

DeViSe – Automatische Detektion, Lokalisation und Tracking von Vögeln und lautgebenden Tierarten mittels intelligenter akustischer Sensorik

AZ: 34737/01-33/2

Abschlussbericht

Karl-Heinz Frommolt, Mario Lasseck

Museum für Naturkunde - Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung, 10115 Berlin

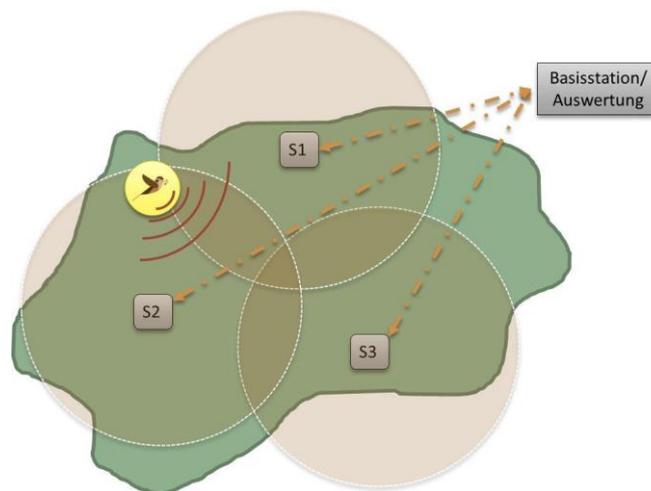
Moritz Brandes, Christian Rollwage, Danilo Hollosi, Menno Müller

Fraunhofer Institut für Digitale Medientechnologie IDMT, 26129 Oldenburg

Tim Steinkamp

Arbeitsgruppe für regionale Struktur- und Umweltforschung GmbH – ARSU, 26121 Oldenburg

Laufzeit: 1.02.2020 bis 30.06.2024



Inhalt

Projektkennblatt	7
1 Zusammenfassung.....	9
2 Einführung/Motivation.....	10
3 Methodik/Vorgehensweise/Projektablauf.....	12
3.1 Anwendungsbezogene Optimierung des akustischen Sensorsystems DeViSe.....	12
Inertialsensorik.....	14
3.2 Methodik der Softwareentwicklung.....	17
Arterkennung.....	17
Lokalisation.....	19
Richtungsschätzung.....	20
Kreuzpeilung.....	21
3.3 Durchführung akustischer Freilandtests.....	21
Untersuchungen an der Waldschnepfe.....	22
Präsenz-/Absenz-Nachweise.....	22
Lokalisation mit einem Mikrofon-Array.....	23
Untersuchungen am Wachtelkönig.....	25
Kartierung des Wachtelkönigs.....	26
Kontinuierliche Erfassung.....	27
Aufzeichnungen mit DeViSe-Sensoren in unterschiedlicher räumlicher Anordnung.....	29
Lokalisation einzelner Tiere mit linearen Mikrofonarray.....	30
Bestimmung des Schalldruckpegels.....	31
Untersuchungen an Heuschrecken.....	32
4 Projektergebnisse.....	33
4.1 Weiterentwicklung des Sensorsystems DeVise.....	33
4.2 Inertialsensorik im DeViSe System.....	33
4.3 Entwicklung Mustererkennung und Lokalisationsalgorithmen.....	33
Arterkennung.....	33
Lokalisation.....	35
Kombination von Arterkennung und Lokalisation.....	38
4.4 Freilandtests.....	41
Waldschnepfe.....	41
Präsenz-/Absenz-Kartierungen.....	41
Anwendung des Mustererkennungs-Algorithmus in reellen Monitoring-Szenarien.....	41
Test zur Bestimmung der Erfassungsreichweite.....	43
Lokalisation mittels Mikrofonarray.....	44
Wachtelkönig.....	45

	Kartierungen	45
	Kontinuierliche Aufzeichnungen	45
	Bestimmung des Schalldruckpegels	50
	Lokalisation	51
5	Öffentlichkeitsarbeit.....	54
6	Fazit	55
6.1	Arterkennung	56
6.2	Erfassungsdauer	56
6.3	Lokalisation	57
6.4	Datentransfer	58
6.5	Anwenderfreundlichkeit	58
6.6	Kosten	59
6.7	Übersicht der Systemeigenschaften	61
7	Ausblick.....	62
8	Literatur	63

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: DESIGNENTWURF UND UMSETZUNG DES NEUEN DEVISE-SENSORS	13
ABBILDUNG 2: ANSICHT DER FERTIGEN SYSTEME	14
ABBILDUNG 3: STECKBRETT MIT SECHS LAGESENSOREN. ALLE SENSOREN SIND ÜBER I2C PROTOKOLL MIT DEM RASPBERRY PI (MITTIG IM BILD) VERBUNDEN. RECHTS: SEITENANSICHT DES AUFBAUS.....	15
ABBILDUNG 4: ZEITSIGNALE DER IMUS	16
ABBILDUNG 5: SPEKTROGRAMM EINER TYPISCHEN WALDSCHNEPFENSEQUENZ, BEGINNEND MIT 5 "QUORRENDEN" LAUTEN (NIEDERFREQUENTE ANTEILE) UND EINEM STARK MODULIERTEN UND HOCHFREQUENTEM "PUITZEN"). SPEKTROGRAMM ERSTELLT MIT SASLABPRO (C) R. SPECHT	17
ABBILDUNG 6: SPEKTROGRAMM EINES AUSSCHNITTES EINER RUFREIHE DES WACHTELKÖNIGS. SPEKTROGRAMM ERSTELLT MIT SASLABPRO (C) R. SPECHT.....	17
ABBILDUNG 7: SCHEMA DER KREUZPEILUNG.....	21
ABBILDUNG 8: WALDSCHNEPFEN UNTERSUCHUNGSGEBIET "GELLENER TORFMÖÖRTE" UND VERTEILUNG DER BEOBACHTUNGSPUNKTE	23
ABBILDUNG 9: BEISPIELHAFTER AUFBAU DER TEST ZUR LOKALISATION VON WALDSCHNEPFENRUFEN (DATUM 16.06.2022)	24
ABBILDUNG 10: WACHTELKÖNIGHABITAT IM UNTEREN ODERTAL	25
ABBILDUNG 11: WILDLIFE ACOUSTICS SM4 RECORDER (LINKS) UND STANDORTE DER RECORDER IM POLDER B DES UNTEREN ODERTALS. DIE STANDORTWAHL ERLAUBTE EINE FLÄCHIGE ABDECKUNG EINES REPRÄSENTATIVEN TEILES DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES	27
ABBILDUNG 12: ZEITSHEMA DER AUFZEICHNUNGEN MIT DEN WILDLIFE ACOUSTICS SM4 RECORDERN IM JAHRE 2021. AUSFÄLLE WAREN TECHNISCH BEDINGT. RECORDER 4 MUSSTE WEGEN BEWIRTSCHAFTUNG DER FLÄCHE VORZEITIG ABGEBAUT WERDEN	28
ABBILDUNG 13: ZEITSHEMA DER AUFZEICHNUNGEN MIT DEN WILDLIFE ACOUSTICS SM4 RECORDERN IM JAHRE 2022	28
ABBILDUNG 14: KONTINUIERLICHE AUFZEICHNUNGEN DEVISE-SENSOREN IM JAHRE 2023. AUFGEZEICHNET WURDEN NUR IN DEN NACHTSTUNDEN.....	29
ABBILDUNG 15: DAUERAUFZEICHNUNG MIT DEVISE-SENSOR. DER AUF STATIV IN 1,80 M HÖHE BEFINDLICHE SENSOR WURDE MIT EINEM PFAHL GESICHERT. DIE ENERGIEVERSORGUNG ERFOLGTE ÜBER EINE EXTERNE AUTOBATTERIE.....	29
ABBILDUNG 16: VERSUCHSAUFBAU ZUR BESTIMMUNG DER REICHWEITE EINES DEVISE-SENSORS IM UNTEREN ODERTAL. MITTELS EINES LINEAR ANGEORDNETEN MIKROFON-ARRAYS ERFOLGTE DIE ORTUNG EINES WACHTELKÖNIGS MIT PARALLELER AUFZEICHNUNG DES SCHALLDRUCKPEGELS. DIE ROTEN PFEILE KENNZEICHNEN DIE POSITIONEN DER MIKROFONE DES LINIENARRAYS.....	31
ABBILDUNG 17: ERMITTLUNG DES RUFORTES DES WACHTELKÖNIGS MIT HILFE EINES ARRAYS AUS DREI MIKROFONEN IN LINEARER ANORDNUNG. A) LAUFZEITUNTERSCHIEDE EINTREFFENDER RUFEN ZWISCHEN DEN DREI AUDIOKANÄLEN, ERMITTELT MIT SASLAB PRO. B) BESTIMMUNG DES AUFENTHALTSORTES MITTELS HYPERBELBERECHNUNG. M1, M2, M3 – POSITIONEN DER MIKROFONE.....	31
ABBILDUNG 18: PRECISION-RECALL KURVEN FÜR DIE KLASSIFIKATOREN BIRDID-EUROPE254, BIRDNET-V2.2 UND SELD-NET UNTER VERWENDUNG ALLER TESTDATEN	34
ABBILDUNG 19: PRECISION-RECALL KURVEN FÜR DIE KLASSIFIKATOREN - EINFACHES TESTSET	34
ABBILDUNG 20: PRECISION-RECALL KURVEN FÜR DIE KLASSIFIKATOREN - SCHWIERIGES TESTSET	34
ABBILDUNG 21: TESTMESSUNG MIT EINEM LAUTSPRECHER ZUR BEWERTUNG DER LOKALISATIONSGENAUIGKEIT. DER SENSOR WURDE AUF ÜBLICHER HÖHE ANGEBRACHT, WIE BEI DEN AKUSTISCHEN FREILANDTESTS. ÜBER DEN LAUTSPRECHER WURDEN WACHTELKÖNIGAUFNAHMEN ABGESPIELT UND MIT HILFE DES SENSORS AUFGENOMMEN. FÜR DIE AUSRICHTUNG DES SENSORS WURDE EIN STATIV MIT DREHTELLER VERWENDET (VGL. ABB. 24). DER ABSTAND ZWISCHEN LAUTSPRECHER UND SENSOR BETRUG 10M	36
ABBILDUNG 22: DEVISE-SENSOR MIT STATIV BEI DER LAUTSPRECHERMESSUNG. IM UNTEREN TEIL IST DER DREHTELLER ZU SEHEN, MIT DEM DIE AUSRICHTUNG DES SENSORS EINGESTELLT WERDEN KANN.	37
ABBILDUNG 23: ERGEBNISSE DES LOKALISATIONSTESTS MIT EINEM LAUTSPRECHER. DIE OBERE TEILGRAFIK ZEIGT DIE GESCHÄTZTE RICHTUNG ALS FUNKTION DER ECHTEN RICHTUNG. IN DER UNTEREN TEILGRAFIK IST DIE ABWEICHUNG DER GESCHÄTZTEN RICHTUNG VON DER ECHTEN RICHTUNG DARGESTELLT.	38
ABBILDUNG 24: PROZESSDIAGRAMM DES DEVISE SENSORS	40

ABBILDUNG 25: WÄHREND DER PRÄSENZ-/ABSENZ-KARTIERUNGEN ERFASSTE WALDSCHNEPFENBALZFLÜGE (DARSTELLUNGSGRUNDLAGE: DOP LGLN).....	41
ABBILDUNG 26: AKTOGRAMM VON WALDSCHNEPFEN-BALZRUFEN UNTER ANWENDUNG DES BIRDID-ALGORITHMUS.	42
ABBILDUNG 27: BEISPIELHAFTE AUSSCHNITTSVERGRÖßERUNG EINER WALDSCHNEPFEN-RUFSEQUENZ (GELLENER TORFMÖÖRTE, 09.06.2021)	42
ABBILDUNG 28: VON UNTERSCHIEDLICHEN DEVISE-SYSTEMEN ERFASSTE BALZFLÜGE (DARSTELLUNGSGRUNDLAGE: DOP LGLN).....	44
ABBILDUNG 29: GESCHÄTZTE MINIMALE ENTFERNUNG DER WALDSCHNEPFENBALZFLÜGE ZUM NÄCHSTGELEGENEN DEVISE-SENSOR.....	44
ABBILDUNG 30: SIMULTANE AUFZEICHNUNG EINES EXAKT VERORTETEN RUFES MIT MEHREREN DEVISE-SENSOREN. DAS ROTE DREIECK SYMBOLISIERT DEN ORT, AN DEM DER RUF ABGEGEBEN WURDE. A – SPEKTROGRAMM DER AUFZEICHNUNG DES MIKROFONARRAYS. B – AUFZEICHNUNG SENSOR D09. C – SENSOR D07. D – SENSOR D01. DIE ROTEN PFEILE KENNZEICHNEN DEN VERORTETEN RUF IM SPEKTROGRAMM.	45
ABBILDUNG 31: POSITIONEN DER SM4 RECORDER IM SÜDLICHEN TEIL DES POLDER B IM UNTEREN ODERTAL IM JAHRE 2021 (KARTE ERSTELLT MIT QGIS 3.34 UNTER NUTZUNG DES OPEN STREET LAYERS).....	46
ABBILDUNG 32: AKTOGRAMME DER RUFAKTIVITÄT DES WACHTELKÖNIGS IM MAI 2021 AN FÜNF STANDORTEN AUF DER GRUNDLAGE VON AUFZEICHNUNGEN MIT SM4-RECORDERN. DIE VERTIKALEN BALKENSTRUKTUREN ZEIGEN ANHALTENDE RUFREIHEN. DER GRAUE BALKEN INDIZIERT, OB IM JEWEILIGEN ZEITRAUM AUFGEZEICHNET WURDE.....	47
ABBILDUNG 33: DETAILLIERTES AKTOGRAMME DER RUFAKTIVITÄT DES WACHTELKÖNIGS AN EINEM STANDORT AUF DER GRUNDLAGE VON AUFZEICHNUNGEN MIT SM4-RECORDERN IM JAHRE 2021 (RECORDER 01, KANAL 1). DER GRAUE BEREICH INDIZIERT, OB IM JEWEILIGEN ZEITRAUM AUFGEZEICHNET WURDE. VOM 1. BIS 5. JUNI WAR DAS AUFZEICHNUNGSGERÄT AUSGEFALLEN.	48
ABBILDUNG 34: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER ANORDNUNG DER DEVISE-SENSOREN IM POLDER A DES NATIONALPARKS UNTERES ODERTAL IM JAHRE 2023.	49
ABBILDUNG 35: ERGEBNIS DER KLASSIFIKATION MIT BIRDID DARGESTELLT IN RAVEN PRO (DEVISE03, 19.06.2023 23:02 UHR).....	49
ABBILDUNG 36: AKTOGRAMM DER RUFAKTIVITÄT DES WACHTELKÖNIGS AUFGEZEICHET MIT SENSOR03 AUF BASIS DER ANALYSE MIT BIRDID. DARGESTELLT SIND ERKENNUNGEN MIT EINEM SCORE >0,5, >0,75 UND >0,9).	49
ABBILDUNG 37: AKTOGRAMM DER RUFAKTIVITÄT DES WACHTELKÖNIGS AUFGEZEICHET MIT SENSOR04 AUF BASIS DER ANALYSE MIT BIRDID. DARGESTELLT SIND ERKENNUNGEN MIT EINEM SCORE >0,5, >0,75 UND >0,9). BEI DIESEM SENSOR TRATEN LÄNGERE AUSFÄLLE AUF.	50
ABBILDUNG 38: AKTOGRAMM DER RUFAKTIVITÄT DES WACHTELKÖNIGS AUFGEZEICHET MIT SENSOR05 AUF BASIS DER ANALYSE MIT BIRDID. DARGESTELLT SIND ERKENNUNGEN MIT EINEM SCORE >0,5, >0,75 UND >0,9).	50
ABBILDUNG 39: DREI BEISPIELE FÜR TRIANGULATION RUFENDER WACHTELKÖNIGE MITTELS EINES DEVISE-SENSORS, MIT DEM VON VERSCHIEDENEN ORTEN AUS AUFGENOMMEN WURDE. UNTERSCHIEDLICHE FARBEN BEZEICHNEN UNTERSCHIEDLICHE TRIANGULATIONEN.....	51
ABBILDUNG 40: POLARPLOTS DER IN EINER NACHT (25./26.06.2023) BESTIMMTEN RICHTUNGEN. DIE AUFLÖSUNG BETRÄGT 1°. DIE LÄNGE DER LINIEN ENTSpricht DER HÄUFIGKEIT DER BERECHNETEN RICHTUNGEN. GESTRICHELTE LINIEN KENNZEICHNEN DIE HAUPTRICHTUNGEN (WINKEL MIT GRÖßTER HÄUFIGKEIT).....	52
ABBILDUNG 41: SUMMARISCHE DARSTELLUNG DER POLARPLOTS DER BESTIMMTEN RICHTUNGEN FÜR 2023	53

