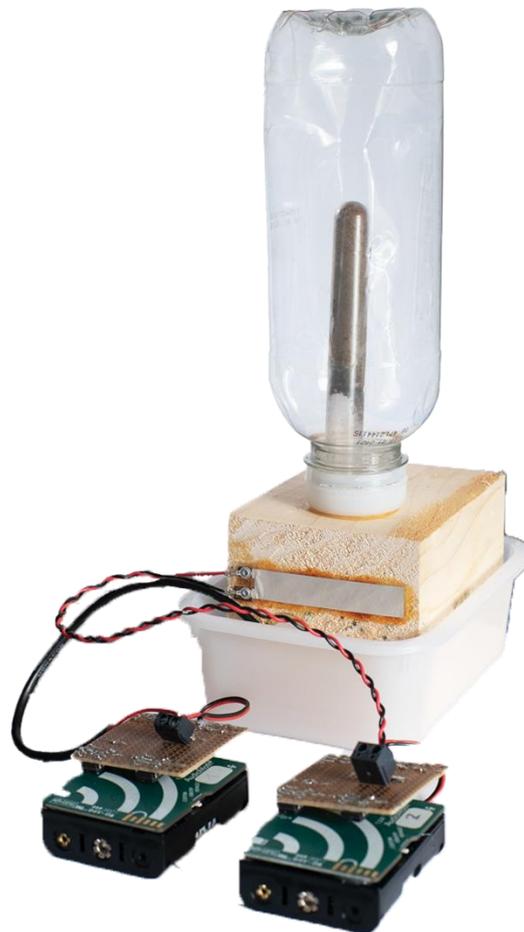


ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

**EIN OPEN SOURCE ANSATZ ZUR AKUSTISCHEN DETEKTION
HOLZBEWOHNENDER INSEKTEN**

Bachelorarbeit
Von
Jonas Umland
Bachelorstudiengang Umweltingenieurwesen
30.6.2021
Erneuerbare Energie und Ökotechnologien



Fachkorrektoren:

Prof. Dr. Ott Thomas
ZHAW LSFM, Schloss 1, 8820Wädenawil

MSc Riesen Matthias
ZHAW LSFM, Schloss 1, 8820Wädenawil

Dr. Alexander Szallies
ZHAW LSFM, Grüentalstrasse 14, 8820Wädenawil

Impressum

| | |
|-----------------|--|
| Schlagworte | Bioakustik, Open Source, holzbewohnende Insekten, Körperschall |
| Zitiervorschlag | Uhland J. (2021) Ein Open Source Ansatz zur akustischen Detektion holzbewohnender Insekten |
| Institut | Institut für Umwelt und natürliche Ressourcen |

Danksagung

Ich möchte meinen herzlichen Dank an Hannes Freitag und das Insect Fungus Lab der Albert-Ludwig-Universität Freiburg für die freundliche Unterstützung und das Bereitstellen der Käfer aussprechen.

Inhalt

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Einleitung..... | 1 |
| 2. | Theorieteil | 2 |
| 2.1 | Holz als akustisches Material | 2 |
| 2.2 | Charakterisierung von Schwingungen in der Bioakustik | 3 |
| 2.2.1 | Acoustic Emission AE | 4 |
| 2.2.2 | Körperschall / Vibrationen | 5 |
| 2.2.3 | Übergang von Körperschall an Materialgrenzen..... | 6 |
| 2.3 | Charakterisierung von Sensoren | 6 |
| 2.3.1 | Anforderungen an ein Messsystem zur Detektion von Käfern im Holz | 6 |
| 2.3.2 | Grundlagen und Messprinzipien | 6 |
| 2.3.3 | Piezoelektrische Wandler..... | 7 |
| 2.3.4 | Materialien für Piezowandler | 8 |
| 2.3.5 | Admittanz | 8 |
| 2.3.6 | Signalkonditionierung..... | 9 |
| 2.3.7 | Anbindung vom Sensor an die Probe | 10 |
| 2.4 | Aufzeichnung und Speicherung..... | 10 |
| 2.5 | Datenanalyse | 11 |
| 2.6 | Analyse und Filterung auf dem AudiMoth | 11 |
| 3. | Material und Methoden | 12 |
| 3.1 | Der Messaufbau | 12 |
| 3.2 | Modellorganismen | 13 |
| 3.3 | Wandler | 14 |
| 3.3.1 | Piezo Summer MZ20380BI | 14 |
| 3.3.2 | PVDF Film DT2-028K..... | 14 |
| 3.4 | Signalkonditionierung..... | 14 |
| 3.4.1 | Testaufbau für Wandler und Signalverarbeitung..... | 18 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.4.2 | Pencil lead test | 19 |
| 3.5 | Signalverarbeitung und Speicherung | 19 |
| 3.6 | Signalanalyse | 20 |
| 3.6.1 | Audacity..... | 20 |
| 3.6.2 | Librosa | 20 |
| 4. | Ergebnisse..... | 21 |
| 5. | Diskussion..... | 24 |
| 5.1 | Pencil lead test | 24 |
| 5.2 | Aussicht | 24 |
| 5.2.1 | Automatisierte Auswertung | 24 |
| 5.3 | Reflektion | 25 |
| 5.3.1 | Motivation und Weg zur schlussendlichen Umsetzung der Arbeit..... | 25 |
| 5.3.2 | Persönliche Learnings..... | 28 |
| 6. | Literaturverzeichnis..... | 30 |
| 7. | Abbildungsverzeichnis..... | 35 |

Zusammenfassung

Bioakustik ist eine vielversprechende Methode, um Veränderungen in Ökosystemen besser zu verstehen, geeignete Massnahmen zu beschliessen und deren Wirksamkeit zu überprüfen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit holzbewohnenden Insekten, die in Zeiten von globalen Lieferketten und Klimaveränderungen eine essenzielle Bedrohung für heimische Bäume und Ökosysteme darstellen können. Als Modellorganismus wurden kleine Holzbohrer *Xyleborus saxesinii* gewählt. Der Fokus liegt aber nicht auf der Biologie, sondern auf den physikalischen Grundlagen und der Technik zur bioakustischen Beobachtung von holzbewohnenden Insekten. Die physikalischen Grundlagen über Schall im Holz und der elektronischen Hilfsmittel sind in einem theoretischen Teil zusammengefasst und werden in einem Experiment umgesetzt. Ein wichtiger Anspruch hierbei war, dass die verwendeten Hard- und Softwares Open Source lizenziert sind. Der Kern der praktischen Arbeit ist die Entwicklung eines Vorverstärkers, mit dem ein piezoelektrischer Wandler als Körperschallmikrofon mit einem AudioMoth Rekorder verwendet werden kann. Die Datenauswertung wird in dieser Arbeit nur qualitativ gemacht, weitere Automatisierungen werden theoretisch diskutiert.

Abstract

Bioacoustics is a promising method to better understand changes in ecosystems, to decide on appropriate measures and to evaluate their effectiveness. This work focuses on wood-inhabiting insects that pose an essential threat to native trees and ecosystems in times of global supply chains and climate change. Fruit tree pinhole borer *Xyleborus saxesinii* were chosen as the model organism. The focus of this work is not on biology, but on physical principles and technology for bioacoustics observation of wood-inhabiting Insects. The physical basics about sound propagation in wood and the electronic instruments are summarized in a theoretical part and implemented in an experiment. An important requirement here was to use open source licensed hardware and software. The core of the practical work is the development of a preamplifier, with which a piezoelectric transducer can be used as a structure-borne sound microphone with an AudioMoth recorder. Data analysis is done only qualitatively in this work, further automations are discussed theoretically.

1. Einleitung

Die Methoden der Bioakustik etablieren sich zunehmend in diversen Anwendungen wie Artenschutz (Browning et al., 2017), Verhaltensbiologie (Naguib & Krause, 2020), im Tierwohl (McCloughlin et al., 2019) oder der Schädlingserkennung in landwirtschaftlichen Produkten (Banga et al., 2018) und Forstschädlingen (Becker et al., 2020), wobei letzteres bisher eher experimenteller Natur und kein Industriestandard ist. Die technische Machbarkeit wurde bereits vielfach bewiesen (Becker et al., 2020; Krajewski et al., 2020; Rochester, 2020; Brandstetter & S.Hübner, 2014; Mankin et al., 2011). Obwohl sich die Bioakustik als effiziente und ökologische Lösung zum Aufspüren und Identifizieren von Schadinsekten erwies, findet sie wegen der hohen Kosten und fehlenden Expertise noch keine weite Verbreitung (Bhairavi et al., 2020; Gibb et al., 2019). Generell wenig beachtet sind in der Verhaltensforschung Vibrationen in festen Substraten zur Kommunikation zwischen verschiedenen Individuen, obwohl dies bei vielen Arten beobachtet werden kann (Cocroft et al., 2014).

Open Source Hardware OSH für wissenschaftliche Apparaturen ist im Vergleich zu gleichwertigen proprietären Systemen günstiger. Pearce (2020) berechnet für verschiedene Forschungsprojekte ein durchschnittliches Einsparpotenzial von 87% gegenüber vergleichbarer proprietärer Hardware. Neben den reduzierten Kosten kann OSH auch helfen, dass Forschende die Gerätschaften durch Zugang zu den Entwicklungsunterlagen besser verstehen und dadurch zielführender einsetzen können. Zudem wird durch Open Source Lizenzierung verhindert, dass Firmen Patente erheben und Technologien deswegen nicht weiter entwickelt werden können (Chagas, 2018). Hochperformative Sensoren für Vibrationsmessungen wurden nach biologischen Vorbildern wie dem Orientierungssinn von Fischen (E.B.Priyanka & S.Thangavel, 2018) oder dem Sonar von Fledermäusen (Fiorillo et al., 2020) konstruiert. Daher kann sowohl die Entwicklung von Sensoren wie auch die Erforschung von biologischen Systemen zur Kommunikation mit Vibrationen von einem liberalen Umgang mit Entwicklungs- und Forschungsergebnissen profitieren.

Die vorliegende Arbeit fokussiert auf eine günstige und nicht proprietäre Technologie zur akustischen Überwachung von holzbevölkernden Insekten. AudioMoth (Hill et al., 2019) ist ein OSH Audiorekorder für bioakustische Studien. Sie verfügt über ein integriertes Mikrofon sowie über eine Schnittstelle für ein externes Mikrofon. In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung und Anwendung eines Körperschallmikrofons am AudioMoth zur Untersuchung von holzbevölkernden Insekten anhand eines Experiments mit kleinen Holzbohrern *Xyleborus saxeseni* diskutiert und dokumentiert. Die Arbeit umfasst einen Theorieteil über die physikalischen Grundlagen von Schall in Holz, die Auseinandersetzung mit verschiedenen Wandlern, der analogen Vorverstärkung und der Verarbeitung der erfassten Daten. Weiter wird die Entwicklung eines Vorverstärkers für Piezowandler dokumentiert und grundlegende Tests ausgeführt.

2. Theorieteil

Aufgrund der eigenständigen Erarbeitung der Themenfelder der Bioakustik, Elektrotechnik und Datenauswertung verfügt diese Arbeit über Informationen, die letztendlich keine Anwendung in der Methodik fanden. Durch das ganzheitliche Erarbeiten der verschiedenen Theorien, konnte jedoch ein Grundverständnis für die Herausforderungen und Lösungen eines solchen Projektes erlangt werden. Durch die Darstellung der gesamten Theorien wird die Möglichkeit geschaffen, ein ganzheitliches Verständnis über die verschiedenen Thematiken zu erlangen. Im folgenden Theorieteil wird ein Messaufbau in die Bereiche der Herkunft, Ausbreitung und Übertragung von Schwingungen, Wandler Prinzipien, Signalaufbereitung und Datenspeicherung – und Auswertung unterteilt. R. W. Mankin et al. (2011) nennt in seiner Arbeit die Substratstruktur, den Sensortypen und dessen Frequenzgang, die Verbindung von Sensor und Substrat und die Grösse sowie das Verhalten der Modellorganismen als relevante Faktoren für den Erfolg einer bioakustischen Untersuchung von Insekten in festem Substrat. Die Modellorganismen *Xyleborus saxeseni* wurden wegen ihrer Verfügbarkeit gewählt und sind in dieser Arbeit stellvertretend für beliebig andere Insekten mit ähnlicher Lebensweise. Da sich die vorliegende Arbeit auf die Technologie konzentriert, werden diese in keinem eigenen Kapitel des Theorieteils diskutiert. Es ist an dieser Stelle aber festzuhalten, dass Bedoya et al. (2019) für *Xyleborus saxeseni* keine Organe zur Lautäusserung feststellen konnte. Die zu erwartenden Geräusche sind also nach Claridge (2006) als «unintended noise» zu verstehen. Damit sind Geräusche gemeint, die durch Aktivitäten wie Fortbewegung oder beim Fressen entstehen.

2.1 Holz als akustisches Material

Die akustischen Eigenschaften von Holz als anisotropes, heterogenes und hygroskopisches Material unterliegen grossen Schwankungen. Die folgende Übersicht ist aus «Acoustic Emission in Wood» (Landis, 2008) entnommen.

Holz hat durch die unterschiedliche Beschaffenheit der Zellwände, der Ausrichtung der Faserung und der Schichtungen von Früh- und Spätholz wie auch von Kern- und Splintholz mechanisch anisotrope Eigenschaften. Das heisst, dass die Eigenschaften von der Wirkrichtung abhängig sind. Dieser Effekt ist der heterogenen Struktur des Holzes geschuldet. Abhängig davon, welche Effekte studiert werden sollen, ist dabei die Heterogenität vom molekularen bis strukturellen Massstab zu beachten. Wegen der grossen Bandbreite an relevanten Massstäben zur Charakterisierung wird traditionell zwischen Mikro- und Makrostrukturen unterschieden.

