Parameter sind die Dauer in ms sowie die Startfrequenz des Rufes F_{start} , die maximale Frequenz F_{max} , die Frequenz mit der maximalen Energie F_{maxE} , die minimale Frequenz F_{min} und die Endfrequenz F_{end} in kHz.

	Ursprung	Dodotronic					$\bar{x}$	s_x
		1	2	3	4	5		
Dauer	3,01	2,84	2,67	2,84	2,84	2,84	2,806	0,068
F_{start}	52,64	51,42	51,12	51,12	51,42	51,42	51,3	0,164
F_{max}	52,64	51,42	51,12	51,12	51,42	51,42	51,3	0,164
F_{maxE}	48,07	46,84	46,84	46,84	46,84	46,84	46,84	0
F_{min}	46,84	46,23	46,84	46,23	46,23	46,23	46,352	0,273
F_{end}	47,15	46,23	46,84	46,23	46,23	46,23	46,352	0,273

Tabelle A.3: Die extrahierten Parameter aus einem Ruf einer Fledermaus der Art *Nyctalus noctula* für alle Aufnahmen des Batcorders. Die Extraktion wurde mit BatScope 4 durchgeführt. Dargestellt werden die Parameter aus dem Originalsignal (Ursprung), der einzelnen Aufnahmen (1-5) sowie der Mittelwert $\bar{x}$ und die Standardabweichung der Stichprobe s_x . Die Parameter sind die Dauer in ms sowie die Startfrequenz des Rufes F_{start} , die maximale Frequenz F_{max} , die Frequenz mit der maximalen Energie F_{maxE} , die minimale Frequenz F_{min} und die Endfrequenz F_{end} in kHz.

	Ursprung	Batcorder					$\bar{x}$	s_x
		1	2	3	4	5		
Dauer	11,69	11,52	11,35	11,52	11,52	11,52	11,486	0,068
F_{start}	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	0
F_{max}	21,21	21,21	21,21	21,21	21,21	21,21	21,21	0
F_{maxE}	19,68	19,68	19,68	19,68	19,68	19,68	19,68	0
F_{min}	19,68	19,38	19,38	19,38	19,38	19,38	19,38	0
F_{end}	19,99	19,38	19,38	19,38	19,38	19,38	19,38	0

Tabelle A.4: Die extrahierten Parameter aus einem Ruf einer Fledermaus der Art *Nyctalus noctula* für alle Aufnahmen des Dodotronic-Prototypen. Die Extraktion wurde mit BatScope 4 durchgeführt. Dargestellt werden die Parameter aus dem Originalsignal (Ursprung), der einzelnen Aufnahmen (1-5) sowie der Mittelwert $\bar{x}$ und die Standardabweichung der Stichprobe s_x . Die Parameter sind die Dauer in ms sowie die Startfrequenz des Rufes F_{start} , die maximale Frequenz F_{max} , die Frequenz mit der maximalen Energie F_{maxE} , die minimale Frequenz F_{min} und die Endfrequenz F_{end} in kHz.

	Ursprung	Dodotronic						
		1	2	3	4	5	$\bar{x}$	s_x
Dauer	11,69	12,02	12,02	11,85	11,85	11,85	11,918	0,0833
F_{start}	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	0
F_{max}	21,21	21,21	20,9	21,21	21,21	21,21	21,148	0,124
F_{maxE}	19,68	19,68	19,68	19,68	19,68	19,68	19,68	0
F_{min}	19,68	19,07	19,07	19,68	19,68	19,68	19,436	0,299
F_{end}	19,99	19,68	20,29	19,99	20,29	19,99	20,048	0,228

Tabelle A.5: Ergebnisse der automatischen Artbestimmung für die Originalsequenz sowie für die Aufnahmen des Batcorders und des Dodotronic-Systems. Die Bestimmung wurde mithilfe der Software BatScope 4 durchgeführt. Wenn mehr als eine Aufnahme pro Sequenz aufgenommen wurde, sind die bestimmten Arten der einzelnen Aufnahmen untereinander aufgetragen. Die ausgeschriebenen Namen der Arten sind im Abkürzungsverzeichnis aufgelistet.