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: ÜBERSICHT ÜBER ERFOLGREICH AUFGEBAUTE SENSOREN	15
TABELLE 2: STANDARDFEHLER DER AUSRICHTUNGSSCHÄTZUNG FÜR DIE VIER VERWENDETEN IMUS.....	16
TABELLE 3: ÜBERSICHT ÜBER FREILANDARBEIT IM NATIONALPARK UNTERES ODERTAL	26
TABELLE 4: ÜBERSICHT UND STATISTIK FÜR DEN FÜR DIE VALIDIERUNG GENUTZTEN DATENSATZ. ALLE AUFNAHMEN WURDEN 2021 MIT DEN DEVISE-SENSOREN ERSTELLT	35
TABELLE 5: AUSZUG DER ERGEBNISSE DER MUSTERERKENNUNG, AUF DEM SENSOR ALS JSON-FILE GESPEICHERT. EINMINÜTIGE AUFNAHMEN WURDEN IN 12 INTERVALLE JE 5 SEKUNDEN UNTERTEILT. IM ERGEBNIS WIRD FÜR JEDES INTERVALL EIN WAHRSCHEINLICHKEITSWERT FÜR RUFEN DES WACHTELKÖNIGS ERMITTELT. IST DER WERT GRÖßER 0,5 ERFOLGT EINE RICHTUNGSSCHÄTZUNG (TABELLE 6).	39
TABELLE 6: AUSZUG DER ERGEBNISSE DER RICHTUNGSSCHÄTZUNG, AUF DEM SENSOR ALS TXT-FILE GESPEICHERT. ROT HINTERLEGT SIND ZEITINTERVALLE, IN DENEN KEIN WACHTELKÖNIGRUF DETEKTIERT WURDE, ORANGE INTERVALLE OHNE GÜLTIGES ERGEBNIS FÜR DIE RICHTUNGSBESTIMMUNG.....	39
TABELLE 7: VERIFIZIERUNG DER GÜTE DER MUSTERERKENNUNG. ALS SCHWELLENWERT WURDE EINHEITLICH EINE PROBABILITY VON 0.5 GESETZT	43
TABELLE 8: ÜBERSICHT DES ERFÜLLUNGSGRADS VERSCHIEDENER SYSTEMEIGENSCHAFTEN DES SENSORSYSTEMS	61

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	34737	Referat	33	Fördersumme	301.912 €
----	--------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel DeViSe – Automatische Detektion, Lokalisation und Tracking von Vögeln und lautgebenden Tierarten mittels intelligenter akustischer Sensorik

Stichworte Monitoring, Bioakustik, KI, automatische Erfassungsmethoden

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
4 ½ Jahre	1.02.2020	30.06.2024	

Zwischenberichte 2

Bewilligungsempfänger	Museum für Naturkunde Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung Invalidenstr. 43 10115 Berlin	Tel 030/889140-8640 Fax 030/889140-8559
		Projektleitung Dr. Karl-Heinz Frommolt
		Bearbeiter Maria Lefeber

Kooperationspartner Fraunhofer Institut für Digitale Medientechnologie IDMT
Marie-Curie-Straße 2, 26129 Oldenburg

Arbeitsgruppe für regionale Struktur- und Umweltforschung GmbH – ARSU
Escherweg 1, 26121 Oldenburg

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Ziel des Vorhabens war, auf der Grundlage von bereits existierenden Lösungsansätzen zur Lokalisation Technischer Geräuschquellen (IDMT) und zur automatischen Erkennung von Vogelstimmen (MfN) ein zuverlässiges Sensorsystem zur autonomen automatischen Erfassung von lautgebenden Tierarten, die für landschaftsplanerische und naturschutzfachliche Entscheidungen von hoher Relevanz sind, zu entwickeln. Am Ende des Projektes sollte ein geländetaugliches System vorliegen, dass für drei ausgewählte Anwendungsfälle, die aktuelle naturschutzrelevante Probleme betreffen (Waldschnepfe, Wachtelkönig, Heuschrecken), und sich in der Komplexität der technischen und analytischen Herausforderungen deutlich unterscheiden, voll einsatzfähig ist. Die Methodik sollte so weit entwickelt werden, dass sie unmittelbar in der gutachterlichen Praxis genutzt werden kann.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Auf der Grundlage eines am Fraunhofer IDMT entwickelten akustischen Mehrkanalsensors wurde ein System zum akustischen Tracking entwickelt. In der ersten Phase wurden mit dem Sensor in den vorgesehenen Anwendungsszenarien Audioaufzeichnungen generiert, getestet und Anpassungen am Design des Sensors an die Aufgabenstellungen vorgenommen. Parallel dazu erfolgte die Entwicklung von Algorithmen zur sicheren Artbestimmung. Algorithmen zur Artbestimmung und zur Ortung wurden auf dem Sensorsystem implementiert.

In der zweiten Phase erfolgte eine Verifizierung der Erkennungs- und Lokalisationsergebnisse unter Praxisbedingungen. Dazu erfolgten Kartierungen durch qualifizierte Beobachter vor Ort sowie vom Sensorsystem unabhängige akustische Ortungen der Schallquellen. Zusätzlich wurden Experimente zur Ortungsgenauigkeit unter Nutzung von synthetischen akustischen Signalen durchgeführt.

In der dritten Phase wurde das System für die Eignung für umweltgutachterliche Tätigkeit geprüft. Dazu wurde ein benutzerfreundliches Interface für das Sensorsystem entwickelt. Es erfolgte ein Abgleich der Arbeitsschritte an die Anforderungen von Umweltgutachten (u.a. Genehmigung von WKAs) und die Einbeziehung zukünftiger Anwender in die akustische Erfassung (Wachtelkönigmonitoring).

Ergebnisse und Diskussion

Im Projekt wurde, basierend auf einem am Fraunhofer IDMT entwickelten Sensors, ein Prototyp eines wettergeschützten Systems zur automatischen akustischen Detektion, Lokalisation und Tracking lautgebender Tiere entwickelt. Wesentliche Hardwarekomponenten eines Devisensensors sind ein Einplatinenrechner Raspberry Pi 4, eine mit MEMS-Mikrofonen ausgerüstete 8-Kanal-Soundkarte (Eigenentwicklung IDMT), ein GPS-Sensor zur Bestimmung der Position und als Basis für Zeitstempel sowie ein Gyrosensor zur Bestimmung der Ausrichtung. Eine Webapplikation erlaubt, über eine WLAN-Verbindung mit den Sensoren im Sinne eines Sensornetzwerkes zu kommunizieren. Audioaufzeichnungen werden als 8-Kanal FLAC-Dateien auf einer externen Festplatte gespeichert. Eine Audioverarbeitung erfolgt bereits auf dem Sensor. Auf der Grundlage von Convolutional Neural Networks (CNN) erfolgt die Artbestimmung lautgebender Tierarten sowie die Bestimmung der Richtung, aus der eine Fokusart ruft. Der Einsatz von handelsüblichen MAKITA-Akkus erlaubt den mobilen Einsatz der Sensoren für eine Laufzeit von ca. 8 Stunden.

Das System erlaubt die sichere Arterkennung der beiden Fokusarten Wachtelkönig und Waldschnepfe. Der angedachte Einsatz für Heuschrecken erwies sich als zu komplex und war im Rahmen des Projektes nicht zu realisieren. Bei den Lokalisationsalgorithmen wurde aufgrund der hohen Praxisrelevanz der Schwerpunkt auf den Wachtelkönig gelegt. Die Richtung, aus der ein Tier ruft, kann zumindest wenn sich die Rufe zweier Individuen der Art nicht überlappen auch in einer komplexen Geräuschkulisse gut bestimmt werden. In einem Langzeitversuch konnte mit dem System die räumliche Verteilung der Rufaktivität der Art praktisch über die gesamte Aktivitätsperiode erfolgen. Die Ergebnisse der Freilanduntersuchungen sind unmittelbar in die Entscheidungen zum dynamischen Grünlandmanagement im NP Unteres Odertal eingeflossen. Die Ergebnisse zur akustischen Erfassung der Waldschnepfe flossen unmittelbar in die Lebensraumberwertung des NSG „Gellener Torfmöörte mit Rockenmoor und Fuchsberg“ ein.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Öffentlichkeitsarbeit erfolgte auf folgenden Ebenen:

- Unmittelbare Zusammenarbeit mit potenziellen zukünftigen Nutzern (Verwaltung Nationalpark Unteres Odertal)
- Vorstellung des Projektes vor Landwirten und interessierten Bürgern (Gründlandtage des NP Unteres Odertal)
- Fachvorträge auf wissenschaftlichen Konferenzen und Kolloquiums-Vorträge an Universitäten
- Wissenschaftliche Publikationen zu den Algorithmen
- Information über Projekt Websites
- Pressemitteilungen, Podcasts und Rundfunkbeiträge zum Projekt

Fazit

Es ist gelungen, ein funktionierendes System als Prototyp zu erstellen. Die weitere Entwicklung des Systems sollte mehr Arten berücksichtigen, die Lokalisation auch von simultan rufenden Tieren ermöglichen und eine nutzerfreundlichere Bedienung ermöglichen. Durch den Abgleich des Leistungsvermögens des Prototyps mit den Anforderungen an reguläre naturschutzfachliche Kartierungen, konnten verschiedene Optimierungsmaßnahmen ermittelt werden, die für einen praxistauglichen Einsatz notwendig sind. Dazu zählt insbesondere eine Erhöhung der Anwenderfreundlichkeit, z.B. durch einen Fernzugriff aus dem Büro oder die Verlängerung der Einsatzdauer. Dadurch soll die Anwendung, einfacher, zuverlässiger und wirtschaftlicher werden, um so Einsatzmöglichkeiten zu erweitern.

1 Zusammenfassung

Ziel des Projekts war es, ein System für eine automatische akustische Erfassung von Ausschnitten der Biodiversität auf der Basis vorhandener Prototypen zu entwickeln und in verschiedenen Anwendungszusammenhängen (regenerative Energien, Landnutzung, Schutzgebiete) zu testen. Es handelt sich um ein miniaturisiertes, kostengünstiges, intelligentes, akustisches Sensorsystem mit hohen Freiheitsgraden (robust für den Außeneinsatz, batteriebetrieben, lokalisierbar sowie vernetzbar mit weiteren Sensorsystemen) für die automatisierte quantitative Erhebung tierökologischer Daten in Planungs- und Forschungsvorhaben. Auf den Sensorsystemen sind maschinelle Lernverfahren für eine qualitative und quantitative Auswertung von Audiodaten direkt vor Ort integriert (Artbestimmung und Ruhhäufigkeiten). Über den Einsatz von mehrkanaliger akustischer Sensorik (Mikrofon-Arrays) wird neben der Klassifikation auch die automatische Ortsbestimmung von lautgebenden Tierarten möglich.

Die in der Projektzeit realisierte Entwicklung eines funktionsfähigen Systems ermöglichte durch kontinuierliche Feedbackschleifen unter Beteiligung externer (zukünftiger) Anwendergruppen die Identifizierung und Konkretisierung zusätzlicher Erweiterungen und Funktionen, die zum Teil bereits innerhalb der kostenneutralen Verlängerung des Projekts bearbeitet werden konnten. Neben weiteren Verbesserungen der Autarkie, sind insbesondere folgende Punkte als relevant für einen zukünftigen verbreiteten Einsatz in der Praxis herausgearbeitet worden.

- Bildung von drahtlosen Sensornetzwerken und damit die Erfassung von bestimmten Ausschnitten der Biodiversität auch über ausgedehnte Gebiete hinweg.
- Über eine webbasierte Anwendung zur Einrichtung und zum Monitoring des Sensornetzwerks und seiner Komponenten sollen erfasste Daten in Echtzeit visualisiert und räumliche und zeitliche Zusammenhänge auswertbar werden.