Auf einer sehr lokalen Ebene verursachen Jahrringe, als Makrostrukturen, Heterogenität. Durch unterschiedliche Wuchsgeschwindigkeiten im Winter und Sommer entstehen unterschiedliche

Zellgrößen und daher Holz von unterschiedlicher Dichte. Auf einer weniger lokalen Ebene sind die unterschiedlichen Eigenschaften von Kern- und Splintholz als Heterogenität zu beachten. Diesen Eigenschaften ist es geschuldet, dass sich Primärwellen in Richtung der Holzfasern meist mit 4000-6000 m/s und in radialer Richtung mit nur etwa 1000-2000 m/s ausbreiten. In tangentialer Richtung zu den Jahresringen verringert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit etwa um weitere 50%. Die lokale Heterogenität der Jahrringe führt auch zu sehr hoher Dämpfung. Dies ist aber nur für Acoustic Emission AE Anwendungen relevant und kann für Frequenzen unter 200kHz vernachlässigt werden.

Die Zellwände von Holzzellen beinhalten Mikrofibrillen, die dem Holz seine Stabilität und Steifheit in Richtung der Fasern geben. Mikrofibrillen sind Helix förmig angeordnet, wobei sich der Winkel der Windungen zur Faserrichtung in unterschiedlichen Teilen eines Baumes unterscheidet. Der Winkel der Windungen beeinflusst die Steifheit und somit auch die akustischen Eigenschaften auf der Mikroebene.

Holz als hygrogenes Material kann Wasser aufnehmen. Der Feuchtegehalt von Holz beeinflusst die mechanischen Eigenschaften massgeblich. Yang et al. (2015) konnten in Versuchen mit Ultraschall zeigen, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Dämpfung mit zunehmendem Feuchtegehalt abnehmen. Dieser Zusammenhang ist bis zur Fasersättigung von 32% Feuchtegehalt stark, darüber ist dieser Trend nur noch schwach vorhanden. Derselbe Trend konnte auch im akustischen Frequenzbereich beim Elastizität- und Schubmodul nachgewiesen werden (Bucur, 2006), von dem die Schallgeschwindigkeit vom Longitudinal- und Transversalwellen abhängig ist.

Das Lignin im Holz bestimmt wesentlich die akustischen Eigenschaften. Da die mechanischen Eigenschaften von Lignin von der Temperatur abhängen, kann dies einen erheblichen Einfluss auf die innere Reibung des Holzes und somit die akustischen Eigenschaften haben (Bucur, 2006). Diese Einflüsse sind aber primär ausserhalb des in dieser Arbeit relevanten Temperaturbereiches wahrnehmbar.

2.2 Charakterisierung von Schwingungen in der Bioakustik

Wir tendieren dazu, Schall aus einer anthropomorphen Sicht zu betrachten. Dies führt zu einem verfälschten Bild von Schall in der Natur, da sich der genutzte Frequenzbereich vieler Spezien wie auch vieler Insekten nicht mit demjenigen des menschlichen Gehörs deckt. Zudem verfügen Insekten nicht über Stimmorgane, die mit denen von Säugetieren vergleichbar sind. Insekten codieren Informationen in zeitlichen Mustern, Säugetiere primär in Grundfrequenzen und Obertönen (Claridge, 2006). Bei *Xyleborus saxesenii* konnte in einer Studie über die akustische Kommunikation von Borken- und Ambrosiakäfern (Bedoya et al., 2019) keine Kommunikation durch Stridulationslaute und somit keine

absichtliche Lautäußerung nachgewiesen werden. Diese Feststellung ist aber noch kein Beweis dafür, dass Akustische Signale keine Bedeutung im Verhalten dieser Spezies haben. Bei Moskitos zum Beispiel schienen die Geräusche der Flügel auf den ersten Blick keine Funktion zu haben, dienen aber der Kommunikation bei der Partnersuche (Gibson et al., 2010). Die vorliegende Arbeit befasst sich daher mit Geräuschen, die durch Fortbewegung und Frass verursacht werden. Die akustische Codierung von Informationen bei Insekten wird hier nicht weiter vertieft.

In der Literatur zum akustischen Monitoring von holzschädigenden Insekten werden die Begriffe Acoustic Emission AE, Vibration und Schall oft nicht klar abgegrenzt. In den nächsten Abschnitten werden die Begriffe abgegrenzt und erläutert. Diese Arbeit hält sich an die gängige Konvention, sämtliche Schwingungen, Schall und Vibrationen im menschlichen Hörbereich von 20Hz bis 20kHz dem akustischen und die übrigen dem Ultra- bzw. Infrabereich zuzuordnen.

2.2.1 Acoustic Emission AE

AE sind als elastische Wellen in festem Material definiert, die durch Frakturen in Makro- oder Mikrostrukturen oder durch Reibung verursacht werden (Ohtsu, 2008). AE ist gut verstanden, da es als Standardmethode zur Untersuchung von Ermüdungserscheinungen von Materialien weit verbreitet ist. Die Frequenz dieser Wellen ist in technischen Materialien wie Metallen oder Baustoffen typischerweise in einem Bereich von mehreren kHz bis MHz. AE Ereignisse haben typischerweise eine geringe Amplitude und das elektrische Signal vom Wandler wird daher meist mit einem Vor- und Hauptverstärker um einen Faktor von mehreren 100x verstärkt. Auch muss das Signal mit einem Bandpassfilter gefiltert werden, da Hintergrundlärm in meist niedrigeren Frequenzen das Signal sonst überlagern würde.

Wie mir von Pilke Burkhard, Ko-Autor von Becker et al. (2020), bei einem Telefongespräch mitgeteilt wurde, werden AE Ereignisse auch beim Durchtrennen von Holzfasern durch Insekten ausgelöst.

AE sind Vibrationen in einem hohen Frequenzbereich, die wie in Abbildung 1 dargestellt, als «Burst» auftreten, also in isolierten Ereignissen. In ISO 12716 2001 werden die Charakteristiken eines AE Ereignisses definiert:

Hit: Ein Wellenzyklus, der den Schwellenwert der Amplitude überschreitet.

Count: Die Anzahl Hits in einem Burst.

Amplitude: Wird in Dezibel angegeben, wobei der Wert von $1\mu\text{V} = 0\text{dB}$ ist. Die Amplitude ist nicht als direkter Wert zur Charakterisierung der Schwingung, sondern als Ausgabewert des Sensors zu verstehen.

Duration: Zeit zwischen dem ersten und letzten Hit in einem Burst.

Rise Time: Zeit zwischen dem ersten Hit und dem Hit mit der höchsten Amplitude in einem Burst.

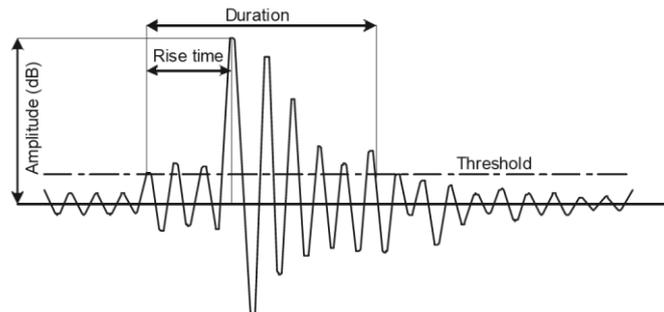


Abbildung 1: Charakterisierung eines AE Ereignisses. Quelle: Ohtsu (2008)

2.2.2 Körperschall / Vibrationen

Der Ausdruck Körperschall impliziert, dass es sich um den hörbaren Frequenzbereich handelt. Das Verhalten von Schwingungen kann meist auf den Infra- sowie Ultraschallbereich übertragen werden (Cremer & Heckl, 2013). Der folgende Abschnitt ist eine Zusammenfassung von Cremer & Heckl (2013). Schwingungen in festen Materialien können vereinfacht als Einmassenschwinger verstanden werden. Dieses System des Einmassenschwingers kann durch eine Masse, Federkonstante und Dämpfung beschrieben werden. In genauerer Betrachtung ist die Theorie von Körperschall sehr umfangreich und komplex und wird hier nicht weiter behandelt.

Sowie in Gasen, können in Feststoffen auch Longitudinalwellen vorkommen, die durch eine Volumenänderung, also Kompression des Mediums, beschrieben werden können. Sie werden Primärwellen genannt, sind aber nur relevant, wenn der Körper im Vergleich zur Wellenlänge sehr gross ist. Transversalwellen (auch Scher-, Rotations- oder Distorsionswellen), haben keine Volumen-, sondern eine Gestaltänderung zur Folge. In realen Körpern kommen immer Überlagerungen beider Wellentypen vor und bilden die räumlichen Wellen. Oberflächenwellen bewegen sich nur an der Oberfläche der Körper, ihre Intensität nimmt exponentiell zur Tiefe ab (Müller & Möser, 2004). Wenn diese die umgebende Luft anregen, dann entsteht für den Menschen hörbarer Schall.

2.2.3 Übergang von Körperschall an Materialgrenzen

Der Reflektionsfaktor R beim Übergang von Schall von einem Medium in ein anderes hängt von der akustischen Impedanz des emittierenden Körpers $Z1$ und des absorbierenden Körpers $Z2$ ab. Die akustische Impedanz ist eine Materialkonstante, die den akustischen Widerstand angibt. Sie ist als Produkt der Dichte und der Ausbreitungsgeschwindigkeit zu berechnen. Der Reflektionsfaktor ist eine wichtige Grösse, um die Ausbreitung in heterogenen Substratkompositionen und die Anbindung von Wandlern an das zu messende Substrat zu verstehen. Für den Fall von rechtwinklig auf die Grenzfläche auftreffende Wellen kann die Reflektionsfaktor R folgendermassen berechnet werden (Cremer & Heckl, 2013):

$$R = \frac{Z2 - Z1}{Z1 + Z2}$$

2.3 Charakterisierung von Sensoren

Im Folgenden sind allgemeingültige Grundlagen zu Messsystemen und Wandlern wie auch den in diesem Versuch verwendeten Technologien beschrieben.

2.3.1 Anforderungen an ein Messsystem zur Detektion von Käfern im Holz

Um den richtigen Wandler auszuwählen, sollte das zu messende Ereignis bekannt sein. Da Störgeräusche aus technischen Quellen (Technophonie) oder der abiotischen Umwelt (Geophonie) grösstenteils im Frequenzbereich unter 1kHz vorliegen, werden diese am besten bereits in der analogen Signalverarbeitung ausgefiltert (Mankin, 2011). Für Feldversuche haben sich die Anteile des Signals im Ultraschallbereich als geeignet erwiesen. Störgeräusche aus Techno- und Geophonie sind hierbei nicht zu erwarten. Ultraschall wird in der Luft und der Erde wesentlich mehr gedämpft als in Holz, weshalb Holzkörper bei diesen Frequenzen gegen äussere Quellen akustisch isoliert sind (Mankin et al., 2011).

2.3.2 Grundlagen und Messprinzipien

Feldmann (2018) erklärt die theoretischen Grundlagen von Körperschall und die Funktionsprinzipien der verschiedenen Wandler. Eine Schallwelle kann in einem festen Medium als Einmassenschwinger beschrieben werden. Ein Wandler kann die Auslenkung [m], die Geschwindigkeit [m/s] oder die Beschleunigung [m/s²] an der Oberfläche des Schalmediums in ein elektrisches Signal umwandeln. Diese Grössen sind als Vektoren zu verstehen. Wie an den Einheiten zu erkennen ist, können die drei Messgrössen durch zeitliches Ableiten und Integrieren ineinander umgerechnet werden. Der Beschleunigungswandler hat sich als Messprinzip von diesen drei Prinzipien durchgesetzt. Als

mechanoelektrisches Wandler Prinzip haben sich Piezoelektrische Wandler durchgesetzt. Diese werden unter 2.3.3 ausführlicher diskutiert.

Feldmann (2018) erwähnt folgende generellen Anforderungen für jeden Schwingungswandler:

- Grosser Dynamikumfang
- Geringes Eigenrauschen
- Linearität über den gesamten Frequenzbereich
- Breiter Frequenzbereich
- Hohe Empfindlichkeit bei geringen Abmessungen und Gewicht
- Möglichst keine beweglichen inneren Teile
- Möglichst keine elektrische Hilfsenergie
- Geringe Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen

Beschleunigungsmesser wurden in vielen Arbeiten erfolgreich zur bioakustischen Erfassung von holzbevölkernden Insekten angewandt (Bhairavi et al., 2020; Mankin et al., 2011). Beschleunigungsmesser mit der nötigen Empfindlichkeit und dem nötigen Frequenzgang sind teure Geräte. Da in der vorliegenden Arbeit aber versucht wird, die finanziellen Hürden gering zu halten, wird ein anderer Ansatz verfolgt. Anstelle wie bei Beschleunigungsmessern die Kraft zu messen, die die Auslenkung der Vibration auf eine seismische Masse hat, sollen die Vibrationswellen direkt in einen Piezowandler geleitet werden. Dafür wird ein Wandler direkt mit dem Holzkörper verbunden, wie man es von Tonnehmern von elektrisch verstärkten Musikinstrumenten kennt.