Fledermausart	Automatische Artbestimmung		
	Original	Batcorder	Dodotronic
P. pip.	P. pip.	P. pip.	P. pip.
P. nath.	P. nath.	P. nath.	P. nath.
N. noc.	N. noc.	N. noc.	N. noc.
			N. noc.
Pl. aur.	R. fer.	P. kuh.	B. bar.
	R. fer.	M. cap.	B. bar.
		E. ser.	B. bar.
		Pl. aus.	Pl. aus.
M. myo.	M. em.	P. kuh.	-
M. nat.	M. myst.	P. kuh.	M. nat.
			M. dau.
M. myst.	M. alc.	P. kuh.	P. kuh.
		P. nath.	

Tabelle A.6: Ergebnisse der manuellen Artbestimmung für die Originalsequenz sowie für die Aufnahmen des Batcorders und des Dodotronic-Systems. Wenn mehr als eine Aufnahme pro Sequenz aufgenommen wurde, sind die bestimmten Arten der einzelnen Aufnahmen untereinander aufgetragen. Die ausgeschriebenen Namen der Arten sind in Abkürzungsverzeichnis aufgelistet. Myotis sp. bedeutet, dass ausschließlich die Gattung Myotis bestimmt werden konnte, jedoch keine genau Art. „-“ bedeutet, dass keine Aufnahme für die Rufsequenz getriggert wurde.

Manuelle Artbestimmung			
Fledermausart	Original	Batcorder	Dodotronic
P. pip.	P. pip.	P. pip.	P. pip.
P. nath.	P. nath./P. kuh.	P. nath./P. kuh.	P. nath./P. kuh.
N. noc.	N. noc.	N. noc.	N. noc.
			N. noc.
Pl. aur.	B. bar.	B. bar.	B. bar.
		B. bar.	B. bar.
		nicht bestimmbar	B. bar.
		Pl. aus./Pl. aur.	Pl. aus./Pl. aur.
M. myo.	M. myo./M. dau./M. bec.	M. myo./M. dau./M. bec.	-
M. nat.	M. nat.	Myotis sp.	Myotis sp.
			nicht bestimmbar
M. myo.	nicht bestimmbar	Myotis sp.	M. myst./M. dau./M. bec.
		M. myo./M. dau./M. bec.	

Abbildungsverzeichnis

2.1	Darstellung eines Fledermausruf	10
2.2	Vergleich der verschiedenen Rufarten: qcf, fm, fm-qcf	12
2.3	Darstellung Parameter zur Bestimmung der Fledermausart	13
2.4	Fotot des Mini-Batcorders	17
2.5	Visualisierung der Pre-/Posttriggerfunktionalität	18
2.6	Frequenzdiagramm und Richtcharakteristik des Dodotronic Ultramic 384K EVO	21
2.7	Flussdiagramm der Datenverarbeitung in BatScope 4	23
2.8	Flussdiagramm der Vorverarbeitung von Rufen durch BatScope 4	23
2.9	Flussdiagramm der Klassifikation von Rufen durch BatScope 4	24
3.1	Rechteck- und Hann-Fenster	28
3.2	Fensterung eines Zeitsignals durch ein Hann-Fenster mit 50% Überlappung	29
4.1	Versuchsaufbau Detektion	34
4.2	Versuchsaufbau Identifikation	37

Tabellenverzeichnis

2.1	Spezifikationen des Raspberry Pi 3 Model B+ [52]	20
4.1	Spezifikationen Testlaptop	32
4.2	Tolerierbare Fehler für die extrahierten Merkmale	36
5.1	Anzahl an ausgelösten Aufnahmen der Systeme beim Detektionstests	38
5.2	Extrahierte Parameter aus einem Ruf der Art P. pip.	40
5.3	Extrahierte Parameter aus einem Ruf der Art N. noc.	41
5.4	Vergleich der Klassifikationen von Originalruf, Batcorder und Dodotronic-System	41
A.1	Extrahierte Parameter aus einem Ruf der Art P. pip. für alle Aufnahmen des Batcorders	49
A.2	Extrahierte Parameter aus einem Ruf der Art P. pip. für alle Aufnahmen des Dodotronic-Prototypen	50
A.3	Extrahierte Parameter aus einem Ruf der Art N. noc. für alle Aufnahmen des Batcorders	51
A.4	Extrahierte Parameter aus einem Ruf der Art N. noc. für alle Aufnahmen des Dodotronic-Prototypen	52
A.5	Ergebnisse der automatischen Artbestimmung	53
A.6	Ergebnisse der manuellen Artbestimmung	54