Auf diesem Weg soll für Umweltwissenschaftler, Biologen, Landschaftsökologen und am Markt agierende Unternehmen ein qualitativ hochwertiges, dennoch kostengünstiges akustisches digitales Sensorsystem zur Erfassung und Bewertung von Biodiversität entstehen. Für die Anwendungsfälle Wachtelkönig und Waldschnepfe wurden bereits beispielhafte Anwendungsszenarien erprobt.

Im Projektverlauf erfolgte die Weiterentwicklung des akustischen Sensors ausgehend von den praktischen Erfahrungen im Feldeinsatz und perspektivischer Anforderungen an die gutachterliche Tätigkeit. In den Feldversuchen kamen zeitgleich mehrere synchronisierte Aufzeichnungseinheiten zum Einsatz, die als ein Sensornetz fungierten. Der Praxiseinsatz zielte darauf ab, empirische Daten für die Abschätzung der Reichweite und der Ortungsgenauigkeit des Systems zu gewinnen, sowie die Robustheit und praktische Handhabbarkeit zu prüfen. Der Schwerpunkt lag bei den Zielarten Waldschnepfe und Wachtelkönig, erste Heuschreckenaufnahmen wurden erstellt. Akustische Mustererkennung und Lokalisationsalgorithmen wurden weiterentwickelt. Für den Wachtelkönig konnte, ein auf einem neuronalen Netzwerk basiertes System der Arterkennung und Lokalisation entwickelt werden, dass zumindest im Bereich von wenigen Hundert Metern zuverlässige Ergebnisse liefert. In der Projektlaufzeit konnten folgende Meilensteine realisiert werden:

- Funktionsfähiges Sensorennetz
- Lokalisationsalgorithmen
- Kombination Arterkennung und Lokalisation
- Implementierung der Erkennungs- und Lokalisationsalgorithmen auf dem Sensorsystem

2 Einführung/Motivation

Ziel des Projekts war es, ein System zu entwickeln, das über eine akustische Erfassung die Qualität von Biodiversitätsdaten durch längere Aufzeichnungszeiträume und automatische Auswertung deutlich verbessern soll.

Bereits während der Entwicklungsphase sollten die Ergebnisse unmittelbar in die naturschutzfachliche Entscheidungsfindung einfließen. Dabei geht es um Entscheidungen für die Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen. Zukünftig sollen zudem Informationen für Planungsverfahren (z. B. Windenergie), aber auch um neue Möglichkeiten zur ökologischen Bewertung von Grünland (High Nature Value Grasslands) bereitgestellt werden.

Derzeit greifen Planungsbüros und Naturschutzbehörden zur Bestandsaufnahme von Vorkommen geschützter Arten auf Kartierer, d.h. auf personengestützte Zählungen zurück. Diese sind mit hohem personellem Aufwand verbunden und bringen dennoch die Gefahr mit sich, dass insbesondere Absenzaussagen falsch sein können, weil sich die meist nur wenigen Erfassungstage zufällig auf Phasen ohne Lautäußerungen beschränkt haben oder diese schlicht überhört wurden. Zudem ist die Gefahr von Mehrfachzählungen durch synchron arbeitende Kartierer gegeben, welche die Ergebnisse hinsichtlich der Anzahl und Lage von Vorkommen verfälschen können. Demgegenüber stehen die hohen Anforderungen an Qualität und Quantität von ökologischen Daten, sei es aus artenschutzrechtlicher Sicht (§ 44 Abs. 1 BNatSchG), sei es bei Schutzgebietsausweisungen oder bei der Suche nach Strategien nachhaltiger Landnutzung z.B. zum Schutz von Brutvorkommen bzw. Gelegen von Bodenbrütern.

Aktuell verfügbare akustische Aufnahmesysteme sind prinzipiell dazu in der Lage, Tierstimmen ebenso effektiv zu erfassen wie das menschliche Ohr (SHONFIELD & BAYNE 2017; DARRAS ET AL. 2019). Große Vorteile im Gegensatz zu herkömmlichen Erfassungsmethoden bestehen hinsichtlich der Vergleichbarkeit der gewonnenen Daten. Aufgrund der langen Aufnahmezeiten und der nachträglichen Kontrolle der Aufnahmen ist die Aussagekraft der Daten zudem sehr hoch (DARRAS ET AL. 2019). Defizite ergeben sich jedoch durch den zurzeit noch sehr aufwändigen Auswertungsprozess und die häufig nicht gegebene Praktikabilität im Gelände.

Mit dem Einsatz intelligenter akustischer Sensorik mit integrierten Verfahren zur Mustererkennung ist mit einer erheblichen Qualitätssteigerung der Erfassungsmethoden und deren Ergebnissen zu rechnen. Diese Methoden führen potenziell zu deutlich genaueren räumlich-zeitlichen Auflösungen sowie besserer Vergleichbarkeit bei gleichzeitig erheblich reduziertem personellem und zeitlichem Aufwand.

Durch die Erfassung mit GPS-gestützten bzw. mehrkanaligen akustischen Sensoren wäre darüber hinaus eine Lokalisierung einzelner Individuen bis auf wenige Meter genau möglich, was z.B. für den Schutz bestimmter Bodenbrüter bei landwirtschaftlichen Arbeitsvorgängen bedeutsam ist. Es ist davon auszugehen, dass sich intelligente Sensortechnologien zur belastbaren Präsenz- bzw. Absenzbestimmung sowie Raumnutzung von lautgebenden Tierarten mittel- bis langfristig als Standardmethode in den Leitfäden der Bundesländer für Bestandserfassungen in Genehmigungsplanungen oder Monitorings etablieren, so wie es für die Fledermäuse bereits erfolgt ist (z. B. MU Nds 2016 oder MARKMANN & PFEIFFER 2020). Die Berücksichtigung, wie sich dieser Digitalisierungsschritt auf bestehende Arbeitsprozesse beim Endnutzer auswirkt, wurde im Rahmen dieses Projekts begleitend untersucht und Endnutzerbedarfe frühzeitig bei der Entwicklung von DeVise berücksichtigt.

Ziel des Vorhabens war es, auf der Grundlage von bereits existierenden Lösungsansätzen zur Lokalisation technischer Geräuschquellen (IDMT) und zur automatischen Erkennung von Vogelstimmen (MfN)

ein zuverlässiges Sensorsystem zur autonomen automatischen Erfassung von lautgebenden Tierarten, die für landschaftsplanerischer und naturschutzfachliche Entscheidungen von hoher Relevanz sind, zu entwickeln. Am Ende des Projektes sollte ein geländetaugliches System zur Verfügung stehen, das für ausgewählte Anwendungsfälle, welche aktuelle naturschutzrelevante Probleme betreffen und sich in der Komplexität der technischen und analytischen Herausforderungen deutlich unterscheiden, einsetzbar ist. Die Methodik wurde so weit entwickelt, dass sie unmittelbar in der gutachterlichen Praxis genutzt werden konnte.

Aus naturschutzfachlicher Sicht sollten folgende Aufgaben realisiert werden:

- Erfassung stationärer Rufer im Kontext von Landnutzung und Schutzgebietsmanagement am Beispiel des Wachtelkönigs
- Erfassung von Rufen fliegender Vögel im Kontext des Ausbaus regenerativer Energieerzeugung am Beispiel der Waldschnepfe
- Kleinräumige akustische Erfassung im Kontext von Landnutzung und Planungsvorhaben am Beispiel von Heuschrecken

Auf technischer Seite ergaben sich daraus folgende Schwerpunkte:

- Entwicklung miniaturisierter, energieautonom, selbstlokalisierender, wetterfester Aufnahmesysteme zur Aufzeichnung und Auswertung von Audiomaterial zur Biodiversitätserfassung
- Anpassung von Verfahren des maschinellen Lernens für die Arterkennung lautgebender Tiere
- Erweiterung der Sensorknoten, um die Möglichkeit zur Richtungs- und Flughöhenbestimmung zur akustischen Quellenlokalisierung und Detektion von lautgebenden Tierarten

Für die Anwendung der Methodik für die gutachterliche Tätigkeit sollten folgende Aufgaben realisiert werden:

- Standardisierung des Einsatzes der Technik im Gelände
- Aufbereitung und Auswertung der Daten mit Hilfe gängiger Analysesoftware (GIS, SPSS, R)
- Interpretation der Ergebnisse in einem naturschutzfachlichen Kontext
- Vergleich der Daten mit den Ergebnissen herkömmlicher Erfassungen
- Entwicklung eines Methodenmixes bestehend aus akustischer Dauererfassung mit weiteren Erfassungsmethoden

3 Methodik/Vorgehensweise/Projektablauf

Der vorliegende Abschlussbericht umfasst die Endergebnisse der Projektarbeit sowie die relevanten Entwicklungsschritte:

- Anwendungsbezogene Optimierung des akustischen Sensorsystems DeViSe
- Softwareentwicklung
- Akustische Freilandtests
- Erfassung mit herkömmlichen Methoden
- Verifizierung der Erkennungs- und Lokalisationsergebnisse unter Praxisbedingungen
- Auswahl der Algorithmen hinsichtlich Performance und Eignung zur Implementierung auf dem Sensorsystem
- Implementierung der Algorithmen auf dem Sensorsystem
- Performance- und anwendungsoptimierte Kombination von Arterkennung und Lokalisation auf dem Sensorsystem
- Integration der Algorithmen in die bestehende Softwarearchitektur des Sensors mit Fokus auf benutzerfreundlicher Anwendung und Ergebnisauswertung
- Bewertung, Evaluation und Transfer

3.1 Anwendungsbezogene Optimierung des akustischen Sensorsystems DeViSe

Ausgangspunkt für die Entwicklung des DeViSe-Sensors war das am IDMT entwickelte "Reuse-Systems" zur mehrkanaligen Erfassung akustischer Signale im dreidimensionalen Raum. Die wesentlichen Änderungen seien hier stichpunktartig zusammengefasst:

- Änderung der Mikrofonierung von 3D-Anordnung zu 2D-Anordnung auf 5x5cm Platine
- Verkleinerung des Sensors um ~30%
- Verbesserung des GPS-Systems
- Evaluation verfügbarer Kompassensoren
- Anpassung der elektronischen Komponenten
 - Implementierung des WittyPi3
 - Implementierung einer Real-time-clock (RTC)

Die wichtigste und aufwendigste Änderung ist neben der geänderten Mikrofonierung das Aufsteck-Modul „Witty Pi 3 – RTC & Power Management for Raspberry Pi“. Dieses Modul bringt neben der Echtzeituhr mit Zeitschaltfunktion auch einen eigenen DCDC-Wandler mit sowie die Möglichkeit der Messung der Betriebs- bzw. Batteriespannung. Für die Konfiguration der Zeitschaltfunktion wird derzeit eine Textdatei verwendet, die dem Sensor durch ein Speichermedium per USB zur Verfügung gestellt wird. Später könnte ein eigener Service für das APU-Framework hinzugefügt werden. Auch eine eigene Web-GUI, oder die Einbindung in die künftige DeViSe-GUI wären so möglich.

Mit dem Umbau des Sensors ergibt sich eine IP-Schutzklasse von IP44. Diese Schutzklasse bietet Schutz gegen allseitiges Eindringen von Spritzwasser und ist vor dem Eindringen fester Fremdkörper mit einem Durchmesser über einem Millimeter geschützt.

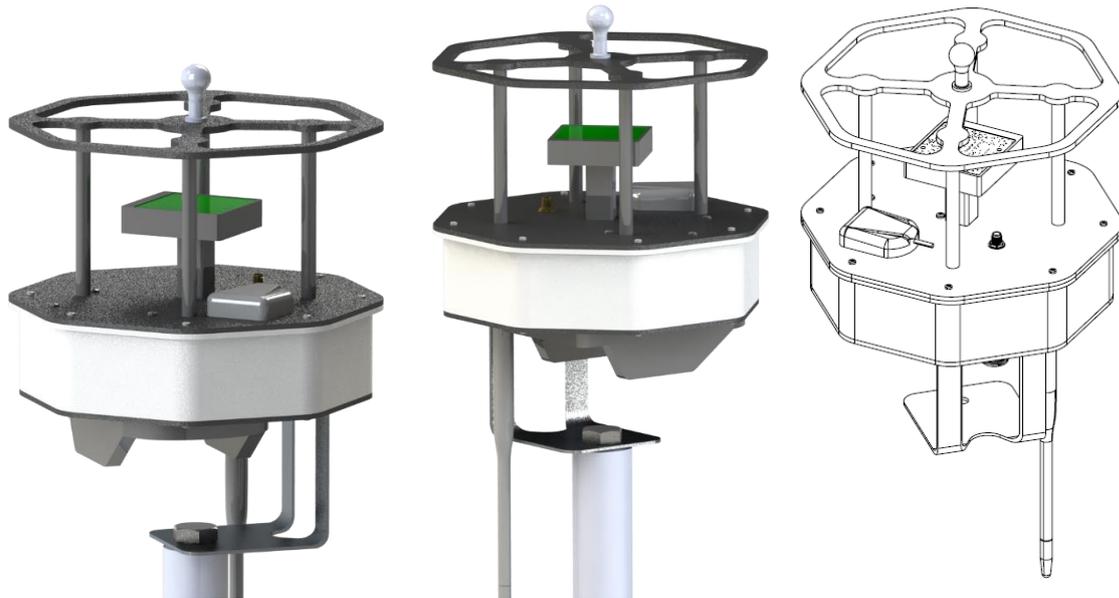


Abbildung 1: Designentwurf und Umsetzung des neuen DeViSe-Sensors

Von dem neuen Design (Abb. 1 und 2) wurden insgesamt 11 Systeme angefertigt. Fünf Geräte gingen an das Museum für Naturkunde Berlin und weitere 5 an die ARSU GmbH. Ein Endgerät verbleibt zu Test- und Demozwecken am Fraunhofer IDMT. Damit ist das IDMT in der Lage, auf Probleme der anderen Partner zu reagieren und diese nachbilden zu können. Zudem kann die Software für alle Sensoren weiterentwickelt und getestet werden.