2.3.3 Piezoelektrische Wandler

Piezoelektrische Werkstoffe generieren bei mechanischer Krafteinwirkung eine dielektrische Verschiebung D , die annähernd proportional zur einwirkenden Kraft T respektive der Verformung ist. Für Signale mit kleiner Amplitude ist die Annahme dieses proportionalen Verhältnisses ausreichend. Unter Berücksichtigung des piezoelektrischen Koeffizienten d , einer Materialkonstante, gilt die Annäherung (Böttger & Ruschmeyer, 1994):

$$D = dT$$

Mit der Anmerkung, dass die erzeugte Ladung dem Produkt der dielektrischen Verschiebung und der aktiven Sensorfläche entspricht, wird dieser Zusammenhang in 2.3.5 zum Vergleich von Wandlern angewandt.

Voraussetzung für den piezoelektrischen Effekt ist der unsymmetrische Kristallaufbau im Material, dessen Verformung eine Verschiebung von Ladungen zur Folge hat. Piezowandler werden an beiden Seiten, rechtwinklig zur Polarisierung, mit einer meist metallischen, leitenden Schicht versehen, um

die entstandene Ladung einzusammeln. Das piezoelektrische Material fungiert auch als Dielektrikum. Dieser Aufbau bildet einen «aktiven Kondensator», der entsprechend eine Kapazität und das ausgehende Signal eine hohe Impedanz hat.

2.3.4 Materialien für Piezowandler

Das meistverwendete Material für Piezoelektrische Sensoren ist Bleizirkonattitanat PTZ, ein keramisches Material. Wegen seiner hohen Piezokonstante liefert es hohe Ausgabeamplituden im Vergleich mit anderen Materialien. Polyvinylidenfluorid PVDF, ein Kunststoff, wird wegen seiner Elastizität, des weiten Frequenzbereiches und der niedrigen akustischen Impedanz vor allem als Sensormaterial für medizinbiologische Anwendungen geschätzt (Xin et al., 2016). PVDF Sensoren wurden aber auch schon erfolgreich eingesetzt, um Termiten akustisch zu detektieren (Yanase et al., 1998). Die geringere Schallimpedanz führt wie in 2.3.5 beschrieben zu einer geringeren Reflektion des Schalls gegenüber anderen Materialien mit ebenfalls tiefer Schallimpedanz. Die hohe Eigenresonanzfrequenz von PVDF Wandlern ist der weichen Textur des Materials und der geringen Dicke geschuldet. Diese liegt bei einem 0,028mm dicken Film bei 40MHz (Way, 2008). Die dünnen Filme haben ausschliesslich eine Eigenresonanz f_r in Richtung der Dicke t , welche bei einer Frequenz auftritt, bei der die Filmdicke einer halben Wellenlänge entspricht (Way, 2008).

$$f_r = \frac{v}{2t}$$

Dies ermöglicht es, PVDF Wandler in einem breiten Frequenzbereich einzusetzen. Zudem kann die aktive Sensorfläche grösser gewählt werden, da eine grössere Bauform, anders als bei den starren PZT Elementen, keine tiefe Eigenresonanzfrequenz zur Folge hat. Denn Wandler aus PZT können in der Dicke wie auch in radialer Richtung schwingen (Sharapov et al., 2014). Die Berechnung aller Eigenschwingungen ist sehr komplex.

Für eine qualitative Beurteilung ist festzuhalten, dass die Eigenresonanzfrequenz umgekehrt proportional zur Schallgeschwindigkeiten v und proportional zur Grösse des Körpers ist.

2.3.5 Admittanz

Die Admittanz bezeichnet den nicht reflektierten Teil der Schallenergie, welche die Grenzfläche durchtritt. Durch das Multiplizieren der Admittanz und der Piezokonstante lässt sich eine Abschätzung treffen, wie gross das Ladungssignal eines Piezowandlers bei einer festgesetzten Schallintensität pro aktiver Sensorfläche ist. Dies ist keine offizielle Grösse und dient nur dem Vergleich des Systems Grenzfläche und Effizienz des Wandlers bei verschiedenen Wandlermaterialien. Die Admittanz kann aus dem Reflektionskoeffizienten R , wie in 2.2.3 beschrieben, berechnet werden. Fichtenholz, mit

einer Dichte von $0,493 \text{ g/cm}^3$ und einer Schallgeschwindigkeit von 6209 m/s (Bucur, 2006), hat eine akustische Impedanz von 3061 Ns/m^3 .

Aus den Berechnungen in Tabelle 1 geht hervor, dass die niedrige Impedanz von PVDF die niedrigere Piezokonstante nicht kompensiert und PZT mehr Ladung pro aktiver Sensorfläche generieren wird. Der Einfluss der Messingschicht auf R des in diesem Versuch eingesetzten bimorphen Piezoelement (in 3.3.1 beschrieben), wird hier vernachlässigt. Bei bimorphen Piezoelementen hat noch weiterer Effekt einen Einfluss. Dieser bewirkt, dass ein bimorphes Piezoelement im Vergleich zu einer Keramik mit denselben Abmassen aber ohne Metallscheibe eine 10-20 mal höhere Sensitivität aufweist (Sharapov et al., 2014).

Tabelle 1: Piezoelektrische Eigenschaften von PZT und PVDF und deren Admittanz gegenüber Fichtenholz.

Quelle Schallgeschwindigkeit und Dichte von PZT und PVDF: (Kuttruff, 2004)

| Material | Akustische Impedanz | Admittanz gegenüber Fichtenholz | Piezokonstante | Grenzfläche- Wandler Effizienz |
|----------|------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| PZT | 33713 Ns/m^3 | 0,166 | 15.8 As/m^2 | 2,63 |
| PVDF | 3916 Ns/m^3 | 0,877 | $0,14 \text{ As/m}^2$ | 0,123 |

2.3.6 Signalkonditionierung

Die Signalkonditionierung wird mit einem Vorverstärker realisiert und kann als Spannungs- oder Ladungsverstärker (Impedanzwandler) umgesetzt werden. Dies sind zwei verschiedene Konzepte von analogen Schaltkreisen, bestehend aus einem Operationsverstärker, Kondensatoren und Widerständen. Das Ziel ist aber in beiden Fällen eine geringe Ausgangsimpedanz des Signals und eine Verstärkung der Signalamplitude. Des Weiteren kann das Signal gefiltert werden, um unerwünschte Störsignale auszuschliessen. Karki (2000) erwähnt vier Kriterien, nach denen die Schaltung für den Vorverstärker gewählt werden sollte:

Die Betriebsfrequenz ist vom Einsatz des zu messenden Signals abhängig. Die Rückkopplungsschleife bildet mit dem parallel geschalteten Kondensator C_{FB} und dem Widerstand R_{FB} einen Tiefpassfilter, bei dem Frequenzen über der Grenzfrequenz stark gedämpft werden. Weitere Limitierungen im Frequenzbereich ergeben sich durch die Eigenresonanzfrequenz des Wandlers, da der Wandler oberhalb der Eigenresonanzfrequenz nicht mehr linear funktioniert.

Die Signalamplitude ist auf der Inputseite von den Eigenschaften des Wandlers und der mechanischen Stärke des Messereignisses abhängig. Der Verstärkungsfaktor des Schaltkreises ist, wie auch die

Betriebsfrequenz, von der Wahl der Kapazitäten in der Rückkopplungsschleife C_{FB} abhängig und muss auf eine geeignete Signalamplitude im Ausgangssignal angepasst werden.

Als **Betriebsart** kommt eine Spannungs- oder Ladungsverstärker in Frage. Wie der Name nahelegt, kann sich am Eingang der Spannungsverstärkers eine Spannung aufbauen, die mit dem Verstärkungsfaktor (gain) verstärkt wird. Bei einem Ladungsverstärker ist der Eingang ein «virtueller Grund», also annähernd widerstandslos. Die am Wandler erzeugte Ladung erzeugt daher keine Spannung, sondern wird direkt in den Feedbackkondensator übertragen. Ladungsverstärker sind sensibler als Spannungsverstärker, aber auch anfälliger auf Störungen von elektromagnetischen Interferenzen.

Die Eingangsimpedanz ist von der Betriebsart abhängig. Wird die Spannung betrachtet, dann sorgt eine hohe Eingangsimpedanz für eine hohe Integrität des Signals. Daher sind Spannungsverstärker anfällig auf sogenannte parasitische Kapazitäten an den Signaleingängen. Wird die Ladung gemessen, dann sorgt eine geringe Eingangsimpedanz dafür, dass die erzeugte Ladung möglichst verlustfrei auf den Schaltkreis übertragen wird.

2.3.7 Anbindung vom Sensor an die Probe

Creemers (2015) hat in einem Versuch zur Detektion von Hausböcken und Gemeinen Nagekäfern mit AE eine eingeschraubten Magnethalterplatte, eine Klemmvorrichtung und eine Handmessspitze als Anbindungsmethode verglichen. Die Anzahl gemessener Hits pro Zeit mit der Magnethalterplatte wurde zu 100% angenommen. Mit der Klemmvorrichtung und der Handmessspitze konnte bei den Hausböcken 76% und 29% und bei den Gemeinen Nagekäfern 40% und 7% gemessen werden. Die Gemeinen Nagekäfer sind bedeutend kleiner und das gemessene Signal dementsprechend schwächer. Für die noch kleineren *Xyleborus saxeseni* sollte daher im Versuch dieser Arbeit eine sehr direkte Anbindung gewährleistet sein.

2.4 Aufzeichnung und Speicherung

Um akustische Signale zu analysieren und effizient zu verwalten, müssen diese in eine digitale Form gebracht werden. Die Auflösung dieses Prozesses ist im Wesentlichen durch die Abtastrate und die Bittiefe bestimmt. Die Abtastrate gibt an, wie oft pro Sekunde das analoge Signal abgetastet wird. Die Abtastrate bestimmt auch die Nyquist-Frequenz, die höchstmöglich repräsentierbare Frequenz (Shannon, 1998):

$$f_{Nyquist} = \frac{1}{2} f_{Abtast}$$

Die Bittiefe bestimmt, wie hoch aufgelöst die Amplitude angezeigt werden kann. Vom tiefsten bis zum höchsten Amplitudenwert gibt es 2^{Bittiefe} Abstufungen. Das Wave Dateiformat ist unkomprimiert und zeichnet daher jeden Abtastpunkt auf. Wegen des hohen Speicherplatzbedarfs sind aus dem Konsum-Elektronik Bereich aber eher psychoakustisch kodierte, komprimierte Formate wie mp3 bekannt. Jedes Format verfügt über Metadaten, die Informationen über die enthaltenen Dateien beinhalten (Petermichl, 2008).

2.5 Datenanalyse

Durch die Analyse von zeitdiskreten Mustern sind Rückschlüsse auf die vorliegende Käferart möglich (Brandstetter & S.Hübner, 2014). In der erwähnten Arbeit wurden für drei Käferarten verschieden Geräusche kategorisiert. Da in der vorliegenden Arbeit nur ein einziger Modellorganismus aufgenommen wird, soll mit dieser Analyse ausschliesslich gezeigt werden, ob sich mit der verwendeten Technik die Aktivität der Käfer dokumentieren lässt und nicht ob sich die Geräusche einer Spezies zuordnen lassen. Dafür wird dasselbe Vorgehen gewählt, wie bei Krajewski et al. (2020), wo die mit einem sensiblen Beschleunigungssensor erhobenen Daten zuverlässige Informationen über die Aktivität von Hausbohrern lieferte. Die Methode wird in 3.6 genauer beschrieben.

2.6 Analyse und Filterung auf dem AudiMoth

Algorithmen zur Erkennung von Spezies können, wie Prince (2019) demonstriert hat, direkt auf dem internen Prozessor des AudioMoth implementiert werden. Dadurch werden keine Wave Files gespeichert, sondern lediglich die Resultate der Analyse. Dies spart Speicherplatz und durch den Verzicht auf den energieaufwändigen Speicherprozess, Energie (Prince et al., 2019). Solche Anwendungen müssen aber direkt in die Firmware geschrieben werden und werden in dieser Arbeit vernachlässigt. Frequenzfilter und der Schwellenwert können direkt in der Konfigurations-App, wie in 3.5 beschrieben, angewandt werden.

3. Material und Methoden

3.1 Der Messaufbau

Auf der Abbildung 2 ist der gesamte Messaufbau zu sehen, der aus folgenden Komponenten besteht:

- Den Modellorganismen *Xyleborus saxeseni*, welche sich in einem Stück Fichtenholz ansiedeln sollen.
- Den Wandlern, die die Schwingungen in ein elektrisches Signal umwandelt.
- Der Signalkonditionierung, die das Signal aufbereitet.
- Dem Rekorder, der das Signal als Wave File aufzeichnet.
- Der Signalauswertung wird in der Software Audacity und dann mit der Python library Librosa (Brian McFee et al., 2021) ausgeführt.