Literatur

- [1] SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP, „Mehr Fortschritt wagen - Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit“, *Koalitionsvertrag 2021-2025*, 2021.
- [2] R. Brinkmann, O. Behr, I. Niermann und M. Reich, *Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen*. Cuvillier Verlag, 2011, Bd. 4.
- [3] O. Behr, R. Brinkmann, F. Korner-Nievergelt, M. Nagy, I. Niermann, M. Reich und R. Simon, „Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen (RENEBAT II) - Zusammenfassung“, in *Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen (RENEBAT II)*. - *Umwelt und Raum Bd.7, Institut für Umweltplanung, Hannover*. Behr, Oliver u. a., 2018, Kap. 1, S. 7–14.
- [4] O. Behr, R. Brinkmann, K. Hochradel, J. Mages, F. Korner-Nievergelt, H. Reinhard, R. Simon, F. Stiller, N. Weber und M. Nagy, *Bestimmung des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen in der Planungspraxis (RENEBAT III), Endbericht des Forschungsvorhabens gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 0327638E)*. O. Behr et al. Erlangen / Freiburg / Ettiswil. 2018.
- [5] V. Runkel, „Akustische Erfassung von Fledermäusen–Möglichkeiten und Grenzen im Bau und Betrieb von Windkraftanlagen“, in *Evidenzbasierter Fledermausschutz in Windkraftvorhaben*, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2020, S. 3–27.
- [6] O. Behr, R. Brinkmann, I. Niermann und F. Korner-Nievergelt, „Fledermausfreundliche Betriebsalgorithmen für Windenergieanlagen“, in *Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore Windenergieanlagen*. - *Umwelt und Raum Bd.4, Cuvillier Verlag, Göttingen*. Behr, Oliver u. a., 2011, Kap. 1, S. 384–405.
- [7] T. Grunwald, F. Schäfer, F. Adorf und B. LAAR, „Neue bioakustische Methoden zur Erfassung der Höhenaktivität von Fledermäusen an geplanten und bestehenden WEA-Standorten“, *Nyctalus*, Jg. 12, Nr. 2-3, S. 131–140, 2007.
- [8] T. Sattler und F. Bontadina, „Grundlagen zur ökologischen Bewertung von zwei Windkraftgebieten in Frankreich aufgrund der Diversität und Aktivität von Fledermäusen“, *SWILD—Municipal Ecology, Wild Animal Research, commissioned by Megawatt Eole Company Ltd*, 2005.