Abbildung 2: Ansicht der fertigen Systeme

Inertialsensoren

Bei Anwendungen im Feld wurde beobachtet, dass der derzeit verwendete Inertialsensor (IMU) BNO055 zur Bestimmung der Sensor-Ausrichtung durch kleinste Vibrationen eine Gyro-Drift aufweist. Diese bewirkt, dass die geschätzte Ausrichtung mit der Zeit driftet und die Sensorkalibrierung damit invalidiert wird. Über einen Messzeitraum von mehreren Minuten bis Stunden führt dies zu einer unbrauchbaren Schätzung der Sensor-Ausrichtung. Für den vorliegenden Anwendungsfall gilt es zu betonen, dass ausschließlich eine Schätzung der Systemausrichtung bezüglich der Erdachse erforderlich ist (also eine Ausrichtung in Kompassgrad) und keine absolute Ausrichtung im Bezugssystem (x -, y -, z -Komponente), wie es ein Lagesensor bestimmen kann.

Um den Drifteffekt zu quantifizieren und einen gegebenenfalls adäquaten Sensor zu identifizieren, wurden in einem Testaufbau verschiedene Lagesensoren (IMU und Magnetometer) hinsichtlich ihrer Leistung der Ausrichtungsschätzung untersucht (Abb. 3). Dabei sind die Merkmale *Winkelauflösung* und *Präzision* voneinander zu unterscheiden. Für die Winkelauflösung muss hierbei auf die Datenblätter der jeweiligen Hersteller verwiesen werden, da eine Bestimmung mit in diesem Projekt vorhandener Technik und Laufzeit nicht leistbar ist. Allerdings kann eine erste Schätzung der Präzision, also dem Rauschverhalten der Sensoren, gegeben werden. Hier ist eine höhere Präzision, also eine kleinere Streuung der Werte wünschenswert.

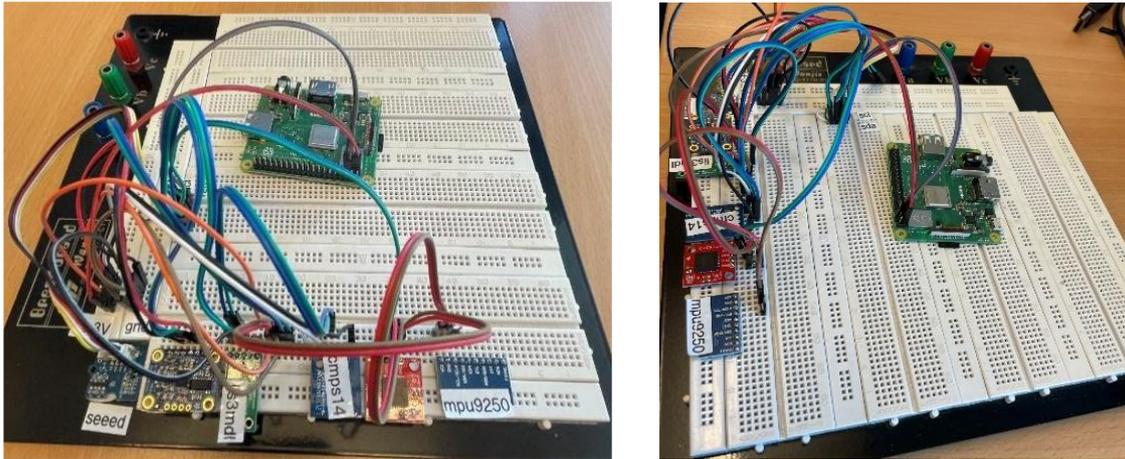


Abbildung 3: Steckbrett mit sechs Lagesensoren. Alle Sensoren sind über I2C Protokoll mit dem Raspberry Pi (mittig im Bild) verbunden. Rechts: Seitenansicht des Aufbaus

Der Testaufbau besteht aus einem Steckbrett, auf dem sechs Lagesensoren per I2C-Protokoll mit einem Raspberry Pi verbunden wurden. Letztlich konnte mit vier der sechs Sensoren erfolgreich kommuniziert werden, welche in Tabelle 1 aufgeführt sind. Nach einer Kalibrierroutine wurde eine fünfminütige, stationäre Messung ausgeführt, in der von allen vier Sensoren eine Richtungsschätzung als Zeitreihe aufgenommen wurde.

Tabelle 1: Übersicht über erfolgreich aufgebaute Sensoren

Sensor	Klassifizierung	Winkelauflösung in Grad
BMM150	Magnetometer	$\pm 2,5$
BNO055	IMU	$\pm 2,5$
LIS3MDL	IMU	unbekannt
HMC6343	IMU	± 1

In Abbildung 4 sind die Zeitsignale der vier IMUs dargestellt. Dabei ist über der Zeit in Sekunden die geschätzte Sensorausrichtung aufgetragen. Es fällt auf, dass sich die mittlere geschätzte Ausrichtung der vier Sensoren stark unterscheiden. Dies ist für die vorliegende Untersuchung unerheblich und darauf zurückzuführen, dass die Ausrichtung jeder einzelnen IMU auf ihrem entsprechenden Breakout-Board unterschiedlich ist und sich die Koordinatensysteme der IMUs auf dem Steckbrett unterscheiden.

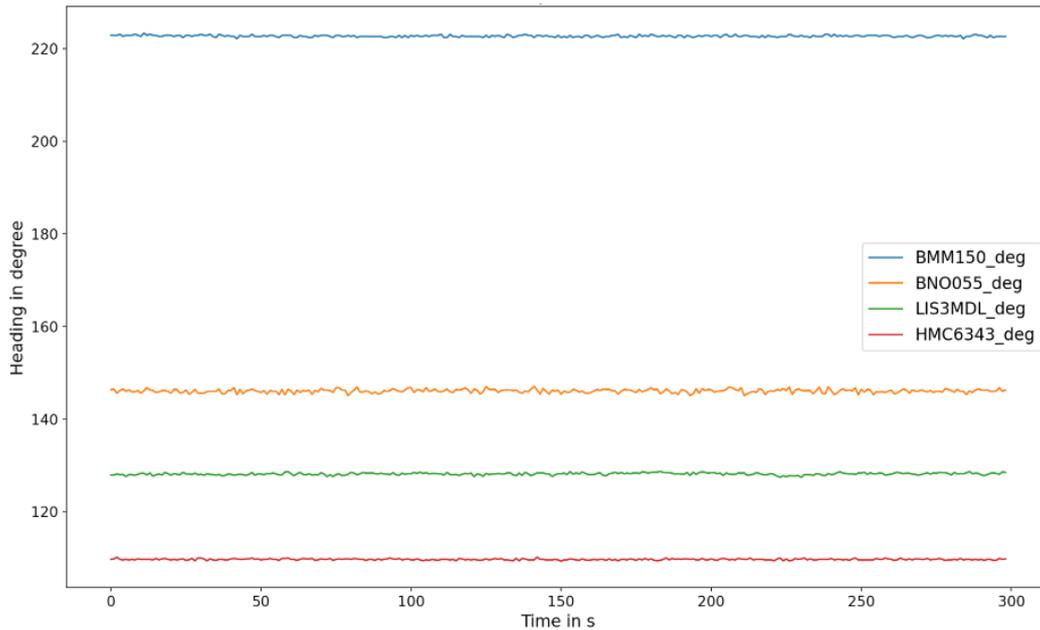


Abbildung 4: Zeitsignale der IMUs

Die resultierende absolute Ausrichtung ist damit fehlerhaft. Die entscheidende Größe hier ist allerdings die jeweilige Varianz um den mittleren Wert (Abb. 6). In Tabelle 2 sind die Standardfehler der Ausrichtungsschätzungen der jeweiligen IMUs für die vorliegende Messreihe aufgeführt. Hierbei wird deutlich, dass der größte Standardfehler bei $0,022^\circ$ liegt. Dieser wurde zwar bei der derzeitig verwendeten IMU (BNO055) beobachtet, liegt allerdings in einem Wertebereich, der für das vorliegende Anwendungsszenario vernachlässigbar ist. Ein Standardfehler von $0,5^\circ$ bis 1° kann als obere Grenze der Anforderung verstanden werden.

Tabelle 2: Standardfehler der Ausrichtungsschätzung für die vier verwendeten IMUs

Sensor	Standardfehler in Grad
BMM150	0,012
BNO055	0,022
LIS3MDL	0,014
HMC6343	0,008

Innerhalb der fünfminütigen Messzeit wurde die im Feld beobachtete Gyro-Drift nicht beobachtet und die Sensorpräzision übererfüllt die Anforderung. Daher wurden für den weiteren Projektverlauf folgende Punkte verabredet:

- Die IMU BNO055 bleibt der Sensor der Wahl. Voraussetzung: Sensor weiterhin im freien Markt lieferbar
- Um Gyro-Drift entgegenzuwirken, wird ein Mittelwert der ersten Minuten einer neuen Messung genutzt mit der Annahme:
 - Die Sensorposition ist während der Messung konstant
 - Eine Positionsänderung während Messungen kann detektiert werden und anschließend eine neue robuste Schätzung der Ausrichtung vorgenommen werden

3.2 Methodik der Softwareentwicklung

Arterkennung

Die Zielarten im Projekt (Wachtelkönig und Waldschnepfe) zeichnen dadurch aus, dass ihre Rufe recht einfach strukturiert sind und dadurch auch von Nichtspezialisten nach kurzer Einarbeitung sicher erkannt werden können. Die Balzrufe der Waldschnepfe bestehen typischerweise aus drei bis vier Elementgruppen des "Quorrens" gefolgt von einem hochfrequenten "Puitzen" (GLUTZ VON BLOTZHEIM ET AL. 1985) (Abb. 5). Die Balzrufe werden im Flug vorgetragen.

Die Balzrufe des Wachtelkönigs, hingegen die aus zweisilbigen scharrenden Lauten bestehen, werden in der Regel vom Boden aus vorgetragen (BRAAKSMA & VAN DER STRAATEN 1994.). Die Energie des Rufes konzentriert sich dabei in einem Frequenzbereich von 2 bis 6 kHz (Abb. 6). Die Rufe sind vorrangig nachts zu hören.

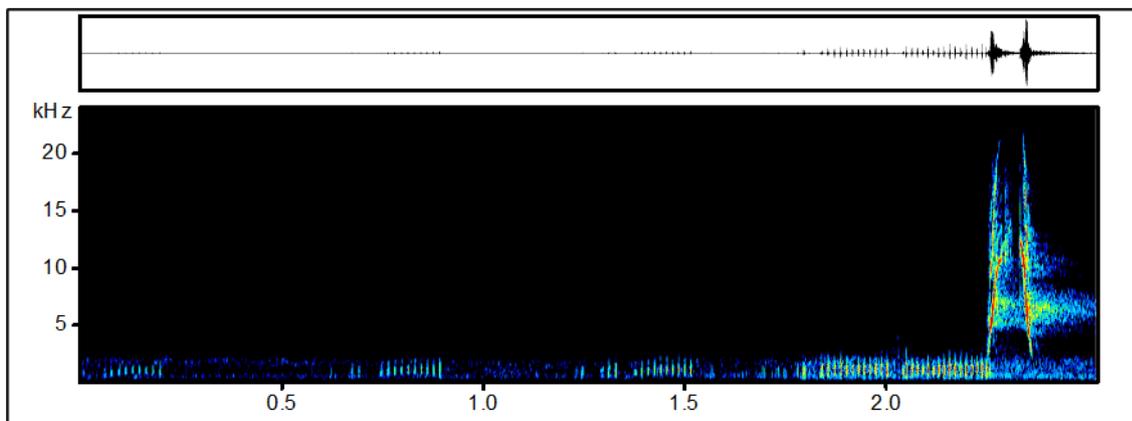


Abbildung 5: Spektrogramm einer typischen Waldschnepfensequenz, beginnend mit 5 "quorrenden" Lauten (niederfrequente Anteile) und einem stark modulierten und hochfrequentem "Puitzen". Spektrogramm erstellt mit SASLabPro (c) R. Specht

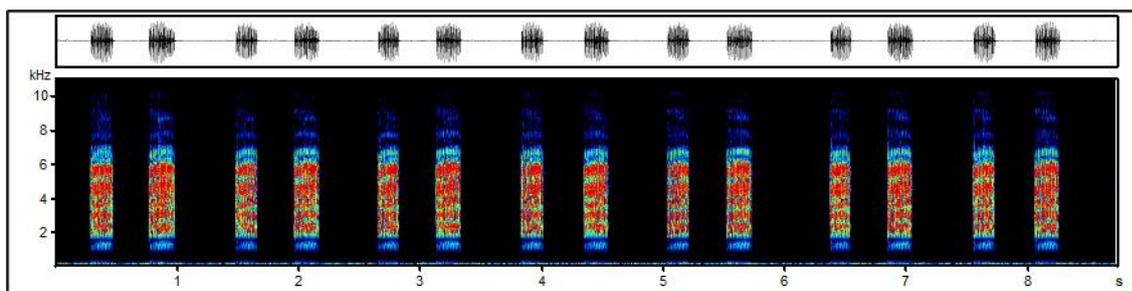


Abbildung 6: Spektrogramm eines Ausschnittes einer Rufreihe des Wachtelkönigs. Spektrogramm erstellt mit SASLabPro (c) R. Specht

Zur Erkennung der Zielarten wurden im Laufe des Projekts eine Reihe unterschiedlicher Algorithmen entwickelt und getestet. Es wurden hierbei sowohl klassische Methoden der Mustererkennung als auch auf neuronale Netze basierende Deep Learning Verfahren evaluiert. Für die Erkennung der Waldschnepfe wurde beispielsweise eine Kombination aus Template-Matching (BRAVO ET AL. 2017) zur Merkmalsextraktion mit anschließender Klassifikation durch eine Support Vector Machine (SVM) verwendet. Beim Wachtelkönig wurde ein ähnliches Verfahren entwickelt, wobei hier anstelle der SVM ein Random Forest Algorithmus zur Klassifikation eingesetzt wurde (FODOR 2013).

Um einen schnellen Überblick über die Rufaktivität des Wachtelkönigs über die gesamte Brutsaison zu erhalten, wurde außerdem ein einfacher Algorithmus entwickelt, der es erlaubt langanhaltende Rufreihen zu detektieren. Ausgehend von den typischen Signaleigenschaften der Rufreihen des Wachtelkönigs wurde in einem ersten Schritt eine Novelty-Funktion berechnet, die entsprechende Signale hervorhebt. In einem zweiten Schritt wurde diese Novelty-Funktion einer Autoregressionsanalyse unterzogen, die es erlaubte Signale mit einer für den Wachtelkönig typischen Periodizität zu erkennen.