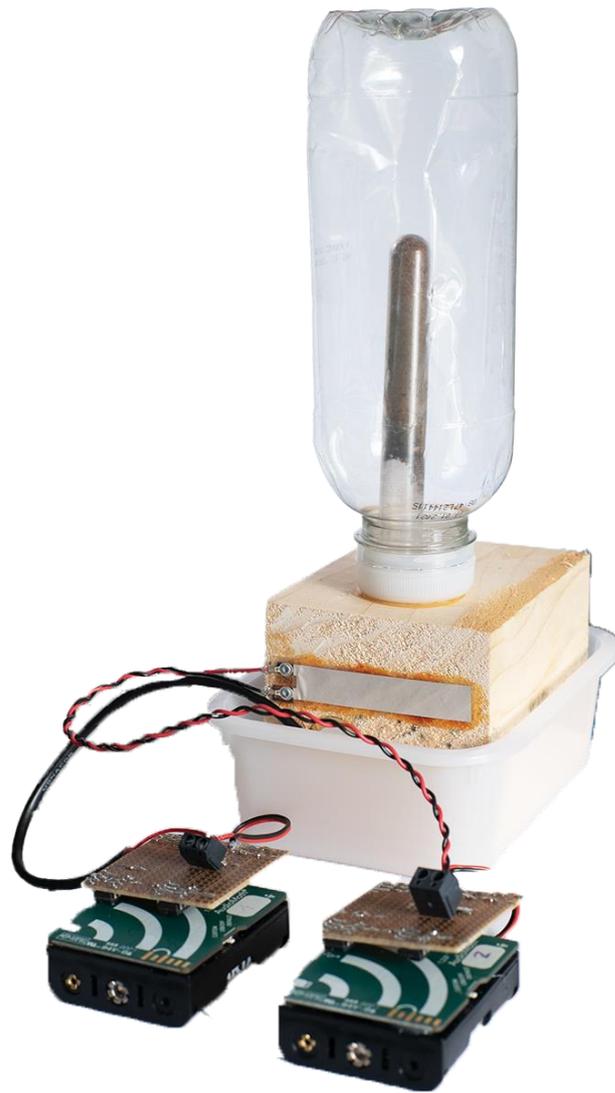


Abbildung 2: Messaufbau mit Käfern, Holz, angeklebten Wandlern und AudioMoth mit Vorverstärker

3.2 Modellorganismen

Kunststoffröhrchen mit Nestern von ca. 50 *Xyleborus saxesenii* wurden vom «Insect Fungus Lab» der Universität Freiburg zur Verfügung gestellt. Sie sollen ausschwärmen und eine neue Kolonie im präparierten Holzstück gründen. Da *Xyleborus saxesenii* polyphag sind (Grüne, 1979), eignen sich die meisten einheimischen Holzarten. Für diesen Versuch wurde der Deckel einer PET Flasche mit einem Loch in der Mitte auf ein Stück unbehandeltes Fichtenholz von 8 x 8 x 10 cm geklebt. Die Flasche, wie in Abbildung 2 befestigt, hatte also abgesehen von den Luftlöchern im Flaschenboden nur die Öffnung im Deckel als Ausgang, der durch das Holz führt. Um die Chance der Besiedlung des Holzes zu erhöhen,

wurde das Holzstück etwa bis zur Hälfte in eine 10% Ethanol Lösung eingelegt, welche auf *Xyleborus saxeseni* anziehend wirkt (Reding & Ranger, 2020).

3.3 Wandler

Um die unterschiedlichen Eigenschaften von einem Summer mit einem PZT Sensorelement und einem PVDF Film vergleichen zu können, wurde in diesem Versuch mit zwei verschiedenen Wandlern simultan gemessen. Die Sensorelemente wurden mit UHU MAX REPAIR EXTREME auf die Holzprobe geklebt.

3.3.1 Piezo Summer MZ20380BI

Piezo Summer oder asymmetrische biomorphe Piezoelemente werden meistens als kostengünstige Signalgeber eingesetzt. Der Piezo Summer MZ20380BI besteht aus einer 0,15 mm dicken Messingscheibe mit 20 mm Durchmesser und einer 0,13 mm dicken Beschichtung aus PZT von 15 mm Durchmesser. Die Messingscheibe bildet die eine Elektrode, die andere ist eine dünne metallische Schicht, welche auf der Keramik aufgebracht ist. Die Drähte können direkt auf die Messingscheibe und die Metallschicht gelötet werden. Der Piezo Summer MZ20380BI hat eine kreisrunde aktive Sensorfläche von $1,8 \text{ cm}^2$ und eine Eigenresonanz von 3,8 kHz.

3.3.2 PVDF Film DT2-028K

Das Sensorelement DT2-028K besteht aus einem 0,028 mm dicken PVDF Film, der auf beiden Seiten mit einer Elektrode aus Silber-Farbe bedruckt ist. Die aktive Sensorfläche ist ein Rechteck von 12 x 62 mm und besitzt eine Fläche von 7.44 cm^2 .

3.4 Signalkonditionierung

Da es sich bei den Geräuschemissionen der Käfer um eine tiefe Signalamplitude handelt, wird ein Ladungsverstärker zur Vorverstärkung eingesetzt. Bei dieser Betriebsart setzt die Schaltung der Signalkonditionierung dem rohen Signal des Sensors keinen Eingangswiderstand entgegen. Diese Betriebsart ermöglicht eine hochsensible Messung und ist unabhängig von der Kapazität des Sensors und des Kabels. Die Schaltung ist sensibler auf Störsignale als eine Schaltung im Spannungsmodus (Karki, 2000). Um Störsignale, welche von anderen Geräten als elektromagnetische Felder emittiert werden, auszugleichen, wurde eine Differenzialverstärker-Topografie gewählt. Weil das Ausgangssignal proportional zur Differenz der beiden Eingangskanäle ist, werden Ladungen, die durch elektromagnetische Felder verursacht werden, ausgeglichen (Bartolome, 2010). Zudem hat ein Differenzialverstärker gegenüber einer Topografie, bei der nur einen Pol des Wandlers verstärkt wird, eine doppelt so grosse Verstärkung bei gleichem C_{FB} . Die gesamte Signalkonditionierung wurde als zweistufiger Verstärker umgesetzt, um mit möglichst wenigen Bauteilen auszukommen. Der erste Verstärker wandelt das hochimpedante Signal in ein reines Spannungssignal um, der zweite Verstärker

vergrössert die Amplitude auf ein Niveau, das vom AudioMoth aufgenommen werden kann. Beim Frequenzgang, in Abbildung 4 zu sehen, wurde nicht primär auf eine Filterung von Störsignalen, sondern auf Linearität im Bereich von 2kHz bis 200kHz geachtet. Zwischen dem Frequenzgang und der Verstärkung muss ein Kompromiss eingegangen werden, da diese beide von der Grösse des Rückkopplungskondensatoren abhängig sind. Der Widerstand R_{FB} und der Kondensator C_{FB} der Rückkopplung bilden zusammen einen Hochpassfilter, dessen Grenzfrequenz f_{HPF} durch

$$f_{HPF} = \frac{1}{2\pi C_{FB} R_{FB}}$$

Gegeben ist. Ein Signal mit der Grenzfrequenz wird um 3dB weniger verstärkt als die maximale Verstärkung. Je weiter darunter, umso geringer die Verstärkung. Die Verstärkung ist umgekehrt proportional $Gain = 1/C_{FB}$ zur Grösse des Rückkopplungskondensators. Als praktischer Anhaltspunkt wurde beim Entwurf des Vorverstärkers der grösste zur Verfügung stehende Widerstand R_{FB} von 820 k Ω verwendet und C_{FB} mit 220pF dem gewünschten f_{HPF} von 2 kHz angepasst. Um die Verstärkung bei einem tiefen f_{HPF} zu vergrössern, kann nur R_{FB} vergrössert werden. Dabei kann das elektronische Rauschen aber sehr stark werden oder die Widerstände können einen ähnlichen Wert erreichen wie die Isolation zwischen den Leiterbahnen. Dies kann zu unberechenbaren Effekten im Schaltkreis führen. Für eine höhere Verstärkung ist auch eine mehrstufige Topografie zu empfehlen, da sehr hohe Verstärkung auf nur einer Verstärkungsstufe zu elektrischem Aufschwingen führen kann. Bei der Auswahl des Operationsverstärkers wurde wie von Bartolome (2010) empfohlen der OPA337 gewählt, welcher sich wegen seines hohen Eingangswiderstand eignet.

Die Steuerung in Abbildung 3 wurde im SPICE-basierten TinaTI der Firma Texas Instruments aufgebaut und simuliert.

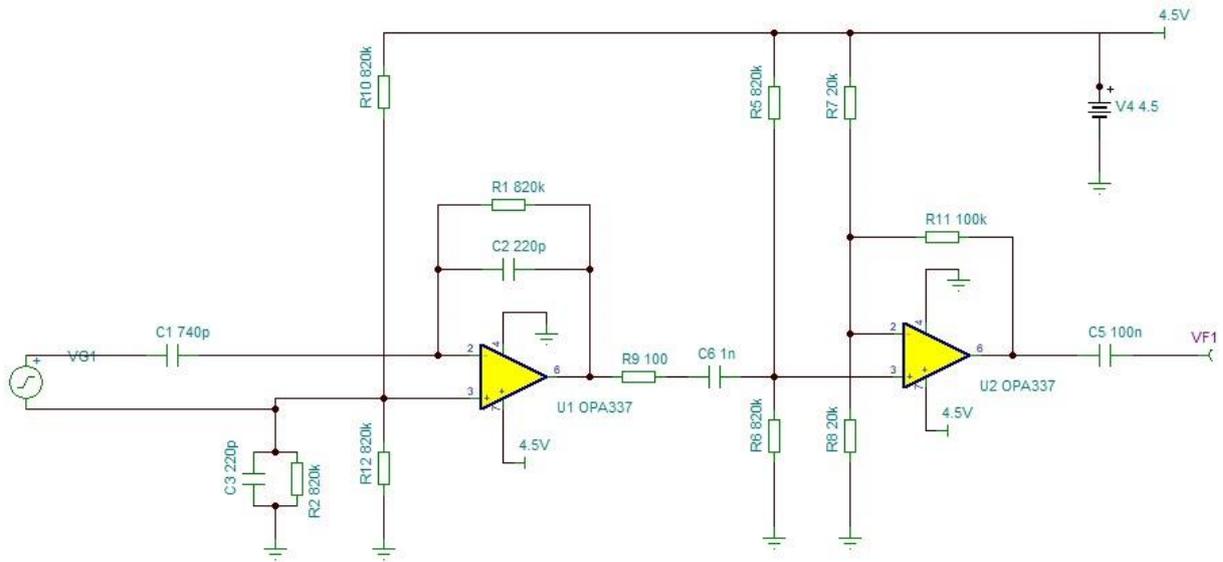


Abbildung 3: Schema des Ladungsverstärkers

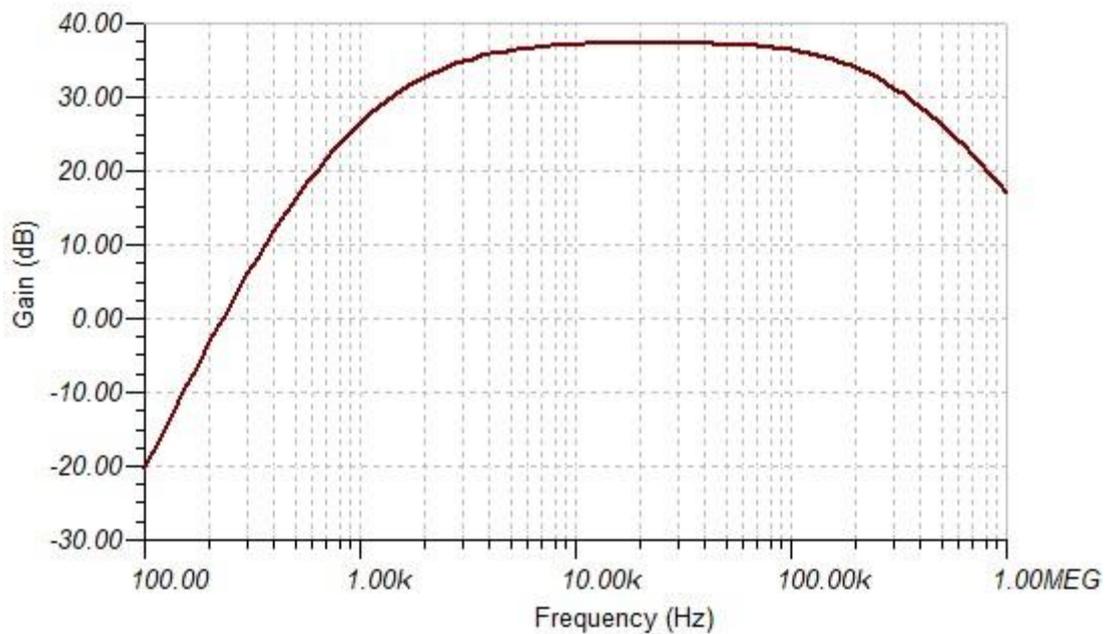


Abbildung 4: Frequenzgang des Ladungsverstärkers

Die in TinaTI simulierte Schaltung wurde zunächst auf einer Steckplatine implementiert und getestet. Die finale Schaltung wurde platzsparend auf eine zugeschnittene Laborkarte gelötet. Dafür wurden Verstärker im DIP-8 Gehäuse verwendet, die sich gut für Prototypen eignen. Für die Widerstände und Kondensatoren wurden platzsparende SMD Komponenten eingesetzt. Diese Schaltung kann, wie in Abbildung 5 zu sehen, mit einem angelöteten Klinkenstecker mit der AudioMoth verbunden werden. Da keine elektromagnetischen Interferenzen festzustellen waren, wurde auf eine Abschirmung verzichtet. Der PVDF Film wurde schon mit einem verdrehten Kabel geliefert. Dieses soll helfen,

elektromagnetische Störsignale gleichmässig auf beide Phasen zu verteilen und sie auszugleichen, sodass sie nicht zu Rauschen führen (Tanck, 2007).