- [9] A. Michez, S. Broset und P. Lejeune, „Ears in the Sky: Potential of Drones for the Bioacoustic Monitoring of Birds and Bats“, *Drones*, Jg. 5, Nr. 1, S. 9, 2021.
- [10] T. August und T. Moore, „Autonomous drones are a viable tool for acoustic bat surveys“, *bioRxiv*, S. 673–772, 2019.
- [11] Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg), *Drones4Bats*, Zugriff am 30.06.2022, 2022. Adresse: <https://drones4bats.de/>.
- [12] NABU (Naturschutzbund Deutschland) e. V., *Heimische Fledermäuse - Alle Arten im Portrait*, Zugriff am 11.08.2022, 2022. Adresse: <https://www.nabu.de/tiere-und-pflanzen/saeugetiere/fledermaeuse/arten/index.html>.
- [13] C. Dietz, D. Nill und O. von Helversen, *Handbuch Fledermäuse Europas*. Kosmos, 2016.
- [14] R. Skiba, „Europäische Fledermäuse“, *Westarp Wissenschaften, Hohenwarsleben*, 2003.
- [15] L. Bach, „Fledermäuse und Windenergienutzung – reale Probleme oder Einbildung“, *Vogelkundliche Berichte aus Niedersachsen*, Jg. 33, Nr. 2, S. 119–124, 2001.
- [16] C. C. Voigt, *Evidenzbasierter Fledermausschutz in Windkraftvorhaben*. Springer Nature, 2020.
- [17] J. Hurst, S. Balzer, M. Biedermann, C. Dietz, M. Dietz, E. Höhne, I. Karst, R. Petermann, W. Schorcht, C. Steck u. a., „Erfassungsstandards für Fledermäuse bei Windkraftprojekten in Wäldern“, *Natur und Landschaft*, Jg. 90, Nr. 4, S. 157–196, 2015.
- [18] D. O. Behr und B.-U. Rudolph, „Arbeitshilfe Fledermausschutz und Windkraft Teil 1: Fragen und Antworten, Fachfragen des bayerischen Windenergies-Erlasses“, 2017.
- [19] U. Markmann und B. Pfeiffer, „Bestimmung von Fledermausrufaufnahmen und Kriterien für die Wertung von akustischen Artnachweisen - Teil 1“, 2020.
- [20] H.-U. Schnitzler, C. F. Moss und A. Denzinger, „From spatial orientation to food acquisition in echolocating bats“, *Trends in Ecology & Evolution*, Jg. 18, Nr. 8, S. 386–394, 2003.
- [21] L. A. Miller und H. J. Degn, „The acoustic behavior of four species of vespertilionid bats studied in the field“, *Journal of comparative physiology*, Jg. 142, Nr. 1, S. 67–74, 1981.
- [22] D. W. Thomas, G. P. Bell und M. B. Fenton, „Variation in echolocation call frequencies recorded from North American vespertilionid bats: a cautionary note“, *Journal of Mammalogy*, Jg. 68, Nr. 4, S. 842–847, 1987.
- [23] D. Russo und C. C. Voigt, „The use of automated identification of bat echolocation calls in acoustic monitoring: A cautionary note for a sound analysis“, *Ecological Indicators*, Jg. 66, S. 598–602, 2016.

- [24] G. Pfalzer, *Inter-und intraspezifische Variabilität der Soziallaute heimischer Fledermausarten*. Berlin, 2002.
- [25] C. Zürcher und T. Frank, *Bauphysik*, 5. Aufl. vdf Hochschulverlag AG, 2004.
- [26] M. J. O'Farrell und W. L. Gannon, „A comparison of acoustic versus capture techniques for the inventory of bats“, *Journal of Mammalogy*, Jg. 80, Nr. 1, S. 24–30, 1999.
- [27] A. Kurta und T. Kunz, „Capture methods and holding devices“, *Ecology and behavioral methods for the study of bats*, S. 1–30, 1988.
- [28] A. Hoffmann, J. Decher, F. Rovero, J. Schaer, C. Voigt und G. Wibbelt, „Field methods and techniques for monitoring mammals“, *Manual on field recording techniques and protocols for all taxa biodiversity inventories*, Jg. 8, Nr. part 2, S. 482–529, 2010.
- [29] R. S. Sikes und W. L. Gannon, „Guidelines of the American Society of Mammalogists for the use of wild mammals in research“, *Journal of mammalogy*, Jg. 92, Nr. 1, S. 235–253, 2011.
- [30] F. Bontadina, D. Scaravelli, S. Gloor, T. Hotz und A. Beck, „Radio-tracking bats: a short review with examples of a study in Italy“, 1999.
- [31] T. H. Kunz, E. B. Arnett, B. M. Cooper, W. P. Erickson, R. P. Larkin, T. Mabee, M. L. Morrison, M. D. Strickland und J. M. Szewczak, „Assessing impacts of wind-energy development on nocturnally active birds and bats: a guidance document“, *The Journal of Wildlife Management*, Jg. 71, Nr. 8, S. 2449–2486, 2007.
- [32] I. Niermann, O. Behr, R. Brinkmann, F. Korner-Nievergelt, R. Simon und M. Reich, „Kollisionsopfersuchen als Grundlage zur Überprüfung der Wirksamkeit von Abschaltalgorithmen“, in *Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen (RENEBAT II)*. - Umwelt und Raum Bd.7, Institut für Umweltplanung, Hannover. Behr, Oliver u. a., 2016, Kap. 7, S. 165–204.
- [33] R. Brinkmann, *Auswirkungen von Windkraftanlagen auf Fledermäuse: Ergebnisse aus dem Regierungsbezirk Freiburg mit einer Handlungsempfehlung für die Praxis*. Verlagsauslieferung der Naturschutzverwaltung Baden-Württemberg, JVA Mannheim, 2006.
- [34] G. D. Johnson, W. P. Erickson, M. D. Strickland, M. F. Shepherd, D. A. Shepherd und S. A. Sarappo, „Mortality of bats at a large-scale wind power development at Buffalo Ridge, Minnesota“, *The American Midland Naturalist*, Jg. 150, Nr. 2, S. 332–342, 2003.
- [35] R. Anderson, M. Morrison, K. Sinclair und D. Strickland, „Studying wind energy/bird interactions: a guidance document“, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), Techn. Ber., 1999.