Die erwähnten Verfahren erzielten alle gute bis sehr gute Ergebnisse zur Erkennung der jeweiligen Art, haben allerdings auch einige Nachteile. Zum einen ist deren Einsatz auf die jeweilige Zielart und der Erkennung ihrer artspezifische Rufformen begrenzt. Eine Erweiterung der Algorithmen zur Detektion anderer Arten oder die gleichzeitige Klassifikation mehrere Arten ist nicht ohne erheblichen zusätzlichen Aufwand möglich (z.B. durch Erstellung neuer art- und rufspezifischer Templates für die Merkmalsextraktion und erneutes Trainieren des Klassifikators). Zum anderen ist die Performance der Algorithmen hinsichtlich Berechnungsgeschwindigkeit und Energieverbrauch insbesondere beim direkten Einsatz auf den DeViSe-Sensoren mit begrenzten Hardwareressourcen (Raspberry Pi 4) nicht optimal.

Es zeigte sich, dass die Verwendung von neuronalen Netzen zur Arterkennung gegenüber klassischen Methoden der Mustererkennung einige Vorteile bieten. Beim Deep Learning werden neuronale Netze im sog. Ende zu Ende Lernverfahren (engl.: end-to-end) trainiert. Die Netze lernen selbstständig mithilfe großer Datenmengen, in unserem Fall annotierter Audioaufnahmen, welche akustischen Eigenschaften für die Klassifikation einer Art relevant sind. Der Zwischenschritt einer manuellen Auswahl und Extraktion von Merkmalen entfällt.

Das während der Projektzeit entwickelte Modell „BirdID-Europe254“ (kurz BirdID) wurde mit Audioaufnahmen des Tierstimmenarchivs und Xeno-canto (<https://xeno-canto.org/>) zur Erkennung von 254 Europäischen Vogelarten trainiert. Es basiert auf einem Convolutional Neural Network (CNN) und kann mehrere Arten gleichzeitig auch in komplexen Geräuschkulissen detektieren. Das Modell basiert u.a. auf Netzwerkarchitekturen und Trainingsverfahren, die im Rahmen verschiedener BirdCLEF-Programmierwettbewerbe erfolgreich getestet und stetig weiterentwickelt wurden (LASSECK 2019, 2023).

Der BirdID Klassifikator erreichte in ausgiebigen Praxistests (siehe Abschnitte 4.3 und 4.4) bei der Erkennung von Waldschnepfe und Wachtelkönigs sehr gute Ergebnisse. Auch bei leisen Rufen oder Aufnahmen mit vielen Hintergrundgeräuschen kann das Modell die Arten noch gut erkennen, im Gegensatz zu klassischen Methoden der Mustererkennung, welche in solchen Szenarien zunehmend Schwierigkeiten haben und vergleichsweise öfter Fehlbestimmungen erzeugen.

Ein weiterer Vorteil des Modells ist die Verwendung desselben Software-Frameworks (PyTorch) und einer ähnlichen, CNN-basierte Netzwerkarchitektur wie das Modell zur Lokalisation. Dieses bietet die Möglichkeit der Integration beider Algorithmen in eine gemeinsame Struktur und damit Potential für zusätzliche Optimierungen hinsichtlich Geschwindigkeit und Energieverbrauch bei der Kombination von Detektion und Lokalisation.

Das BirdID Modell verarbeitet Audioaufnahmen in 5-Sekunden-Abschnitte. Die Länge der zu analysierenden Abschnitte kann allerdings auch kleiner gewählt werden und ist somit variable und dynamisch an bestimmte Aufnahmebedingungen und Zielarten anpassbar. Zu jedem Analyseabschnitte liefert der Algorithmus eine Abschätzung der Auftrittswahrscheinlichkeit (engl.: probability oder confidence) für alle 254 zuvor trainierten Arten. Die Auftrittswahrscheinlichkeiten werden dabei mit Werten zwischen 0 und 1 angegeben. Je höher der Wert einer Art, umso sicher ist deren Detektion in dem jeweiligen

Aufnahmeabschnitt. Eine Art gilt als detektiert, wenn deren Confidence Wert über einen zuvor gewählten Schwellwert (engl.: threshold) liegt. Je höher der Schwellwert, desto wahrscheinlicher ist eine korrekte Detektion. Für eine hohe Präzision sollte der Confidence Wert über einen hohen Schwellwert von z.B. 0.8 liegen. Will man jedoch möglichst alle, z.B. auch sehr leise Rufe, einer Art erkennen und nimmt damit auch einige falsch-positive Detektionen in Kauf, setzt man den Schwellwert niedriger an, z.B. bei 0.4. Die Wahl des Schwellwerts bildet dabei einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Trefferquote und sollte somit dem jeweiligen Einsatzszenario entsprechend angepasst werden.

Für den Wachtelkönig, der i.a. sehr oft und lange ruft, kann hier beispielsweise ein recht hoher Schwellwert angesetzt werden, da zum Nachweis dieser Art nicht unbedingt jeder einzelne Ruf detektiert werden muss. Bei der Waldschnepfe hingegen kann ein niedrigerer Schwellwert sinnvoller sein, da diese Art seltener ruft und möglichst jeder dieser Rufe auch erkannt werden sollte.

BirdID-Europe254 ist Open Source und steht als Git-Repository mit umfangreicher Dokumentation zur Installation und Anwendung auf unterschiedlichen Plattformen (Linux, Windows, Raspberry Pi) zur Verfügung (<https://github.com/adsr71/BirdID-Europe254>).

Für das Sensorsystem wurde vom Klassifikator eine für den Raspberry Pi 4 optimierte Variante als Docker Image erstellt. Diese zeichnet sich durch eine optimale Nutzung der zur Verfügung stehenden Hardware (4 CPUs) durch Parallelisierung der Audiovorverarbeitung und -klassifizierung und einer zu den anderen Softwarekomponenten angepassten API zur Formatierung der Ein- und Ausgabeparameter aus.

Eine schematische Darstellung der Funktionsweise des BirdID Klassifikators ist als Prozessdiagramm in Abbildung 26 illustriert. Es beschreibt die einzelnen Signalverarbeitungsschritte inklusive der wichtigsten Parameter von der Audioaufnahme als Eingabe bis zur Ausgabe der Detektionsergebnisse im JSON-Format.

Andere, während der Projektlaufzeit entwickelte Verfahren zur Arterkennung, wie z.B. Template-Matching in Kombination mit Random Forest oder Support Vector Machine (SVM) Klassifizierung wurden aufgrund zu geringer Verarbeitungsgeschwindigkeit und vergleichsweise hohem Ressourcenverbrauch nicht unmittelbar auf dem Sensorsystem implementiert.

Lokalisation

Die Lokalisation wurde in diesem Projekt anhand der Zielart Wachtelkönig umgesetzt. Diese ermöglicht die Positionsbestimmung einzelner rufender Individuen, die aus 2 Stufen besteht. In der 1. Stufe wird pro Einzelsensor die relative Richtung des Sensors zu einem Tier geschätzt. Hierzu wurden verschiedene Algorithmen entwickelt und implementiert. In der 2. Stufe erfolgt die Positionsbestimmung des Tieres durch eine Kreuzpeilung aus den Richtungsschätzungen und GPS-Positionen mehrerer Sensoren. Dieser zweistufige Ansatz resultiert aus dem Umstand, dass eine Positionsbestimmung nur mit Hilfe mehrerer Sensoren möglich ist. Eine Positionsbestimmung mit einem Einzelsensor wäre nur möglich, wenn zusätzlich zur Richtung die Distanz des rufenden Tieres geschätzt würde. Da die Distanzschätzung akustischer Quellen jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet ist, liefert eine Positionsbestimmung über Kreuzpeilung in einem Sensornetz deutlich genauere Ergebnisse. Im Folgenden werden zunächst Die Algorithmen zur Richtungsschätzung erläutert und anschließend die Kreuzpeilung beschrieben.

Richtungsschätzung

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden verschiedene Algorithmen zur Richtungsschätzung implementiert und getestet. Das beste Ergebnis erzielte hierbei das Source Event Localization and Detection Net (SELD-Net) (ADAVANNE ET AL. 2019), welches schließlich in die Sensoren integriert wurde. Hierbei handelt es sich um ein auf neuronalen Netzen basierendes Deep Learning Verfahren zur gleichzeitigen Detektion und Richtungsschätzung akustischer Ereignisse. Deep Learning Methoden müssen zunächst für ihre jeweilige Aufgabenstellung mit großen Datenmengen trainiert werden, welche so genannte Label enthalten. Konkret auf dieses Projekt bezogen bedeutet dies, dass für jede Trainingsdatei eine Labeldatei vorliegen muss, mit der Information, in welchen Zeitabschnitten ein Vogel ruft und aus welcher Richtung. Der Vorteil dieses Algorithmus' liegt darin, dass dieser auf eine jeweilige Zielquelle (z.B. Wachtelkönig) trainiert werden kann und somit Fehllokalisierungen durch andere Schallquellen minimiert werden.

Für das Training des SELD-Net wurde im Projekt ein Trainingsdatensatz erzeugt. Um eine zuverlässige Richtungsschätzung des Wachtelkönigs zu gewährleisten, muss dieser Datensatz Audiodateien enthalten die Wachtelkönigrufe für Azimutwinkel von 0 bis 360° enthalten. Zudem müssen weitere Varianzen abgedeckt werden wie interindividuelle Unterschiede in den Rufen oder auch verschiedene Distanzen. Auch wenn die Distanz nicht vom SELD-Net geschätzt wird, hat diese einen Einfluss auf den Signal-Rausch-Abstand (SNR), also das Verhältnis der Schallleistung des Wachtelkönigrufes zum Umgebungsgeräusch. Die Freilandaufnahmen können diese Variabilität nicht abdecken, da sie nur von wenigen Tieren stammen und nicht alle Azimutwinkel und Entfernungen umfassen. Stattdessen wurden künstliche Audiosignale erzeugt, um die benötigte Menge an Trainingsdaten zu erhalten. Hierfür wurden möglichst saubere Aufnahmen des Wachtelkönigs verwendet und ihnen künstlich eine Richtung zugewiesen. Die Aufnahmen stammen von einer polnischen Population, die der Arbeit von Budka und Osiejuk (2017) zugrunde liegt und über das Tierstimmenarchiv des Museums für Naturkunde Berlin frei verfügbar ist. Zur Richtungszuweisung wurde ein eigens entwickeltes Tool eingesetzt, das abhängig von der Richtung und der Sensorgeometrie die Zeitunterschiede zwischen den Mikrofonen berechnet und auf das Audiosignal anwendet. Es wurde eine Winkelauflösung von 5° gewählt, das heißt, Winkel von 0° bis 355° wurden in 5°-Schritten verwendet. Verschiedene Entfernungen zwischen dem DeVise-Sensor und dem Wachtelkönig wurden durch die Verwendung unterschiedlicher SNRs simuliert. Es wurden SNR-Werte von -20 bis 10 dB in 5 dB-Schritten verwendet. Die verwendeten Hintergrundgeräusche wurden im Odertal aufgenommen.

Zusätzlich zu den Trainingsdaten wurde ein Validierungsdatensatz erstellt, der für das Training neuronaler Netze erforderlich ist, um eine mögliche Überanpassung des Modells zu vermeiden. Der Validierungsdatensatz muss dabei getrennt vom Trainingsdatensatz sein, das heißt, er darf keine der gleichen Daten enthalten. Dies stellt sicher, dass das trainierte Modell generalisierbar ist und nicht nur auf den Trainingsdaten funktioniert. Für die Generierung der Validierungsdaten wurden daher andere Hintergrundaufnahmen und Wachtelkönigaufnahmen als im Trainingsdatensatz verwendet. Die Größe des Validierungsdatensatzes wurde auf die übliche Menge von 20% des Trainingsdatensatzes festgelegt.

Kreuzpeilung

Um die genaue Position eines Vogelrufes zu bestimmen, wurde im Projekt eine Kreuzpeilung angewendet. Hierzu sind mindestens drei Sensoren notwendig. Die Position des Vogelrufes ergibt sich dabei aus dem Schnittpunkt der Richtungsschätzungen und der GPS Positionen der Sensoren, wie in Abbildung 7 schematisch dargestellt. Die Kreuzpeilung erfordert eine Vernetzung der Sensoren, um die GPS Positionen und Richtungsschätzungen

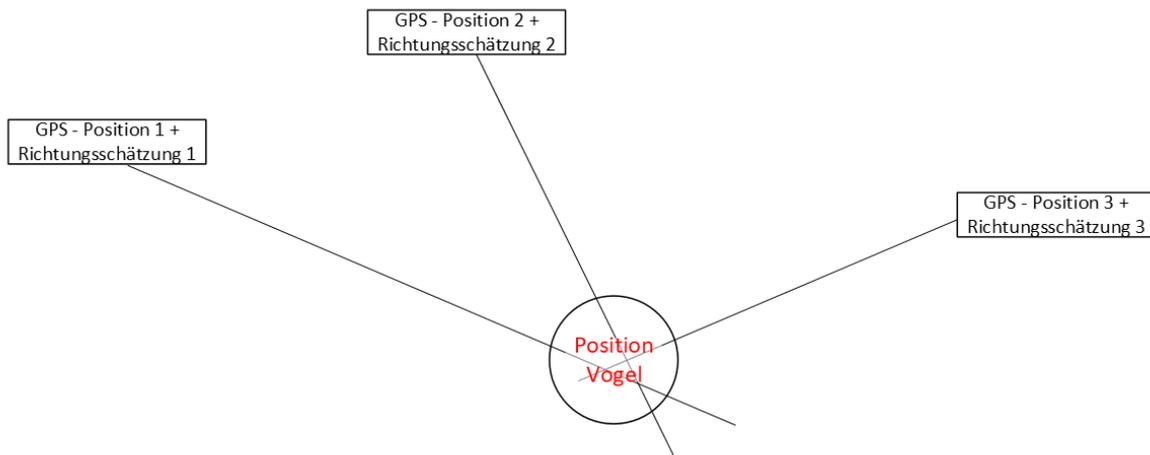


Abbildung 7: Schema der Kreuzpeilung

3.3 Durchführung akustischer Freilandtests

Übergeordnete Ziele der akustischen Freilandtests waren die Funktionskontrolle des DeVise-Systems sowie die Gewinnung von weiteren Aufnahmen der Zielarten. Beide Punkte dienen der technischen (und methodischen) Weiterentwicklung autonomer akustischer Erfassungssysteme für die gutachterliche Praxis. Um den Ansprüchen an die Erfassung von unterschiedlichen Vogelarten bereits bei der Entwicklung des Systems gerecht zu werden, wurden im Vorfeld zwei Zielarten mit unterschiedlichen Lebensräumen und Verhaltensweisen ausgewählt.