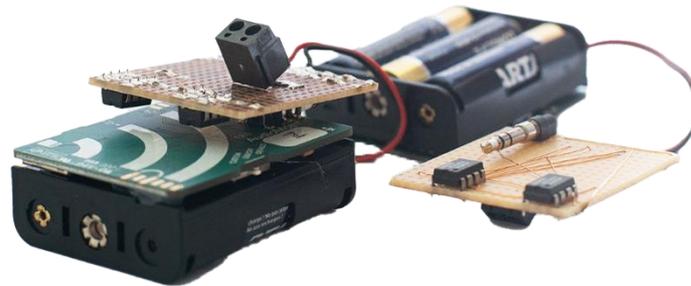


Abbildung 5: Audiomoth mit Vorverstärker

3.4.1 Testaufbau für Wandler und Signalverarbeitung

Um einfach und schnell ein Gefühl für die Charakteristik der Schaltung zu bekommen, wurde mit beiden Wandler Typen in einen Testaufbau eingebaut. Wie in Abbildung 6 zu sehen, ist ein Piezo Summer MZ20380BI und ein PVDF Film DT1-52K auf ein 4 cm breites, rechtwinklig zur Faser geschnittenes Stück Holz geklebt worden. Der PVDF Film DT1-52K ist baugleich wie der in 3.3.2 beschriebene DT2-028K, wobei der PVDF Film jedoch 0.052mm dick und die aktive Sensorfläche mit 12x30 mm nur knapp halb so gross ist. Das Holz wurde durch Darüberstreichen mit dem Finger angeregt, um die Reaktion der Schaltung zu beobachten. Um einen besseren Eindruck des Signals zu erhalten, wurde das Signal erst mit einem Oszilloskop betrachtet. Mit dem Oszilloskop können auch kleine Signale wahrgenommen werden und direkt dargestellt werden, die der AudioMoth nicht aufzeichnen kann. In einem zweiten Schritt wurde das Signal mit dem AudioMoth aufgenommen und die entstandenen Wave Files in Audacity betrachtet und mit digitalen Frequenzfiltern manipuliert. Derselbe Aufbau wurde verwendet, um den in 193.4.2 beschriebenen pencil lead Test durchzuführen. Auf eine quantitative Beurteilung des Systems wurde gänzlich verzichtet.

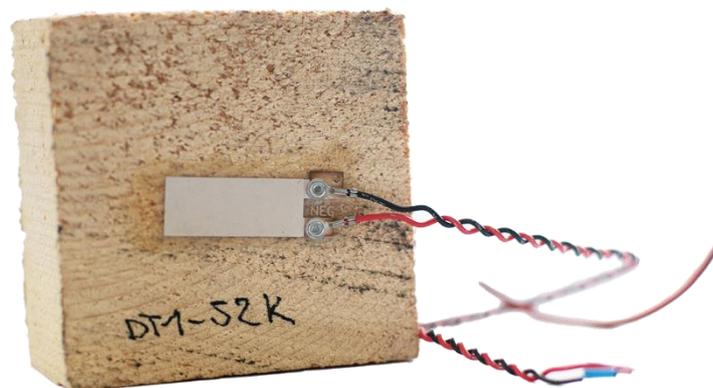


Abbildung 6: Testaufbau für Test und Entwicklung des Ladungsverstärkers

3.4.2 Pencil lead test

Um einen Vergleich zwischen den beiden AudioMoth mit der beschriebenen Signalkonditionierung und den beiden Wandler Typen zu machen, wurde der «pencil lead test» angewandt. Dieser ist ein einfaches und oft angewandtes Verfahren, um AE zu simulieren (Sause, 2011). Dabei wird, wie auf Abbildung 7 zu sehen, die Mine eines Druckminenbleistifts auf die Oberfläche des Testkörpers gedrückt, bis diese abbricht. Durch die plötzliche Entladung beim Bruch der Mine wird der Testkörper angeregt. Diese Anregung wird als konstant angenommen, um verschiedene Effekte und Messgeräte vergleichen zu können. In diesem Versuch wurde eine 0.7mm Bleistiftmine verwendet, welche vor jedem Abbrechen 4-mal geklickt und dann, von Auge geschätzt, 30° zur Oberfläche des Holzes gebrochen wurde. Dies wurde für jeden AudioMoth mit je beiden Wandlern insgesamt vier Mal wiederholt.

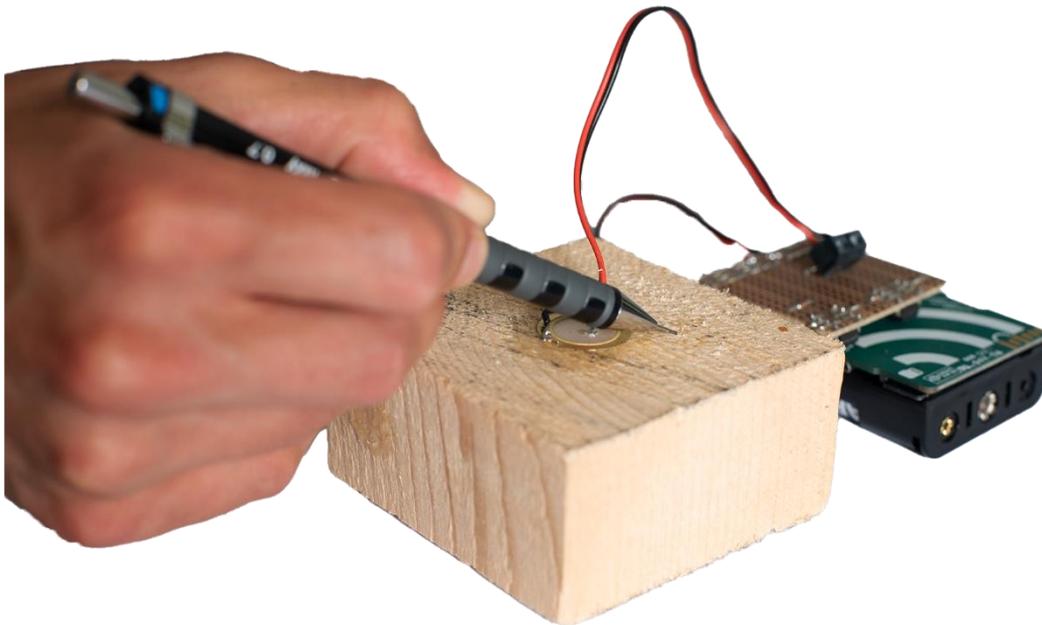


Abbildung 7: Pencil lead Test

3.5 Signalverarbeitung und Speicherung

AudioMoth ist eine open source Plattform, mit der unkomprimierte Wave Files aufgenommen werden können. Sie verfügt über einen internen Mikroprozessor, auf dem die Firmware läuft. Diese ermöglicht es digitale Hoch-, Tief und Bandpassfilter anzuwenden und selektiv nur Aufnahmen zu speichern, bei denen ein festgelegter Schwellenwert der Amplitude überschritten wird. Über die Konfigurations-App

kann ein Zeitschema für die Aufnahmen erstellt werden. Das Eingangssignal wird zuerst analog um 20dB verstärkt. Eine weitere Verstärkung kann über die Konfigurations-App auf fünf Stufen eingestellt werden. Die Abtastrate kann ebenfalls mit acht Abstufungen von 8 – 384 kHz eingestellt werden. Der AudioMoth verfügt über eine Schnittstelle für ein externes Mikrofon, die in diesem Versuchsaufbau verwendet wurde. In diesem Versuch wurden die höchste Verstärkungsstufe und eine Abtastrate von 192 kHz verwendet. Für eine Vorfilterung wurde ein Hochpassfilter bei 1kHz verwendet. Alle sechs Stunden wurde eine Aufnahme von 10 Minuten erstellt.

3.6 Signalanalyse

Die Signalanalyse geschieht in der Software Audacity oder der Python Library Librosa. Weil im Experiment keine verwendbaren Daten erzeugt wurden, wird die automatisierte Auswertung im Ausblick 5.2.1 diskutiert.

3.6.1 Audacity

Audacity ist eine Open Source Software, die für eine Vielzahl von Audio Anwendungen benutzt werden kann. Zeitdiskrete Darstellungen wie auch Spektrogramme können darin einfach und intuitiv dargestellt werden. Audacity verfügt auch über integrierte Analyse- und Filtertools. Audacity wird in vielen Bioakustischen Studien für eine erste Exploration der Daten verwendet. Automatisierte Analysen werden meist in dafür vorgesehen Software oder mit einer geeigneten Library in R oder Python gemacht.

3.6.2 Librosa

Librosa ist eine Library in Python, die viele gängige Prozesse für Analyse von Musik und Audio beinhaltet. In dieser Arbeit wurden lediglich die Funktionen «Load» und «Display» benutzt. Damit können verschiedene Audioformate eingelesen und werden als Numpy Array ausgegeben. In «Display» sind Zeitdiskrete Darstellungen und Spektrogramme mit verschiedenen Skalierungen der Amplitude verfügbar.

4. Ergebnisse

Weil aus den Daten der Messung keine Ergebnisse generiert werden konnten, werden hier nur die Resultate aus dem pencil lead test diskutiert. Die im Experiment verwendeten Modellorganismen



Abbildung 8: Tote Käfer auf dem Flaschen Deckel

haben sich einige Millimeter in das Holz vorgearbeitet. Nach einigen Tagen lagen allerdings viele der Käfer tot auf dem Flaschendeckel. Auf der Abbildung 8 ist zu sehen, dass die toten Käfer Flügel bekommen haben. Die Lebensweise der Käfer wurde nicht genauer studiert und somit kann nichts weiter über das Misslingen des Experimentes gesagt werden.

Ergebnisse aus dem pencil lead test

Die folgenden Grafiken zeigen das zeitdiskrete Signal des pencil lead test für beide AudioMoth und beide Wandler Typen. Jede Messung wird einmal in ganzer Länge mit vier Bursts und einmal mit einem Ausschnitt von 0.3 s eines einzelnen Bursts dargestellt. Das Signal in Abbildung 13 wurde mit Audacity bei 3 kHz Hochpassgefiltert. Abbildung 14 zeigt das Ergebnis vom pencil lead test vom AudioMoth 1 mit Film als Spektrogramm.