- [36] F. Korner-Nievergelt, P. Korner-Nievergelt, O. Behr, I. Niermann, R. Brinkmann und B. Hellriegel, „A new method to determine bird and bat fatality at wind energy turbines from carcass searches“, *Wildlife Biology*, Jg. 17, Nr. 4, S. 350–363, 2011.
- [37] M. Nagy, B. Almasi, O. Behr, N. Ohlendorf, A. Schneider, F. Stiller und F. Korner-Nievergelt, „Der Effekt der Eigenschaften von Windenergieanlagen auf das Kollisionsrisiko von Fledermäusen“, in *Bestimmung des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen in der Planungspraxis (RENEBAT III)*, Endbericht des Forschungsvorhabens gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 0327638E). O. Behr et al. Erlangen / Freiburg / Ettiswil. Behr, Oliver u. a., 2018, Kap. 7, S. 147–191.
- [38] O. Behr, R. Brinkmann, K. Hochradel, J. Hurst, J. Mages, A. Naucke, M. Nagy, I. Niermann, H. Reers, R. Simon, N. Weber und F. Korner-Nievergelt, „Experimenteller Test der fledermausfreundlichen Betriebsalgorithmen“, in *Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen (RENEBAT II)*. - Umwelt und Raum Bd.7, Institut für Umweltplanung, Hannover. Behr, Oliver u. a., 2016, Kap. 8, S. 205–270.
- [39] A. M. Adams, M. K. Jantzen, R. M. Hamilton und M. B. Fenton, „Do you hear what I hear? Implications of detector selection for acoustic monitoring of bats“, *Methods in Ecology and Evolution*, Jg. 3, Nr. 6, S. 992–998, 2012.
- [40] R. Simon, K. Hochradel, J. Mages, M. Nagy, A. Naucke, I. Niermann, N. Weber und O. Behr, „Methoden akustischer Erfassung der Fledermausaktivität an Windenergieanlagen“, in *Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen (RENEBAT II)*. - Umwelt und Raum Bd.7, Institut für Umweltplanung, Hannover. Behr, Oliver u. a., 2016, Kap. 4, S. 39–80.
- [41] M. J. O’Farrell, B. W. Miller und W. L. Gannon, „Qualitative identification of free-flying bats using the Anabat detector“, *Journal of Mammalogy*, Jg. 80, Nr. 1, S. 11–23, 1999.
- [42] O. Behr, R. Brinkmann, K. Hochradel, F. Korner-Nievergelt, J. Mages, A. Naucke, M. Nagy, I. Niermann, R. Simon und N. Weber, „Akustische Erfassung der Fledermausaktivität“, in *Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen (RENEBAT II)*. - Umwelt und Raum Bd.7, Institut für Umweltplanung, Hannover. Behr, Oliver u. a., 2016, Kap. 6, S. 101–164.
- [43] Avisoft Bioacoustics, *UltraSoundGate - Avisoft Bioacoustics*, Zugriff am 14.07.2022, 2022. Adresse: <https://www.avisoft.com/ultrasoundgate/>.