Am Beispiel des Wachtelkönigs sollte der Einsatz der akustischen Sensorik für die Erfassung einer Art erprobt werden, die mit einfachen strukturierten Rufen von konstanten Orten aus ruft. Es sind nur wenige oder relativ langsame Ortsänderungen zu verzeichnen. Die dabei entwickelte Methodik lässt sich nach Anpassung des akustischen Mustererkennungsalgorithmus sehr gut auf andere Arten wie z.B. andere Rallen, Eulen, Wachtel, Rebhuhn oder auch Luchs und Wolf anwenden.

An der Waldschnepfe wurde die Erfassung von Arten, die ihr Territorium im Flug markieren, erprobt. Die Herausforderung ist, die Ortung im dreidimensionalen Raum sowie zu unterscheiden, ob von entfernten einzelnen Sensoren zeitversetzt der gleiche Vogel oder unterschiedliche Tiere aufgezeichnet werden. Die hier gewonnenen Ergebnisse sind übertragbar für die Erfassung von Bekassinen, Feld- und Heidelerchen und auch für die Erfassung des nächtlichen Vogelzuges.

Untersuchungen an der Waldschnepfe

Als Beispielart für die Erfassung von Rufen fliegender Vögel dient die Waldschnepfe (*Scolopax rusticola*). Waldschnepfen besiedeln feuchte Laub- und Mischwälder in fast ganz Europa. Als Bodenbrüter errichtet sie ihr Nest bevorzugt am Rande geschlossener Baumbestände (z.B. an Waldlichtungen oder Wegrändern mit freiem Anflug). Beide Geschlechter lassen sich äußerlich nicht voneinander unterscheiden und sind sehr gut getarnt. Es bestehen keine klassischen Paarstrukturen, Männchen können sich in ihren großen Revieren (20 - 150 ha) mit mehreren Weibchen verpaaren. Nestbau, Brut und Aufzucht der Küken erfolgen ausschließlich durch die Weibchen (GLUTZ VON BLOTZHEIM & BAUER 1985).

Die tägliche Hauptaktivitätszeit beschränkt sich auf die Abend- und Nachtstunden, in denen die Männchen große Teile ihres Reviers (mehrere ha) durchfliegen und zur Balz nutzen und die Weibchen aufgrund der heimlichen Lebensweise nur sehr selten zu beobachten sind. Während des Balzfluges stoßen die Männchen regelmäßig ihren zweigeteilten Ruf, bestehend aus tiefem „Quorren“ und dem sehr hohen „Puitzen“, aus. Der „Schnepfenstrich“ ist meist der einzige Hinweis, dass die heimlich lebende, dämmerungs- und nachtaktive Waldschnepfe anwesend ist (SÜDBECK ET AL. 2005).

Präsenz-/Absenz-Nachweise

Die Waldschnepfenerfassungen fanden in den Jahren 2020 bis 2022 in der „Gellener Torfmöörte“ statt, einem Gebiet aus Restflächen eines naturnahen Hoch- und Übergangsmoores (Abb. 8). Eine Betreuungserlaubnis zur Durchführung der Freilandtests liegt nach Absprache mit den zuständigen unteren Naturschutzbehörden sowie mit dem Niedersächsischen Forstamt für die gesamte Projektlaufzeit vor.

Ziel der Erfassungen in den ersten Projektjahren war es, möglichst viele Waldschnepfenrufe als Trainingsmaterial zu generieren. Dazu wurden die Geräte an potenziell hochfrequentierten Bereichen des Untersuchungsgebiets verteilt. Parallel erfolgten Erfassungen durch Kartiererninnen und Kartierer, um den manuellen Nachweis der Rufe auf den Aufnahmen zu erleichtern.

Darüber hinaus dienten die herkömmlichen Erfassungen zur weiteren Eingrenzung von stärker frequentierten Bereichen des Untersuchungsgebiets. Es wurden gesonderte Aufnahmen in diesen Teilbereichen durchgeführt, um die Lokalisation der Waldschnepfenrufe zu testen.

Als erstes Versuchsdesign wurden mehrere Geräte in geringem Abstand zueinander aufgestellt (ca. 100 m), anschließend wurde händisch überprüft, auf welchen Geräten einzelne Waldschnepfenrufe nachweisbar sind (akustischer Nachweis sowie optischer Nachweis über Spektrogramm). Die Entfernung der Flüge zu den Geräten wurde mit Hilfe parallel stattfindender Erfassungen durch Kartierer abgeschätzt. Mit Hilfe dieses Versuchsdesigns sollten erste Einschätzungen zur Erfassungsreichweite der Geräte getätigt werden.

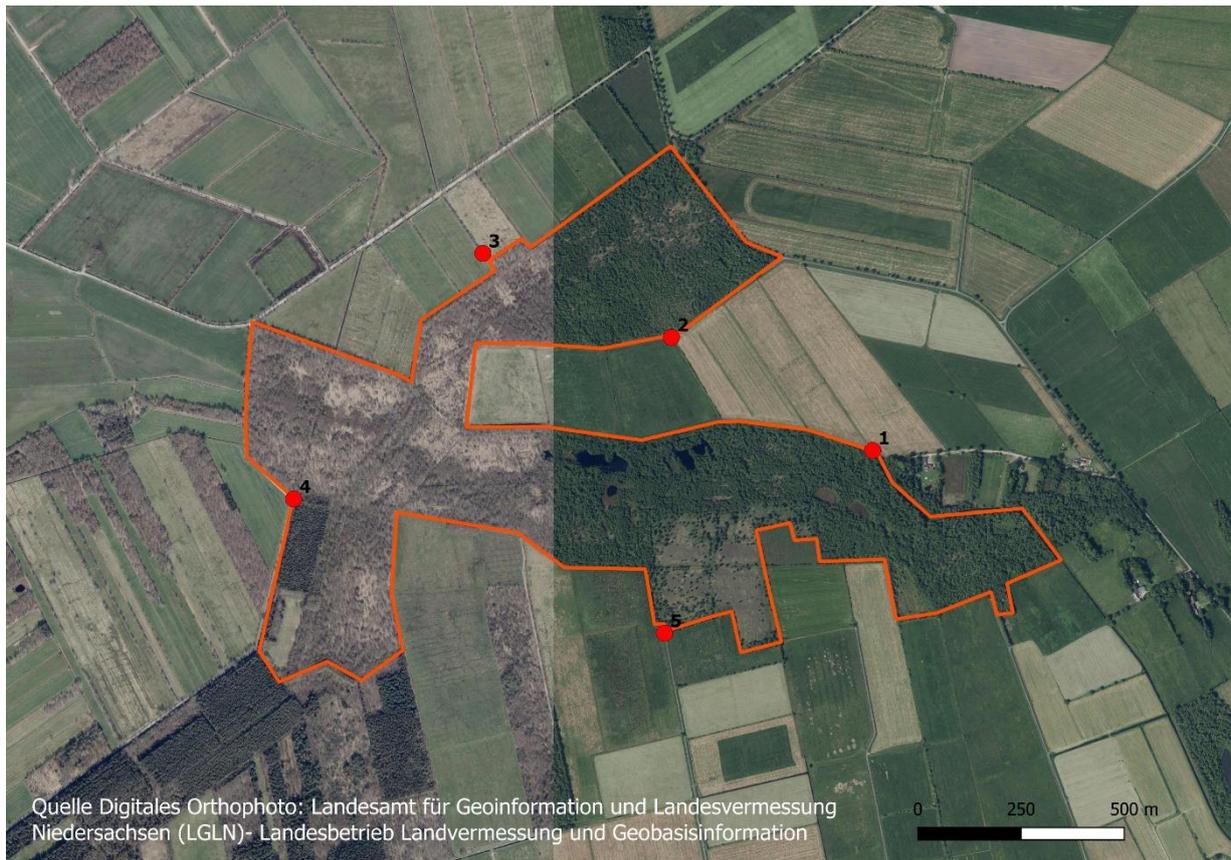


Abbildung 8: Waldschnepfen Untersuchungsgebiet "Gellener Torfmöörte" und Verteilung der Beobachtungspunkte

Lokalisation mit einem Mikrofon-Array

Im Zeitraum 13. bis 15. Juni 2022 erfolgten weiterführende Tests zur Lokalisation von Waldschnepfenrufen. Aufgrund der Rufaktivität während des Fluges, ist es mit herkömmlichen Erfassungen äußerst schwierig, möglichst exakte Verortungen von einzelnen Rufereignissen zu leisten, die als Referenz für die Auswertungen mittels Lokalisationsalgorithmus dienen sollen. Basierend auf den Erkenntnissen der Flugaktivitätsverteilung aus den ersten Projektjahren wurde eine Teilfläche nördlich des Beobachtungspunktes 4 (Abbildung 8) ausgewählt, auf der eine hohe Rufaktivität zu erwarten war.

Der Versuchsaufbau zur akustischen Peilung mittels Mikrofonarray entspricht in abgewandelter Form, dem Versuchsaufbau, der bereits seit dem ersten Projektjahr zur Lokalisation von Wachtelkönigrufen genutzt wird (Frommolt & Tauchert, 2014). Für die Lokalisation im dreidimensionalen Raum wurden 5 Mikrofone genutzt, die kreuzförmig angeordnet waren, mit einem Mikrofon im Zentrum des Kreuzes. Die Entfernungen zwischen den Mikrofonen wurden mit Maßband vermessen und die Ausrichtung mit einem Präzisionskompass korrigiert. Mit einem Sechskanalrecorder (TASCAM DR680) erfolgte die synchrone Aufzeichnung der Tonspuren. Der Laufzeitunterschied der akustischen Signale wurde mit Hilfe der Software SASLab Pro ermittelt. Der Standort des rufenden Vogels wurde dann auf der Grundlage der Laufzeitunterschiede unter Einbeziehung der Temperaturdaten mittels hyperbolischer Berechnungen mit einem R-Skript ermittelt.

Um die Rufe während der sporadisch stattfindenden Überflüge optimal zu nutzen, kamen insgesamt maximal sieben DeViSe-Systeme gleichzeitig zum Einsatz. Die Geräte wurden in unterschiedlichen Entfernungen zu den Richtmikrofonen platziert (Abb. 9), mit dem Ziel zu ermitteln, auf welchen Systemen die erfassten Rufe noch nachweisbar sind und ob eine Richtungsbestimmung möglich ist. Als Referenz dienen die Aufnahmen des Mikrofonarrays.

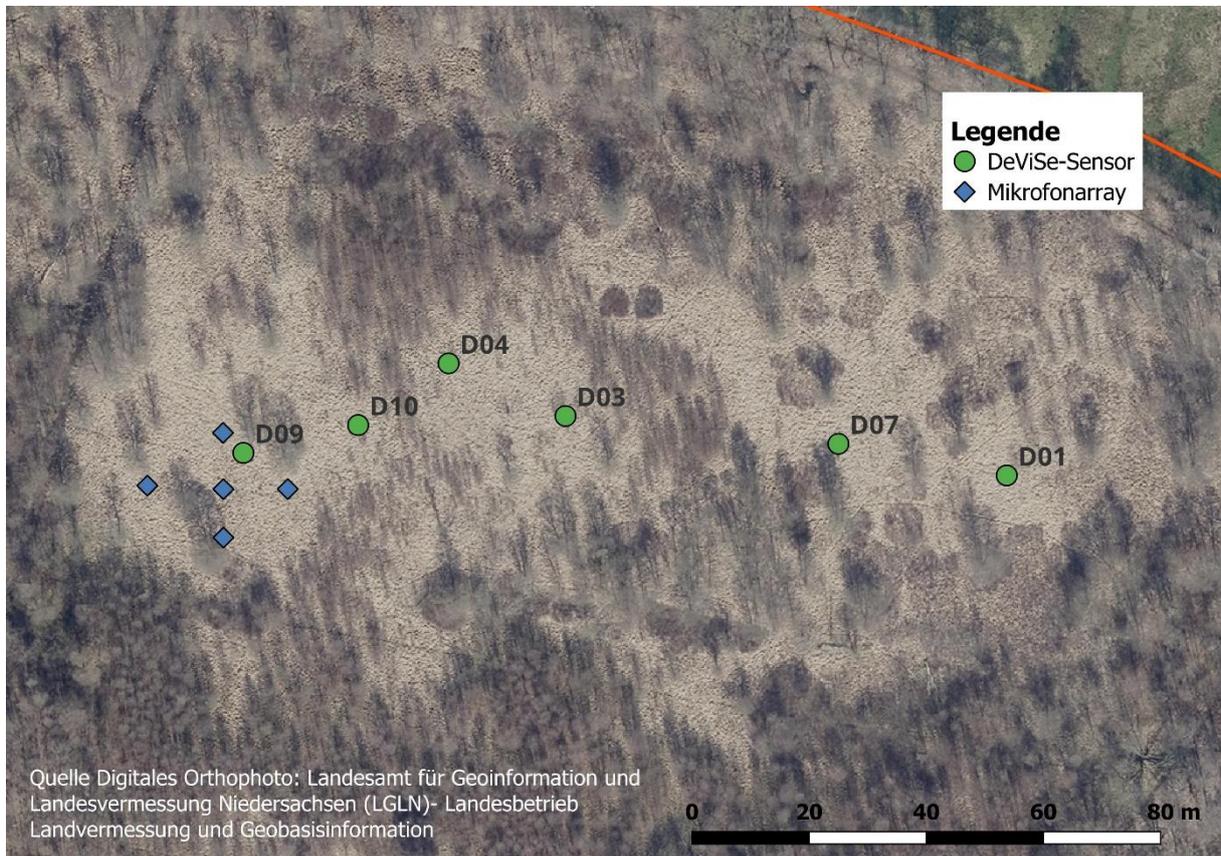


Abbildung 9: Beispielhafter Aufbau der Test zur Lokalisation von Waldschnepfenrufen (Datum 16.06.2022)