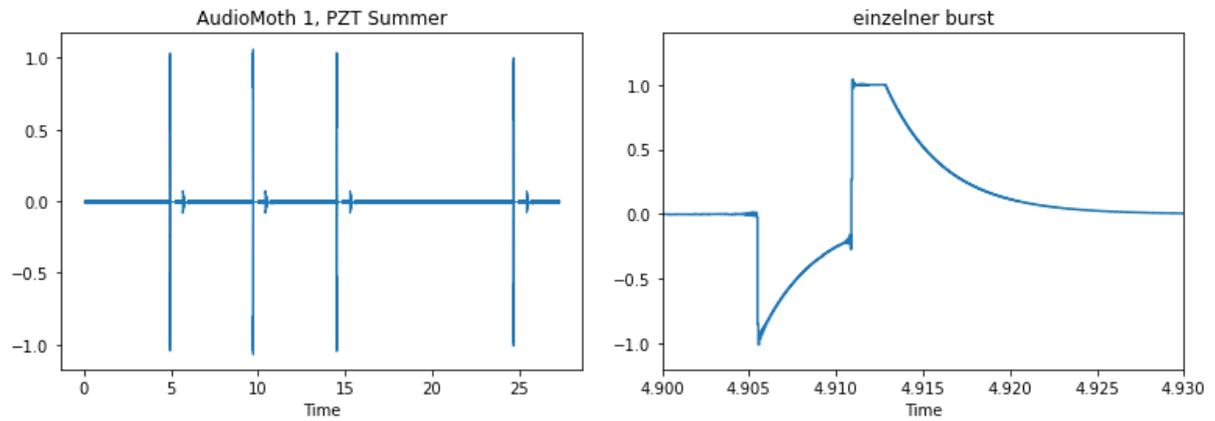


Abbildung 9: Ergebnis pencil lead test bei AudioMoth 1 mit PZT Summer

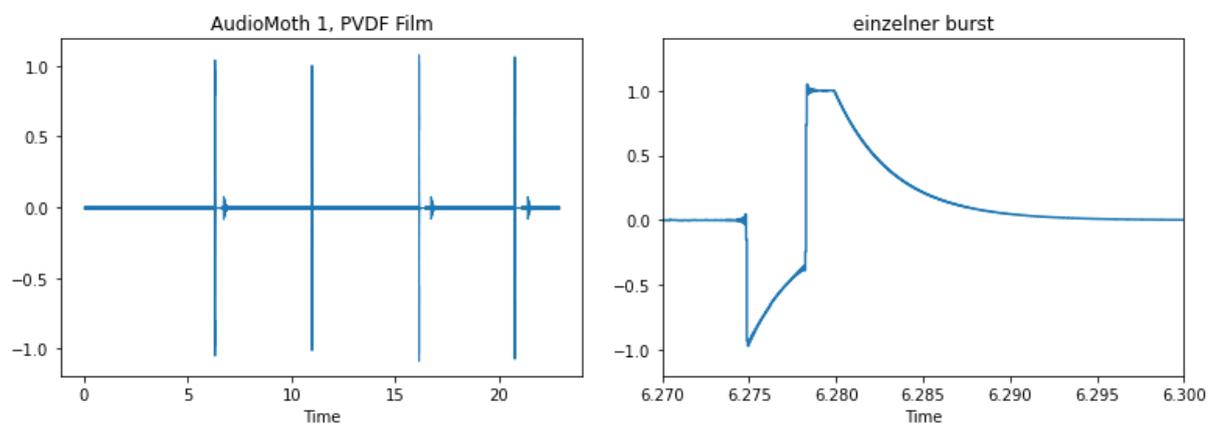


Abbildung 10: Ergebnis pencil lead test bei AudioMoth 1 mit PVDF Film

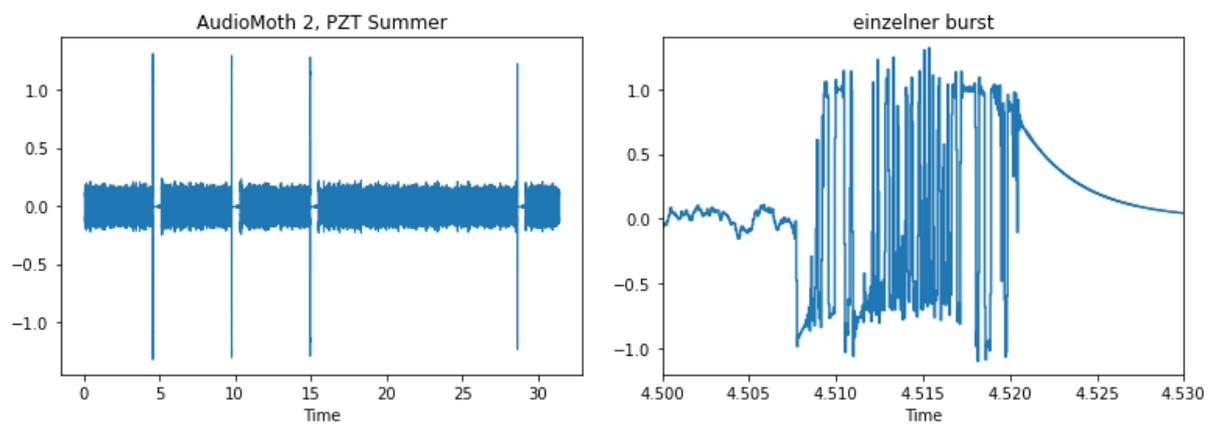


Abbildung 11: Ergebnis pencil lead test bei AudioMoth 2 mit PZT Summer

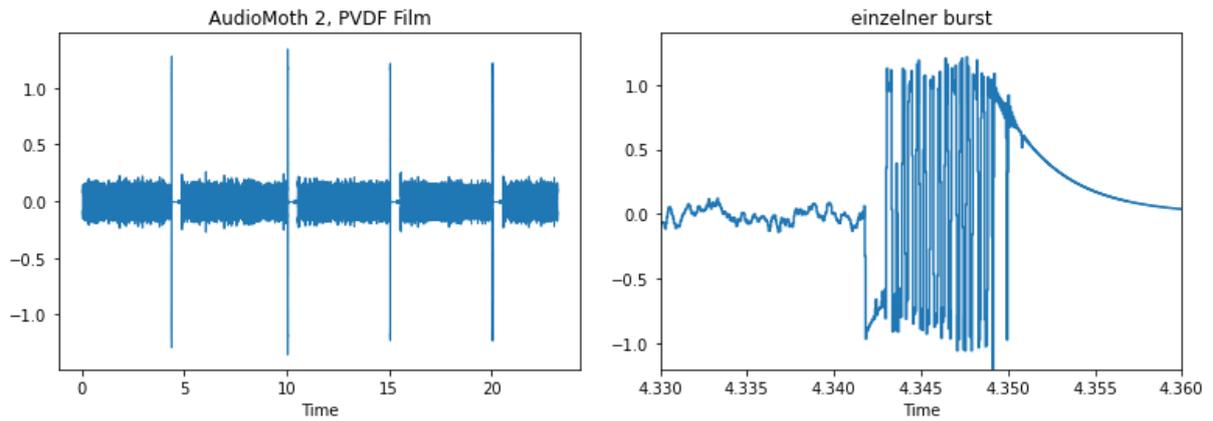


Abbildung 12: Ergebnis pencil lead test bei AudioMoth 2 mit PVDF Film

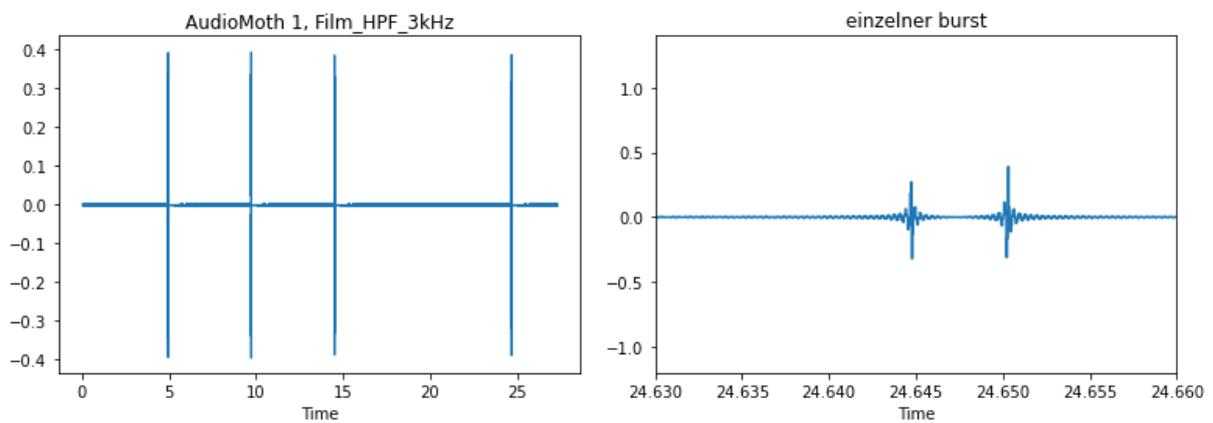


Abbildung 13: Selbes Signal wie in Abbildung 5, Hochpass gefiltert bei 3 kHz

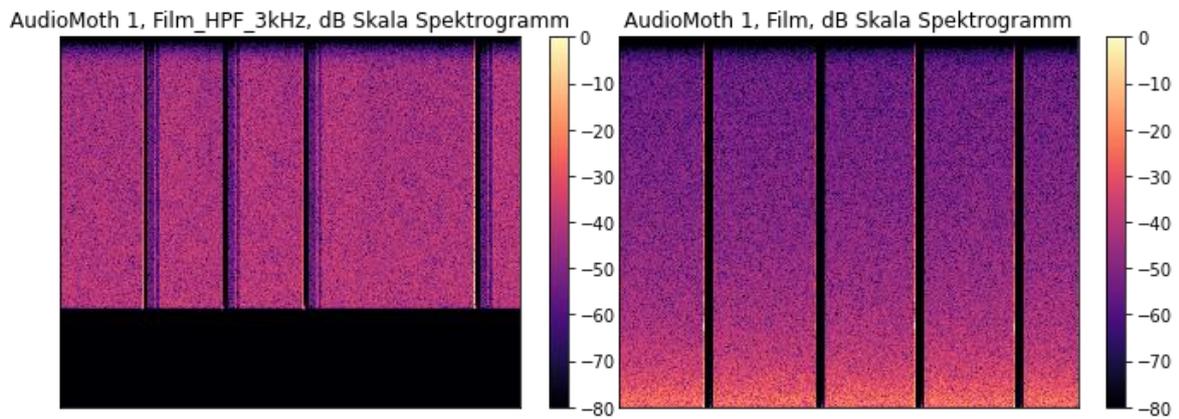


Abbildung 14: Ergebnis aus pencil lead test von AudioMoth 1, Film, 3kHz Hochpass gefiltert und original als Spektrogramm mit dB Skala dargestellt

5. Diskussion

Da beim Experiment keine auswertbaren Daten generiert wurden, werden hier nur die in den Ergebnissen gezeigten Daten vom pencil lead test diskutiert. In einem weiteren Abschnitt wird eine Methode diskutiert, mit der die Daten weiter hätten verarbeitet werden können. Zum Schluss nehme ich mir die Freiheit, meine persönlichen Learning und Eindrücke festzuhalten.

5.1 Pencil lead test

Beide Wandler lösen beim pencil lead test eine Auslenkung bis zur maximalen Amplitude aus. Starke Unterschiede gibt es allerdings zwischen dem AudioMoth 1 und 2. Es fällt auf, dass der AudioMoth 1 zwischen den Impulsen nicht ein zu erwartendes Signal zeigt. Der AudioMoth 2 hat ein kontinuierliches Rauschen. Dieser Effekt kann mit den vorhandenen Möglichkeiten nicht erklärt werden, da es sich um eine Eigenart des Rekorders und nicht des Sensors oder des Ladungsverstärkers handelt. Dies wurde überprüft, indem alle Komponenten einzeln ausgetauscht wurden, ohne dass sich dieses Rauschen von einem AudioMoth auf einen anderen übertragen hatte.

In den kurzen Darstellungen der einzelnen Bursts ist eine Auslenkung der Amplitude zu sehen, die einem Sinus nicht ähnelt. Ich nehme an, dass der Grund dafür eine zu hohe Signalamplitude war und sich ein kleinerer Impuls oder auch ein grösseres Stück Holz besser geeignet hätte, um die sensible Elektronik zu testen. In Abbildung 13 ist zu sehen, dass die Wellenform den Darstellungen aus der Literatur ähnlicher ist, wenn die Komponenten unter 3 kHz entfernt wurden.

5.2 Aussicht

Im folgenden Abschnitt wird erläutert, wie eine bewährte Auswertungsmethode in Librosa umgesetzt werden könnte. Im Weiteren erlaube ich mir, einen persönlichen Eindruck der Arbeit am Experiment und einige persönliche Eindrücke zu äussern.

5.2.1 Automatisierte Auswertung

In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, wie eine Signalanalyse nach dem Vorbild von Bilski et al. (2018) in Librosa umgesetzt werden könnte. Das Ergebnis dieser Analyse ist ein Vergleichswert für die Aktivität der Insekten in der analysierten Periode. Diese bildet sich aus der Summe der Energie in Ereignissen, die als von den Käfern stammend klassifiziert wurden. Das Vorgehen lässt sich in drei Schritte unterteilen.

Zum **Erkennen möglicher interessanter Zeitpunkte** wird die Energie in einem schmalen Fensterausschnitt berechnet, welches sich schrittweise vorwärtsbewegt. Die Ausgabe dieses Prozesses ist wiederum eine Datenreihe der Energie entlang einer Zeitachse. Die Peaks in dieser Energie-Darstellung werden als interessante Punkte markiert. Dies kann mit der Funktion

«librosa.onset.onset_detect» in Librosa gemacht werden. Der Ausgabewert ist dann ein Array mit den detektierten Zeitpunkten. Um den Anfang eines Ereignisses zu bestimmen, kann auch die Funktion «librosa.onset.onset_backtrack» verwendet werden. Dabei ist der Ausgabewert ein Array der Zeitpunkte des letzten lokalen Minimums vor dem entsprechenden Peak in der Energie-Darstellung. Dies könnte ein geeigneter Startpunkt für ein Fenster sein, in dem die Parameter für die Klassifizierung erhoben werden.

Die Ereignisse werden **klassifiziert**, um sie entweder der Kategorie «Insekten Geräusche» oder «alles andere» einzuteilen. Für diese Klassifizierung wird bei (Bilski et al., 2018) eine Genauigkeit von 90% angenommen. Dafür wird ein ANN trainiert, was eine Sammlung an Musterdaten voraussetzt. In den im ersten Schritt definierten Fenstern werden folgende Parameter verglichen:

- **Die Energie**, die im gesamten Frame enthalten ist, kann mit «librosa.feature.rms» berechnet werden.
- **Die maximale und minimale Auslenkung**, daraus der peak to peak Wert und die Dauer zwischen der maximalen und minimalen Auslenkung, können mit Standard Funktionen von Python berechnet werden.
- **Die Dauer des Ereignisses** kann als Differenz des Zeitpunktes des dem Ereignis vorhergehenden Minima und dem Zeitpunkt des nächstfolgenden Minima berechnet werden.

Als letztes wird durch **Summieren der enthaltenen Energie** in den als Insekten Geräusche klassifizierten Ereignissen ein Wert für die Aktivität der Käfer für jede Messperiode ausgegeben.

5.3 Reflektion

Ich möchte in dieser Reflektion der Leser:in einen Überblick über die Teile meiner Arbeit geben, die nicht in den Methoden ersichtlich sind. Zum einen sind dies gescheiterte Versuche, daraus resultierende Planänderungen und meine Motivation. Zudem möchte ich an dieser Stelle meine persönlichen und fachlichen Learnings beschreiben.