- [44] Wildlife Acoustics, Inc., *Song Meter SM4 Wildlife Acoustics*, Zugriff am 14.07.2022, 2022. Adresse: <https://www.wildlifeacoustics.com/products/song-meter-sm4>.
- [45] ecoObs GmbH, *Hardware > ecoObs GmbH*, Zugriff am 06.07.2022, 2022. Adresse: <https://ecoobs.de/produkte/hardware/>.
- [46] Knowles Electronics, *FG-23329-P07 Datasheet*, Zugriff am 19.08.2022, 2022. Adresse: <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Knowles%20Acoustics%20PDFs/FG-23329-P07.pdf>.
- [47] ecoObs GmbH, *batcorder 3.1 Bedienungsanleitung Version 3.12 / de*, 2018.
- [48] ecoObs GmbH, *GSM-batcorder > ecoObs GmbH*, Zugriff am 06.07.2022, 2022. Adresse: <https://ecoobs.de/produkte/hardware/gsm-batcorder/>.
- [49] ecoObs GmbH, *Mini-batcorder > ecoObs GmbH*, Zugriff am 06.07.2022, 2022. Adresse: <https://ecoobs.de/produkte/hardware/mini-batcorder/>.
- [50] Raspberry Pi Ltd, *Buy a Raspberry Pi 3 Model B+ - Raspberry Pi*, Zugriff am 06.07.2022, 2022. Adresse: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>.
- [51] N. Petrov, D. Dobrilovic, M. Kavalić und S. Stanisavljev, „Examples of raspberry pi usage in internet of things“, in *Int. Conf. Appl. Internet Inf. Technol*, 2016.
- [52] Raspberry Pi Ltd, *Raspberry Pi 3 Model B+ - Product Brief*, Zugriff am 06.07.2022, 2022. Adresse: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi3/raspberry-pi-3-b-plus-product-brief.pdf>.
- [53] Dodotronic, *Ultramic 384K EVO | Dodotronic*, Zugriff am 06.07.2022, 2022. Adresse: <https://www.dodotronic.com/product/ultramic-384k-evo/>.
- [54] Dodotronic, *Ultramic384_EVO_User_Guide_ver_2_0.docx - Ultramic384_EVO_User_Guide.pdf*, Zugriff am 22.08.2022, 2022. Adresse: https://www.dodotronic.com/wp-content/uploads/2021/03/Ultramic384%5C_EVO%5C_User%5C_Guide.pdf.
- [55] M. K. Obrist und R. Boesch, „BatScope manages acoustic recordings, analyses calls, and classifies bat species automatically“, *Canadian Journal of Zoology*, Jg. 96, Nr. 9, S. 939–954, 2018.
- [56] S. Rapuano und F. J. Harris, „An introduction to FFT and time domain windows“, *IEEE instrumentation & measurement magazine*, Jg. 10, Nr. 6, S. 32–44, 2007.
- [57] M. Werner, „Diskrete Fourier-Transformation“, in *Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB®*, Springer, 2019.
- [58] G. Heinzel, A. Rüdiger und R. Schilling, „Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new at-top windows“, 2002.

- [59] Vibration Research Corp., *Averaging - Power Spectral Density Computation - VRU*, Zugriff am 04.08.2022, 2022. Adresse: <https://vru.vibrationresearch.com/lesson/averaging/>.
- [60] N. Jennings, S. Parsons und M. Pocock, „Human vs. machine: identification of bat species from their echolocation calls by humans and by artificial neural networks“, *Canadian Journal of Zoology*, Jg. 86, Nr. 5, S. 371–377, 2008.
- [61] J. Rydell, S. Nyman, J. Eklöf, G. Jones und D. Russo, „Testing the performances of automated identification of bat echolocation calls: A request for prudence“, *Ecological indicators*, Jg. 78, S. 416–420, 2017.
- [62] Peersonic Ltd., *How to process wav files for BatWav lure or trainer*, Zugriff am 04.08.2022, 2022. Adresse: <https://peersonic.co.uk/files/119/BATWAV-Info-Sheets/26/How-to-process-wav-files-for-BatWav-lure-or-trainer.pdf>.
- [63] N. Weber, M. Nagy, K. Hochradel, J. Mages, A. Naucke, A. Schneider, F. Stiller, O. Behr und R. Simon, „Akustische Erfassung der Fledermausaktivität an Windenergieanlagen“, in *Bestimmung des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen in der Planungspraxis (RENEBAT III), Endbericht des Forschungsvorhabens gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 0327638E)*. O. Behr et al. Erlangen / Freiburg / Ettiswil. Behr, Oliver u. a., 2018, Kap. 3, S. 31–58.
- [64] G.-B. Stan, J.-J. Embrechts und D. Archambeau, „Comparison of different impulse response measurement techniques“, *Journal of the Audio engineering society*, Jg. 50, Nr. 4, S. 249–262, 2002.

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

Ort, Datum

Finn Bayer