Untersuchungen am Wachtelkönig

Der Wachtelkönig diente als Modellart für die Erfassung stationär rufender Vogelarten. Freilanduntersuchungen zur Lokalisation des Wachtelkönigs wurden im Nationalpark Unteres Odertal durchgeführt (Abb. 10). In insgesamt 35 Nächten wurden Tonaufzeichnungen der Art erstellt (Tabelle 5). Ziel der Untersuchungen war, empirisches Datenmaterial für die Bewertung der Erfassungsgenauigkeit und Reichweite des Systems zu sammeln. Dazu erfolgte:

- Kartierung rufender Tiere
- Eine nahezu kontinuierliche Aufzeichnung der Geräuschkulisse im Kerngebiet
- Aufzeichnungen mit DeViSe-Sensoren in unterschiedlicher räumlicher Anordnung
- Lokalisation einzelner rufender Tiere mit einem linearen Mikrofon-Array
- Aufzeichnung mit kalibrierter Messtechnik und Bestimmung des Schalldruckpegels
- Aufzeichnungen mit Vierkanalrecorder zur Verifizierung



Abbildung 10: Wachtelkönighabitat im Unteren Odertal

Tabelle 3: Übersicht über Freilandarbeit im Nationalpark Unteres Odertal

Datum	Ort	Anzahl Sensoren	Ortung mit Line Array	Pegelmessung	Vierkanal
14.5.2020	Polder B	1			
20.5.2020	Polder B	1			
3.6.2020	Polder B	1			
8.7.2020	Polder B	1			
14.5.2021	Polder B	nur Beobachtung			
15.5.2021	Polder 6	0			+
16.5.2021	Polder 6	1	+	+	+
17.5.2021	Polder 6	1	+	+	+
18.5.2021	Polder 10	1			
19.5.2021	Polder B	1	+	+	+
5.6.2021	Polder B	1			
10.6.2021	Polder B	1	+	+	
16.6.2021	Polder B	3	+	+	
23.6.2021	Polder B	3	+	+	
15.7.2021	Polder B	4	+	+	
17.5.2022	Polder A	3			+
18.5.2022	Polder A	2			
3.6.2022	Polder A	3	+		
7.6.2022	Polder B	9	+		
8.6.2022	Polder A	7			+
21.6.2022	Polder A	4	+	+	
4.7.2022	Polder A	4	+	+	+
13.5.2023	Polder 10	1			
17.5.2023	Polder 10	1			
22.5.2023	Polder 10	6	+		
23.5.2023	Polder 10	nur Beobachtung			
24.5.2023	Polder 10	5			
25.5.2023	Polder 10	4			+
3.6.2023	Polder B	2			+
8.6.2023	Polder A	1	+		
9.6.2023	Polder A	1	+		
17.6.2023	Polder A	2	+		+
20.6.2023	Polder A	2	+		+
25.6.2023	Polder A	2	+		+
6.7.2023	Polder A	1	+		+
12.7.2023	Polder A	1			+
20.7.2023	Polder A	nur Beobachtung			+
25.7.2023	Polder B	1			

Kartierung des Wachtelkönigs

Der Wachtelkönig wird im Unteren Odertal im Rahmen des Wiesenbrüterschutzes regelmäßig kartiert. Die Erfassungen erfolgen durch Synchronzählungen im gesamten Gebiet des Nationalparks an einem Wochenende Mitte Mai und Mitte Juni. Dabei werden während nächtlicher Begehungen durch ehrenamtliche Mitarbeiter die Wachtelkönige von den Wegen aus verhört und der geschätzte Standort des rufenden Vogels auf einer Karte verzeichnet. Da während der Erfassungen das nähere Untersuchungsgebiet nur kurz tangiert wird, wurden während der Freilandarbeiten eigene Kartierungen vorgenommen, d. h. die geschätzte Position jedes verhörten Tieres wurde in einer Karte verzeichnet.

Kontinuierliche Erfassung

Zur Erfassung der Rufaktivität über die gesamte Brutsaison wurden 2021 vom 29.04. (vor Ankunft der Tiere im Brutgebiet) bis zum 10.08. (Mahd der Flächen) quasi kontinuierlich Aufzeichnungen mit 5 Wildlife Acoustics SM4 Recordern erstellt (Abbildung 11) Die Recorder waren so verteilt, dass eine repräsentative Fläche des Untersuchungsgebietes komplett abgedeckt wurde. Aufgezeichnet wurde mit 48 kHz Abtastrate und 16 bit Datentiefe in einem Zeitregime 5 min Aufnahme - 10 min Pause.



Abbildung 11: Wildlife Acoustics SM4 Recorder (links) und Standorte der Recorder im Polder B des Unteren Odertals. Die Standortwahl erlaubte eine flächige Abdeckung eines repräsentativen Teiles des Untersuchungsgebietes

Bedingt durch Probleme mit der Firmware der SM4-Recorder, die seitens des Herstellers erst nach Ende der Untersuchungen behoben wurden, kam es leider zu Ausfällen (Abb. 12). Nur ein Recorder zeichnete ohne Ausfälle auf. Ein Recorder musste frühzeitig außer Betrieb genommen werden, da die Fläche für die Nutzung freigegeben wurde. Insgesamt wurden 2021 mit den fünf SM4-Recordern 3230 Stunden Audiomaterial aufgezeichnet.

2022 konnte mit fünf SM4-Recordern vom 9.05. bis 24.07. ohne Ausfälle aufgezeichnet werden (Abb. 13). Ein Recorder wurde erst am 16.05. gestartet. Die Aufnahmen erfolgten nur im Zeitraum von 30

min vor Sonnenuntergang bis 30 min nach Sonnenaufgang im gleichen Aufnahmeregime wie 2021. Insgesamt wurden 1367 Stunden aufgezeichnet.

2023 wurden für eine kontinuierliche Erfassung der Rufaktivität bereits die Devise-Sensoren genutzt (Abb. 14, 15). Die Sensoren waren vom 8.06. bis zum 25.07. in Betrieb. Aufgezeichnet wurde jede Nacht in der Phase der akustischen Hauptaktivität des Wachtelkönigs von 23:00 Uhr bis 04:00 Uhr jeweils jede 10-te Minute. Die Energieversorgung der Sensoren wurde durch externe Bleiakkus gewährleistet.

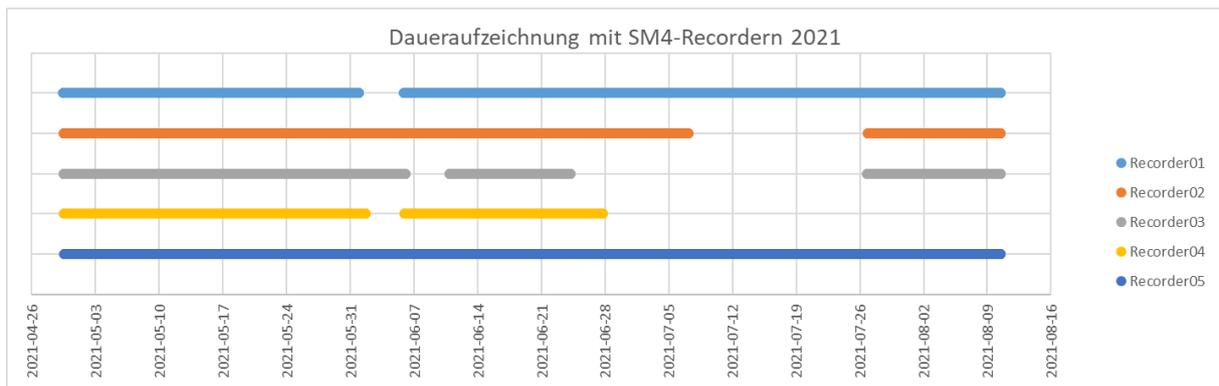


Abbildung 12: Zeitschema der Aufzeichnungen mit den Wildlife Acoustics SM4 Recordern im Jahre 2021. Ausfälle waren technisch bedingt. Recorder 4 musste wegen Bewirtschaftung der Fläche vorzeitig abgebaut werden

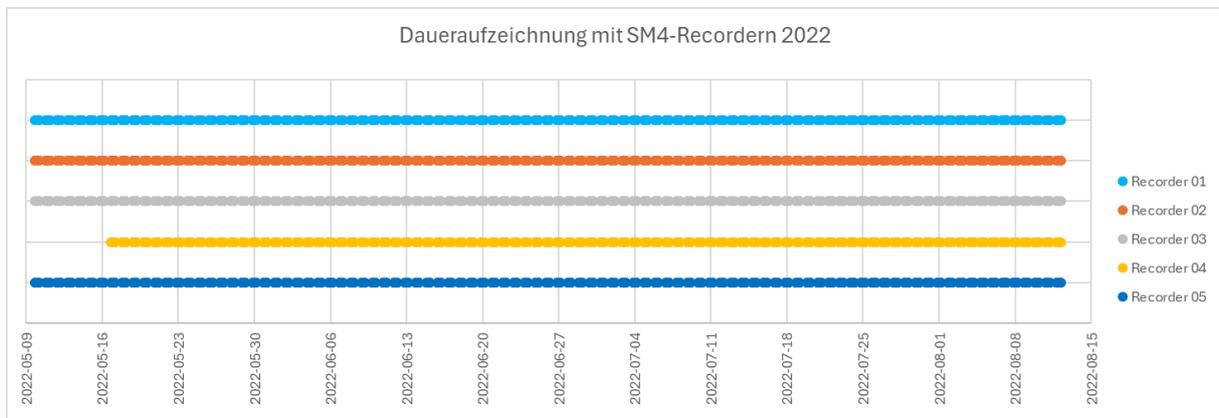


Abbildung 13: Zeitschema der Aufzeichnungen mit den Wildlife Acoustics SM4 Recordern im Jahre 2022

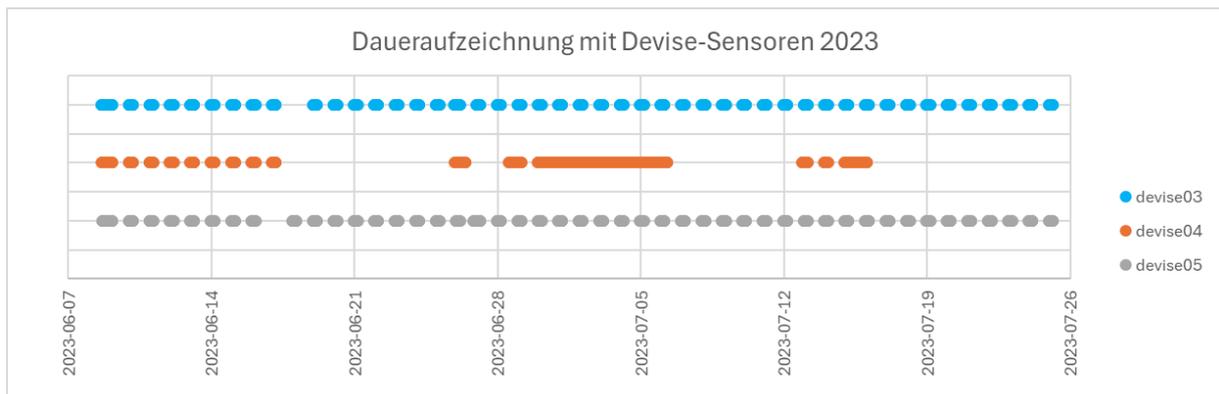


Abbildung 14: Kontinuierliche Aufzeichnungen DeViSe-Sensoren im Jahre 2023. Aufgezeichnet wurden nur in den Nachtstunden



Abbildung 15: Daueraufzeichnung mit DeViSe-Sensor. Der auf Stativ in 1,80 m Höhe befindliche Sensor wurde mit einem Pfahl gesichert. Die Energieversorgung erfolgte über eine externe Autobatterie

Aufzeichnungen mit DeViSe-Sensoren in unterschiedlicher räumlicher Anordnung

Im Unteren Odertal wurden insgesamt 227 Stunden Audiomaterial mit den DeVise-Sensoren aufgezeichnet. Davon entfallen 75 Stunden auf die Langzeitaufzeichnungen im Jahre 2023.

Zur Generierung von Datenmaterial für die Validierung der Richtungsbestimmung durch die DeVise-Sensoren wurden zwei Ansätze verfolgt. Im ersten Ansatz wurden mit einem einzelnen Sensor die langanhaltenden Rufreihen eines Tieres von unterschiedlichen Positionen aus aufgezeichnet. Zur Ermittlung der exakten Position des Tieres (jedes einzelnen Rufes) wurde über die gesamte Aufzeichnungszeit mit dem linearen Mikrofonarray aufgezeichnet. Dieser Ansatz liefert gleichzeitig auch Informationen über die Reichweite des Systems.

Ein zweiter Ansatz sollte eine Lokalisation der Tiere auf der Grundlage der Informationen von mindestens zwei Sensoren ermöglichen. Dazu erfolgte eine synchrone Aufzeichnung mit mehreren Sensoren. Dieser Ansatz wurde u.a. während der Langzeiterfassung im Jahre 2023 gewählt.

Lokalisation einzelner Tiere mit linearen Mikrofonarray

Im Interesse der Überprüfung der Ergebnisse der Richtungsbestimmung durch die DeVise-Sensoren und zur Abschätzung der Reichweite des Erfassungssystems erfolgte die Lokalisation einzelner Tiere auf der Grundlage von Aufzeichnungen mit einem linearen Mikrofonarray (Abb. 16). Dazu wurden möglichst nahe zum rufenden Vogel drei Mikrofone exakt in einer Linie positioniert. Die Entfernungen zwischen den Mikrofonen wurden mit Maßband oder Laserentfernungsmesser (Milesee S2) vermessen. Mit einem Vierkanalrecorder (Edirol R 44) erfolgte die synchrone Aufzeichnung der Tonspuren. Der Laufzeitunterschied der akustischen Signale wurde mit Hilfe der Software SASLab Pro ermittelt. Der Standort des rufenden Vogels wurde dann auf der Grundlage der Laufzeitunterschiede unter Einbeziehung der Temperaturdaten mittels hyperbolischer Berechnungen mit einem R-Skript ermittelt (Abb. 17). Die hier angewandte Methode setzt aber voraus, dass ein Beobachter vor Ort sein muss, da im Interesse der Messgenauigkeit die Mikrofonlinie so aufgebaut werden soll, dass der Winkel zu der Linie „Rufendes Tier – mittleres Mikrofon“ möglichst nahezu 90° betragen sollte und apriori-Wissen vorausgesetzt wird, ob das Tier vor oder hinter der Linie ruft.