5.3.1 Motivation und Weg zur schlussendlichen Umsetzung der Arbeit

Der Dokumentarfilm über die Arbeit von Marcus Maeder auf SRF hat mich begeistert und mein Interesse an der Bioakustik geweckt. Marcus Maeder ist der Schöpfer der Ausstellung Sounding Soil, die die Geräusche der Bodenlebewesen hörbar und so erlebbar für sein Publikum macht. Die Fülle an Daten über dieses verborgene Ökosystem und die Möglichkeiten für populärwissenschaftliche und künstlerische Arbeiten faszinierte mich. Ich schrieb eine Semesterarbeit zum Thema der akustischen Kommunikation unter Käfern, ein Semester später begann ich diese Bachelorarbeit. Erst sollte es dabei um Laufkäfer gehen, weil diese wichtige Indikatoren zur Bewertung des Zustandes eines Ökosystems sind. Dies wäre technisch einfacher gewesen, da viele Laufkäferarten Stridulationslaute von sich geben

und daher auf ein grosses Angebot an Mikrofonen zurückgegriffen hätte werden können. Gezielt jene Laufkäferarten auszulesen, bei denen Stridulation bekannt ist und diese daraufhin zu finden und zu sammeln war aber nicht möglich, weil ich nicht viel über diese Artenreiche Gruppe weiss und viele von Ihnen geschützt sind. Zudem weckte die Problematik mit eingeschleppten Schadinsekten wie dem Asiatischen Laubholzbockkäfer ALB mein Interesse und ich wechselte das Thema auf holzschädigende Insekten. Es war mir aber nicht möglich mit ALB zu arbeiten, da diese in der Schweiz nur das WSL unter strengen Schutzmassnahmen halten darf. Als ungefährlichen Versuchsorganismus habe ich daher auf kleine Holzbohrer zurückgegriffen. Die Forschungsgruppe um Peter Biedermann arbeitet mit diesen Käfern und bot mir an, mir welche zuzusenden. Die geringe Grösse der kleinen Holzbohrer im Vergleich zu Insekten, die in vergleichbaren Arbeiten untersucht wurden, hätte mir schon im Vorfeld ein Hinweis auf die Schwierigkeiten dieses Versuches sein können.

Es war mir von Anfang an ein Bedürfnis, möglichst zugängliche Technik zu verwenden. Der AudioMoth, dessen Gerber Files, elektronischen Schemata und Firmware als Open Source lizenziertes Projekt öffentlich einsehbar sind und dessen Preis vergleichsweise günstig ist, erfüllte diesen Anspruch. Zudem verfügt die zweite Version über eine Schnittstelle für ein externes Mikrofon. Der AudioMoth kann so auch mit einem Körperschallmikrofon benutzt werden. Ein solches musste aber erst gebaut werden. Als technisch interessierter Mensch nahm ich mir dieser Herausforderung gerne an und vertiefte mich in die Thematiken von Körperschall, Wandler und Elektronik. Danach folgte eine Zeit von Versuchen in TinaTI und auf der Steckplatine mit verschiedenen Schaltkreisen und Kenngrössen der verschiedenen Komponenten für die Vorverstärkung der Wandler. Dieser Schritt der Arbeit war am Zeitintensivsten, da vieles ausprobiert wurde und oft für einzelne Versuche ein neues Bauteil besorgt werden musste.

Die Käfer kamen in Kunststoffröhrchen, die mit Substrat gefüllt waren, in dem sie eingekistet waren. Bei der ersten Zustellung waren die Käfer noch in der Diapause. Eigentlich sollten sie so versendet werden und dann durch wärmere Temperaturen wieder aktiv werden. Das ist aber nicht geschehen. Bei der zweiten Zustellung waren die Käfer bereits aktiv und haben innerhalb der ersten Tage begonnen sich in das Holz zu bohren. Nach etwa einer Woche haben viele der Käfer Flügel gebildet und sind verendet. Ich habe das Holz nicht geöffnet, um nachzusehen. Es scheint aber so, als hätten sich die Käfer nicht weiter als 10mm in das Holz vorgearbeitet. Diese zeigte mir, dass es nicht zielführend ist, einen Teil des Experimentes weitgehend unbeachtet zu lassen, wenn nicht auf die Erfahrung andere zurückgegriffen werden kann.

Ich will zum Ende noch ein persönliches Fazit und einen Ausblick meiner persönlichen Einschätzung und meinem persönlichen Empfinden geben. Obwohl Bioakustik bereits seit langer Zeit Gegenstand der Forschung ist, ist es ein Fachbereich, der stark in Bewegung ist. Das zeigen die vielen Publikationen in verschiedensten Anwendungen in jüngerer Zeit. Vermutlich ist dieser Trend teilweise einer

wechselwirkenden Beschleunigung der Entwicklung von technologischen Hilfsmitteln und den wissenschaftlichen Methoden geschuldet. Damit gemeint ist die Miniaturisierung, das Aufkommen energieeffizienter Geräte, höhere Kosteneffizienz für Rechnerleistung und Speicherkapazität und Verbreitung von Software und Datenbanken zur Verwaltung und Analyse der erzeugten Daten. Diese Möglichkeiten beschleunigen sicherlich die Entwicklung von Methoden und Einsatzmöglichkeiten. Der Trend zu Open Source Tools in der Forschung verbessert weiter die Zugänglichkeit zu neuen Methoden und fügt sich in diesen Trend ein.

Weiter bieten die Möglichkeiten der Bioakustik Hilfsmittel auf drängende Fragen unserer Zeit. Da Zivilisation und Wildnis immer dichter zusammenrücken und ineinander verzahnen, ist ein genaueres Verständnis über das Verhalten der wilden Tiere eine unabdingliche Grundlage für einen nachhaltigen Ausbau technischer Einrichtungen. Erfolgreiche Beispiele sind bioakustische Studien über die Lärmemissionen von Schiffen und das Verhalten von Meeressäugern oder Studien über das Verhalten von Fledermäusen, die Grundlagen für die verträgliche Gestaltung von Windparks oder der Schifffahrt liefern. Auch wird die Verbreitung von ortsfremden Organismen, wie dem asiatischen Laubholzbockkäfer oder Agrarschädlingen durch Klimaveränderungen und den intensivierten globalen Handel begünstigt. Hier kann die Bioakustik helfen, Bedrohungen und Verhaltensmuster neuer Schädlinge früh zu erkennen.

Als kleinen Exkurs möchte ich die künstlerischen Möglichkeiten erwähnen, die Bioakustik im Kontext eines neuen kulturellen Verständnisses des Mensch-Umwelt Begriffes zu verstehen. Dazu muss die Wurzel unseres westlichen Verständnisses vom Menschen und der Umwelt in einer Tradition gesehen werden, die sich in zwei Phasen abgespielt hat. Erst war die Natur, in einer mystischen und christlich geprägten Weltanschauung, eine Entität mit eigenem Willen. Sie war Gottes Gnade und sein Zorn, aber stets unnahbar. Durch die technische und naturwissenschaftliche Revolution wurde sie entmystifiziert. Unser Verständnis der Natur wurde zu einem rein technischen Ablauf, den man manipulieren und sich zu Nutze machen kann. So wurde die wilde Natur zwar romantisiert, aber strikt als dualistischen Gegensatz zu menschlicher Aktivität gesehen. Ich persönlich sehe den heutigen Trend und eine zeitgemässe Vorstellung der Natur dahingehend, dass diese beiden Pole von ihrer puristischen Forderung zurücktreten und zu einem Gemeinsamen verschmelzen. Umweltprobleme und der verbreitete Identitätsverlust in den hochmodernen Gesellschaften sind Grund genug, um der Weltanschauung der absolut quantifizierbaren und vom Menschen isolierten Natur zu entsagen. Es wird aber dem modernen Menschen auch nicht gerecht, der Natur in esoterischer Weise eine Wesensart zuzuschreiben, mit der wir uns durch schamanische Bräuche oder ähnliches in Verbindung setzen können. Ich plädiere für ein Weltbild, in dem wir der Beurteilung unseres Umgangs mit der Natur einen Platz für unser ästhetisches Urteilsvermögen einräumen. Naturwissenschaftliche Erkenntnisse sollen anerkannt, nicht aber ausgeschlossen werden, was nicht den Status

naturwissenschaftlicher Erkenntnis hat. Menschen verfügen über hochkomplexes Sprechen und Hören. Ich denke, dass die Bioakustik neben interessanten wissenschaftlichen Zusammenhängen auch interessante ästhetische Erfahrungen bereithält.

5.3.2 Persönliche Learnings

Auch wenn das Projekt nicht die erhofften Resultate hervorgebracht hat, war es für mich ein lehrreiches Projekt. Zum einen konnte ich mir neues Wissen über Elektronik und Bioakustik aneignen. Zum anderen konnte ich methodisch Erfahrungen im Umgang mit mir neuen Themen und Projekten, von denen ich keine genaue Vorstellung des Endresultates habe, sammeln.

Rückblickend würde ich mir mehr Zeit nehmen, um eine gute Fragestellung zu finden. In dieser Arbeit habe ich eine präzise Aufgabenstellung formuliert, ohne mich mit dem Thema genügend auseinandergesetzt zu haben. Dadurch musste ich während der Planung des Versuchs meine Fragestellung anpassen. Ich würde die Formulierung der Fragestellung in einer zukünftigen vergleichbaren Arbeit sogar parallel zur Literaturrecherche und dem Prototyping machen, um diese immer wieder dem neu Gelernten anpassen zu können. Gerade Prototyping ist ein Prozess, der die Kreativität anregt und hilft die betreffende Literatur einschätzen zu können. Die Definition der Fragestellung und die Arbeit an der Umsetzung in zwei aufeinanderfolgende Schritte zu trennen scheint mir in einem Projekt, dessen Methoden noch erarbeitet werden müssen, als zu starr. In diesem Prozess hätte es wahrscheinlich auch geholfen, wenn ich mich mit einem Projektpartner austauschen hätte können. Denn ich tendiere dazu, mich in Detailfragen zu verlaufen, anstatt die Gesamtheit der Problemstellung zu betrachten und die relevanten und vom jetzigen Standpunkt aus umsetzbaren Schritte zu erkennen.

Weiter würde ich im Umgang mit technischen Hilfsmitteln, die ich während der Arbeit erlernen will, anders umzugehen versuchen. Ich würde beim nächsten Mal früher und mit weniger theoretischem Wissen anfangen, mit Simulationen und Hardware zu experimentieren. Dadurch habe ich schnell ein intuitiveres Verständnis der Schaltungen bekommen und die Entwicklung wurde übersichtlicher für mich. Dafür würde ich in einem weiteren Versuch auch Designs verwenden, die ich noch nicht verstehe, anstelle erst die Theorie zu erarbeiten. Umgekehrt wurde auch die Theorie mit zunehmendem intuitivem Verständnis und Erfahrung einfacher nachzuvollziehen. Die Theorie kann so abstrakt scheinen, wenn man sie ohne Erfahrung und Intuition verstehen will. Ich ziehe hier eine Analogie zur Mechanik. Versucht man jemandem, der noch nie ein Getriebe gesehen und erlebt hat, die Zusammenhänge von Kraft und Geschwindigkeit zu erklären, dann wäre es für diese Person um einiges abstrakter als für eine Person, die routiniert Fahrrad fährt. In Sachbüchern, die die Theorie in ihrer allgemeinsten Form abbilden, ist der Lernprozess mühsam und anstrengend.

In der deutschen Sprache sind die Ausdrücke Handwerks- und Ingenieurskunst geläufig. Dies entspricht auch meiner Vorstellung, dass ein simples Bastelprojekt wie auch ein Raumfahrtprojekt nicht ein Abarbeiten trivialer Prozesse ist und somit nicht ohne die Intuition erfahrener Ingenieur:innen und Handwerker:innen zum Erfolg gebracht werden kann.

6. Literaturverzeichnis

- Banga, K. S., Kotwaliwale, N., Mohapatra, D., & Giri, S. K. (2018). Techniques for insect detection in stored food grains: An overview. *Food Control*, 94, 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.07.008>
- Bartolome, E. (2010). Signal conditioning for piezoelectric sensors. *Op Amps*, 10.
- Becker, M., Berger, B., König, S., Taddei, A., Hoppe, B., & Plinke, B. (2020). Innovative Diagnosemethoden zum Nachweis holzerstörender Insekten. *Journal für Kulturpflanzen*, 453-465 Seiten. <https://doi.org/10.5073/JFK.2020.09.01>
- Bedoya, C. L., Hofstetter, R. W., Nelson, X. J., Hayes, M., Miller, D. R., & Brockerhoff, E. G. (2019). Sound production in bark and ambrosia beetles. *Bioacoustics*, 0(0), 1–16. <https://doi.org/10.1080/09524622.2019.1686424>
- Bhairavi, K. S., Bhattacharyya, B., Manpoong, N. S., Das, P. P. G., & Devi, E. B. (2020). Recent advances in exploration of acoustic pest management: A review. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 6.
- Bilski, P., Kraiewski, A., Witomski, P., Bobinski, P., & Lewandowski, M. (2018). Acoustic Data Analysis for the Assessment of Wood Boring Insects' Activity. *2018 Joint Conference - Acoustics*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ACOUSTICS.2018.8502418>
- Böttger, U., & Ruschmeyer, K. (1994). Piezoelektrische Keramiken. In *Keramik* (S. 395–436). Springer.
- Brandstetter, M. & S.Hübner. (2014). Bioakustik zum Aufspüren von holzbrütenden Schadinsekten (Bioacoustics for Detection of Wood-boring Insect Pests). *FS-Aktuell*, 60/61, 31–36.
- Brian McFee, Alexandros Metsai, Matt McVicar, Stefan Balke, Carl Thomé, Colin Raffel, Frank Zalkow, Ayoub Malek, Dana, Kyungyun Lee, Oriol Nieto, Dan Ellis, Jack Mason, Eric Battenberg, Scott Seyfarth, Ryuichi Yamamoto, viktorandreevichmorozov, Keunwoo Choi, Josh Moore, ... Thassilo. (2021). *librosa/librosa: 0.8.1rc2*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4792298>
- Browning, E., Gibb, R., Glover-Kapfer, P., & Jones, K. E. (2017). *Passive acoustic monitoring in ecology and conservation*. 75.

- Bucur, V. (2006). *Acoustics of wood* (2nd ed). Springer.
- Chagas, A. M. (2018). Haves and have nots must find a better way: The case for open scientific hardware. *PLOS Biology*, *16*(9), e3000014. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000014>
- Claridge, M. (2006). Insect sounds and communication—an introduction. *Insect sounds and communication: physiology, behavior, ecology and evolution*. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, 3–9.
- Cocroft, R. B., Gogala, M., Hill, P. S. M., & Wessel, A. (2014). Fostering Research Progress in a Rapidly Growing Field. In R. B. Cocroft, M. Gogala, P. S. M. Hill, & A. Wessel (Hrsg.), *Studying Vibrational Communication* (S. 3–12). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-43607-3_1
- Creemers, J. G. M. (2015). *Use of Acoustic Emission (AE) to Detect Activity of Common European Dry-Woodboring Insects: Practical Considerations*. 8.
- Cremer, L., & Heckl, M. (2013). *Körperschall: Physikalische Grundlagen und Technische Anwendungen*. Springer-Verlag.
- E.B.Priyanka, & S.Thangavel. (2018). Advanced Enhancement Model of Bionics Fish Cilia MEMS Vector Hydrophone-Systematic Analysis Review. *International Journal of Applied Physics*, *03*. <https://www.ias.org/ias/home/caijap/advanced-enhancement-model-of-bionics-fish-cilia-mems-vector-hydrophone-systematic-analysis-review>
- Feldmann, J. (2018). Körperschall-Messtechnik. In M. Möser (Hrsg.), *Körperschall-Messtechnik* (S. 1–48). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56621-3_1
- Fiorillo, A. S., Pullano, S. A., & Critello, C. D. (2020). Spiral-Shaped Biologically-Inspired Ultrasonic Sensor. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, *67*(3), 635–642. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2019.2948817>
- Gibb, R., Browning, E., Glover-Kapfer, P., & Jones, K. E. (2019). Emerging opportunities and challenges for passive acoustics in ecological assessment and monitoring. *Methods in Ecology and Evolution*, *10*(2), 169–185. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13101>

- Gibson, G., Warren, B., & Russell, I. J. (2010). Humming in Tune: Sex and Species Recognition by Mosquitoes on the Wing. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 11(4), 527–540. <https://doi.org/10.1007/s10162-010-0243-2>
- Grüne, S. (1979). *Handbuch zur Bestimmung der europäischen Borkenkäfer =: Brief illustrated key to European bark beetles*. Schaper.
- Hill, A. P., Prince, P., Snaddon, J. L., Doncaster, C. P., & Rogers, A. (2019). AudioMoth: A low-cost acoustic device for monitoring biodiversity and the environment. *HardwareX*, 6, e00073. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00073>
- Karki, J. (2000). *Signal Conditioning Piezoelectric Sensors*. 6.
- Krajewski, A., Bilski, P., Witomski, P., Bobiński, P., & Guz, J. (2020). The progress in the research of AE detection method of old house borer larvae (*Hylotrupes bajulus* L.) in wooden structures. *Construction and Building Materials*, 256, 119387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119387>
- Kuttruff, H. (2004). Ultraschall. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Taschenbuch der Technischen Akustik* (S. 751–765). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18893-0_22
- Landis, E. N. (2008). Acoustic Emissions in Wood. In C. Grosse & M. Ohtsu (Hrsg.), *Acoustic Emission Testing* (S. 311–322). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69972-9_12
- Mankin, R. W. (2011). Recent Developments in the use of Acoustic Sensors and Signal Processing Tools to Target Early Infestations of Red Palm Weevil in Agricultural Environments ¹. *Florida Entomologist*, 94(4), 761–765. <https://doi.org/10.1653/024.094.0405>
- Mankin, R. W., Hagstrum, D. W., Smith, M. T., Roda, A. L., & Kairo, M. T. K. (2011). Perspective and Promise: A Century of Insect Acoustic Detection and Monitoring. *American Entomologist*, 57(1), 30–44. <https://doi.org/10.1093/ae/57.1.30>
- McCloughlin, M. P., Stewart, R., & McElligott, A. G. (2019). Automated bioacoustics: Methods in ecology and conservation and their potential for animal welfare monitoring. *Journal of The Royal Society Interface*, 16(155), 20190225. <https://doi.org/10.1098/rsif.2019.0225>

- Müller, G., & Möser, M. (2004). Grundlagen. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Taschenbuch der Technischen Akustik* (S. 1–24). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18893-0_1
- Naguib, M., & Krause, E. T. (2020). Technische Hilfsmittel. In M. Naguib & E. T. Krause (Hrsg.), *Methoden der Verhaltensbiologie* (S. 73–80). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-60415-1_6
- Ohtsu, M. (2008). History and Fundamentals. In C. Grosse & M. Ohtsu (Hrsg.), *Acoustic Emission Testing: Basics for Research—Applications in Civil Engineering* (S. 11–18). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69972-9_2
- Pearce, J. M. (2020). Economic savings for scientific free and open source technology: A review. *HardwareX*, 8, e00139. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00139>
- Petermichl, K. (2008). Dateiformate für Audio. In S. Weinzierl (Hrsg.), *Handbuch der Audiotechnik* (S. 687–718). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34301-1_12
- Prince, P. (2019). *Using software-based acoustic detection and supporting tools to enable large-scale environmental monitoring*. 169.
- Prince, P., Hill, A., Piña Covarrubias, E., Doncaster, P., Snaddon, J. L., & Rogers, A. (2019). Deploying Acoustic Detection Algorithms on Low-Cost, Open-Source Acoustic Sensors for Environmental Monitoring. *Sensors*, 19(3), 553. <https://doi.org/10.3390/s19030553>
- Reding, M. E., & Ranger, C. M. (2020). Attraction of Invasive Ambrosia Beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) to Ethanol-Treated Tree Bolts. *Journal of Economic Entomology*, 113(1), 321–329. <https://doi.org/10.1093/jee/toz282>
- Rochester, E. (2020). *Mountain Pine Beetle Detection using IoT*. <https://prism.ucalgary.ca/handle/1880/111445>
- Sause, M. G. (2011). *Investigation of pencil-lead breaks as acoustic emission sources*.
- Shannon, C. E. (1998). Communication in the Presence of Noise. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 86(2), 11.
- Sharapov, V., Sotula, Z., & Kunickaya, L. (2014). *Piezo-Electric Electro-Acoustic Transducers*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01198-1>
- Tanck, H. (2007). Grundlagen der Vernetzung. In *Medizintechnik* (S. 719–731). Springer.
- Way, L. (2008). *Piezo Film Sensors Technical Manual*. 62.

- Xin, Y., Sun, H., Tian, H., Guo, C., Li, X., Wang, S., & Wang, C. (2016). The use of polyvinylidene fluoride (PVDF) films as sensors for vibration measurement: A brief review. *Ferroelectrics*, *502*(1), 28–42. <https://doi.org/10.1080/00150193.2016.1232582>
- Yanase, T., Fujii, Y., Okumura, S., Imamura, Y., & Yoshimura, Y. (1998). Detection of AE generated by the feeding activity of termites using PVDF (polyvinylidene fluoride) film. *Forest products journal*, *48*(7/8), 43.
- Yang, H., Yu, L., & Wang, L. (2015). Effect of moisture content on the ultrasonic acoustic properties of wood. *Journal of Forestry Research*, *26*(3), 753–757. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0079-z>

7. Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Charakterisierung eines AE Ereignisses. Quelle: Ohtsu (2008) | 5 |
| Abbildung 2: Messaufbau mit Käfern, Holz, angeklebten Wandlern und AudioMoth mit Vorverstärker | 13 |
| Abbildung 3: Schema des Ladungsverstärkers | 16 |
| Abbildung 4: Frequenzgang des Ladungsverstärkers | 16 |
| Abbildung 5: Audiomoth mit Vorverstärker | 17 |
| Abbildung 6: Testaufbau für Test und Entwicklung des Ladungsverstärkers | 18 |
| Abbildung 7: Pencil lead Test | 19 |
| Abbildung 8: Tote Käfer auf dem Flaschen Deckel..... | 21 |
| Abbildung 9: Ergebnis pencil lead test bei AudioMoth 1 mit PZT Summer | 22 |
| Abbildung 10: Ergebnis pencil lead test bei AudioMoth 1 mit PVDF Film | 22 |
| Abbildung 11:Ergebnis pencil lead test bei AudioMoth 2 mit PZT Summer | 22 |
| Abbildung 12: Ergebnis pencil lead test bei AudioMoth 2 mit PVDF Film | 23 |
| Abbildung 13: Selbes Signal wie in Abbildung 5, Hochpass gefiltert bei 3 kHz | 23 |
| Abbildung 14: Ergebnis aus pencil lead test von AudioMoth 1, Film, 3kHz Hochpass gefiltert und original als Spektrogramm mit dB Skala dargestellt..... | 23 |

Erklärung betreffend das selbständige Verfassen einer Bachelorarbeit im Departement Life Sciences und Facility Management

Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

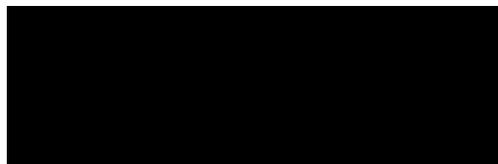
Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle verwendeten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt ausgewiesen sind, d.h. dass die Bachelorarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten Paragraph 39 und Paragraph 40 der Rahmenprüfungsordnung für die Bachelor- und Masterstudiengänge an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften vom 29. Januar 2008 sowie die Bestimmungen der Disziplinarmaßnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

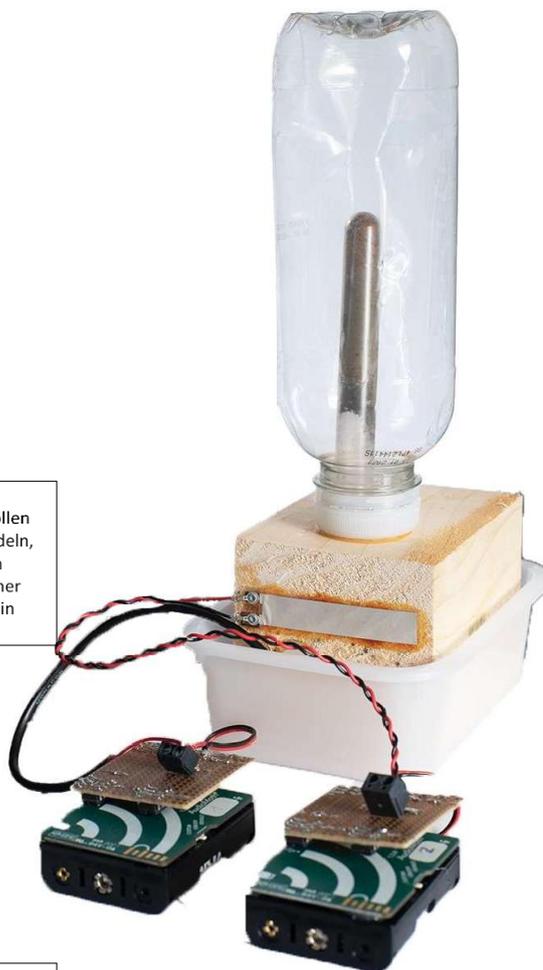
Unterschrift:

Zürich, 30.06.2021



Das Original dieses Formulars ist bei der ZHAW-Version aller abgegebenen Bachelorarbeiten im Anhang mit Original-Unterschriften und -Datum (keine Kopie) einzufügen.

EIN OPEN SOURCE ANSATZ ZUR AKUSTISCHEN DETEKTION HOLZBEWOHNENDER INSEKTEN



Testkörper

Die Modellorganismen *Xyleborus saxeseni* sollen sich in dem Testkörper aus Fichtenholz ansiedeln, in dem die Körperschallemissionen gemessen werden sollen. Um die Wahrscheinlichkeit einer Besiedlung zu erhöhen, wurde das Holzstück in eine 10% Ethanol Lösung eingelegt.

Modellorganismen

Kleine Holzbohrer *Xyleborus saxeseni* bauen in ihren Nestern im Holz Pilze an, um ihren Nachwuchs mit Nährstoffen zu versorgen. In diesem Experiment stehen sie stellvertretend für Holzbewohnende Insekten, die untersucht werden sollen.

Wandler

In dem Versuch wurden zwei verschiedene Wandler Typen eingesetzt, die beide auf dem piezoelektrischen Effekt basieren. Der Piezosumierer mit PZT als piezoelektrischem Material ist günstig und hat eine hohe Piezokonstante, die eine hohe Signalamplitude des Ausgangssignals zur Folge hat. Der PVDF Film hat den Vorteil, dass er eine niedrige Schallimpedanz hat, was zu weniger Reflektion an der Materialgrenze führt. Zudem kann die Sensorfläche grösser gewählt werden, da diese nicht die Eigenresonanz des Wandlers beeinflusst. Die Piezokonstante von PVDF ist aber um ein Vielfaches niedriger als die von PZT.

AudioMoth

Der AudioMoth ist ein Open Source Audio Rekorder, der unkomprimierte Wave Dateien aufnehmen und auf eine micro SD Karte speichern kann. In diesem Versuch wurde die Schnittstelle für ein externes Mikrofon verwendet.

Vorverstärker

Das Signal der Piezo Wandler muss in ein reines Spannungssignal umgewandelt und verstärkt werden. Die geschieht mittels eines Ladungsverstärkers. Der Entwurf des Ladungsverstärkers bildet das Kernstück dieser Arbeit. Er wurde in TinaTI entworfen und auf einer Laborkarte implementiert. Der Operationsverstärker OPA337 wurde als Differenzial- Ladungsverstärker beschaltet.