Abbildung 16: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Reichweite eines DeVise-Sensors im Unteren Odertal. Mittels eines linear angeordneten Mikrofon-Arrays erfolgte die Ortung eines Wachtelkönigs mit paralleler Aufzeichnung des Schalldruckpegels. Die roten Pfeile kennzeichnen die Positionen der Mikrofone des Linienarrays.

Insgesamt konnten 17 Tiere damit geortet. Ergänzend zu den Messungen mit dem linearen Array wurde an einzelnen Nächten eine Peilung mit einem Vierkanalarray bestehend aus 4 cardioiden Mikrofonen, die kreuzförmig angeordnet waren (FROMMOLT & TAUCHERT 2014).

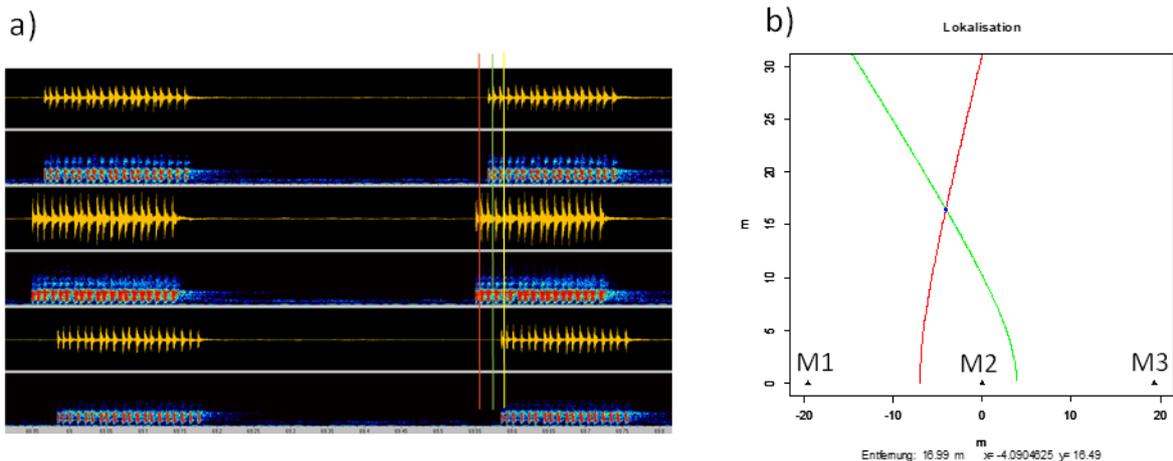


Abbildung 17: Ermittlung des Rufortes des Wachtelkönigs mit Hilfe eines Arrays aus drei Mikrofonen in linearer Anordnung. a) Laufzeitunterschiede eintreffender Rufe zwischen den drei Audiokanälen, ermittelt mit SASLab Pro. b) Bestimmung des Aufenthaltsortes mittels Hyperbelberechnung. M1, M2, M3 – Positionen der Mikrofone.

Bestimmung des Schalldruckpegels

Zur Bestimmung des Schalldruckpegels der Rufe wurde während der Aufnahmen mit dem linearen Mikrofonarray auf einer vierten Spur mit einem Messmikrofon (MK250 mit Vorverstärker MV 220,

Microtech Gefell) aufgezeichnet, das sich 15 cm neben dem mittleren Mikrofon befand. Vor jeder Messung wurde ein von einem Kalibrator (Sound Level Calibrator 5000, METRA, Radebeul) generierter 1 kHz Sinuston mit 94 dB rms aufgezeichnet. Zur Reduzierung niederfrequenter Nebengeräusche unterhalb der Ruffrequenz der Wachtelkönige wurde ein 1 kHz Hochpassfilter angewandt. Für die Auswertung wurden nur Rufe berücksichtigt, die einen Signal-Rauschabstand von mindestens 20 dB hatten. Der Schalldruckpegel wurde als Spitzenpegel (maximale Schalldruckamplitude) bestimmt. Unter Berücksichtigung sphärischer Ausbreitungsverluste wurde der Spitzenpegel für eine Entfernung von 1 m vom rufenden Tier berechnet.

Untersuchungen an Heuschrecken

Erste Heuschreckenaufnahmen mit dem DeVise-Sensor wurden im Juli 2021 auf Hiddensee erstellt. Im Unteren Odertal wurde das Große grüne Heupferd regelmäßig aufgezeichnet. Die Mehrkanalaufzeichnungen der Heuschrecken zeigten eine sehr komplexe Geräuschkulisse mit starken Überlappungen mehrerer Tiere sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich. Auf Grund dieser Komplexität wurde im Projekt Abstand davon genommen, Erkennungs- und Lokalisationsalgorithmen für diese Artengruppe zu entwickeln.

4 Projektergebnisse

4.1 Weiterentwicklung des Sensorsystems DeVise

Die technisch notwendigen Änderungen am Sensor, Verkleinerung des Gehäuses so wie der Umbau der Mikrofonierung wurden abgeschlossen. Der Sensor liegt nun in der Stückzahl 11 vor und ist allen Projektpartnern übergeben worden. Offene Punkte gibt es noch im Bereich der Gestaltung der Nutzeroberfläche sowie der Start- und Kalibrierungsroutine des Sensors im Feld.

4.2 Inertialsensorik im DeVise System

Im Zuge der beobachteten Driftproblematik in der Schätzung der Sensorausrichtung wurde die Präzision verschiedener Inertialsensoren hinsichtlich ihrer Ausrichtungsschätzung untersucht. Dabei sind die Standardfehler aller Sensoren im kalibrierten Zustand zu vernachlässigen, so dass die Wahl des aktuellen Sensors BNO055 als sinnvoll erachtet wird. Um etwaige Drifts im Feld auszuschließen, sollte in einem Zeitfenster nach der Sensoraufstellung die Ausrichtungsschätzung gemittelt und der Schätzwert konstant gehalten werden. Für dieses Vorgehen sollte in einem nächsten Schritt das Umstellen des gesamten Sensorsystems robust erkannt werden, so dass eine erneute Schätzung erfolgen kann.

4.3 Entwicklung Mustererkennung und Lokalisationsalgorithmen

Arterkennung

Die Arterkennung wurde im Laufe des Projekts ausgiebig unter Praxisbedingungen getestet. Hierbei lag der Fokus insbesondere auf der Verifizierung der Erkennungsgenauigkeit und korrekten zeitlichen Detektion der Rufaktivität für die im Projekt relevanten Arten Wachtelkönig und Waldschnepfe.

Aus Aufnahmen des Sensorsystems wurden umfangreiche Testsets erstellt, die unterschiedlich komplexe Aufnahmeszenarien abdecken (z.B. hinsichtlich Entfernung und Lautstärke des rufenden Tiers, Wetterbedingungen, Hintergrundgeräusche, etc.). Die Testsets wurden von Experten annotiert und bildeten die Grundlage zum Vergleich der Detektionsgenauigkeit der Arterkennungsalgorithmen. Neben den im Projekt verwendeten Klassifikatoren BirdID-Europe254 und SELD-NET wurde auch eine Variante von BirdNET (<https://birdnet.cornell.edu>) als Benchmark zum Vergleich mit einbezogen. BirdNET ist ebenfalls ein auf neuronale Netze basierender Algorithmus zur Arterkennung und wurde an der TU Chemnitz in Kooperation mit dem Cornell Lab of Ornithology entwickelt. Der Algorithmus ist für die automatisierte Erkennung von Vögeln in der ökoakustischen Gemeinschaft weit verbreitet und wird bereits in diversen Projekten für bioakustische Analysen verwendet.

Am Beispiel des Wachtelkönigs zeigt sich unter Einbeziehung aller Testaufnahmen, dass alle betrachteten Klassifikatoren gute bis sehr gute Ergebnisse bei der Erkennung dieser Art erzielen (Tab. 4, Abb. 18). Insbesondere bei guten Aufnahmen mit geringer Komplexität (laute Rufe, wenig Hintergrundgeräusche) wird der Wachtelkönig mit einer Average Precision von fast 100 % sehr gut erkannt (Abb. 19). Unter schwierigeren Aufnahmebedingungen zeigt sich jedoch, dass SELD-Net und BirdNET etwas

schlechter abschneiden als BirdID. BirdID-Europe254 kann den Wachtelkönig auch in komplexen Aufnahmen mit einer Average Precision von ca. 99 % erkennen, während BirdNET und vor allem SELD-NET hier deutlich fehlerhafter arbeiten (Abb. 20).

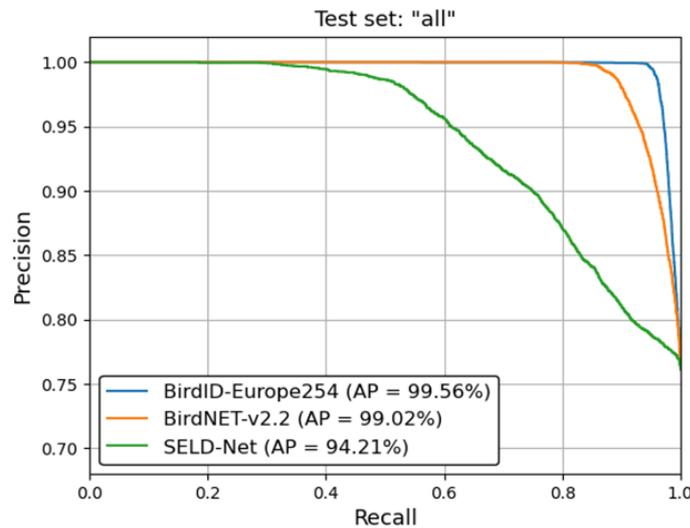


Abbildung 18: Precision-Recall Kurven für die Klassifikatoren BirdID-Europe254, BirdNET-v2.2 und SELD-NET unter Verwendung aller Testdaten

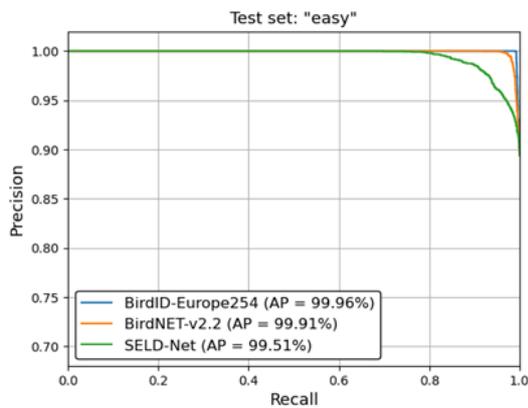


Abbildung 19: Precision-Recall Kurven für die Klassifikatoren - einfaches Testset

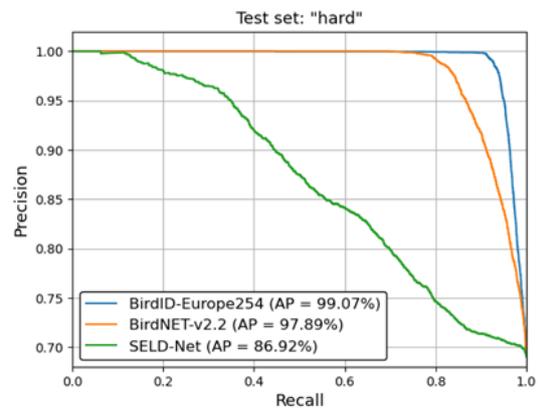


Abbildung 20: Precision-Recall Kurven für die Klassifikatoren - schwieriges Testset

Tabelle 4: Übersicht und Statistik für den für die Validierung genutzten Datensatz. Alle Aufnahmen wurden 2021 mit den DeViSe-Sensoren erstellt

	All	Subset easy	Subset hard
# Dateien	228	81	147
# Abschnitte (5s)	14172	4941	9231
# Positiv	10792	4418	6374
# Negativ	3380	523	2857
# Sensoren	5	5	5
# Tage	8	8	8
Dauer	19h14m	6h8m	12h6m
Statistik BirdID (Schwellwert $p > 0.5$)			
True Positive	9946	4362	5584
True Negative	3373	523	2850
False Positive	7	0	7
False Negative	846	56	790
Precision	99,93%	100%	99,87%
Recall	92,22%	98,73%	87,51%

Lokalisation

Zur Bewertung der Genauigkeit des SELD-Net wurde neben den akustischen Freilandtests, noch eine Lautsprechermessung durchgeführt. Diese bietet den Vorteil, dass die Genauigkeit systematisch für alle Richtungen zwischen Vogelruf und DeViSe-Sensor getestet werden kann. Mit den Freilandtests ist dies in der Form nicht möglich, da keine Aufnahmen für alle Richtungen vorliegen und auch nicht für jede Aufnahme die richtige Richtung zwischen DeViSe-Sensor und Wachtelkönig bestimmt werden konnte.

Der Lautsprechertest wurde folgendermaßen durchgeführt: Auf einer Wiese wurde analog zu den Freilandaufnahmen ein DeViSe-Sensor auf einem Stativ aufgestellt. In ca. 10m Entfernung wurde ein Lautsprecher auf den Boden gelegt und die Wachtelkönigrufe abgespielt (Abb. 21). Der Sensor wurde in 5° Schritten gedreht und für jede Richtung erfolgte eine Aufnahme von ca. 1 Minute. Für die Drehung wurde ein Stativ mit Drehteller verwendet (Abb. 22). Dabei wurde der Sensor von 0° bis 180° in 5° Schritten gedreht. Da die im Sensor verbaute Mikrofonanordnung symmetrisch ist, wurde auf eine komplette 360°-Drehung in 5° Schritten verzichtet, da es nicht erwartbar war, dass die 2. Hälfte von 180 bis 360°, bzw. nachfolgend als 0° bis -180° bezeichnet, sich wesentlich in der Schätzgenauigkeit unterscheidet. Die Messung in diesem Bereich erfolgte in wesentlich größeren Schritten, um auszuschließen, dass es eine Seitenverwechslung vorliegt.

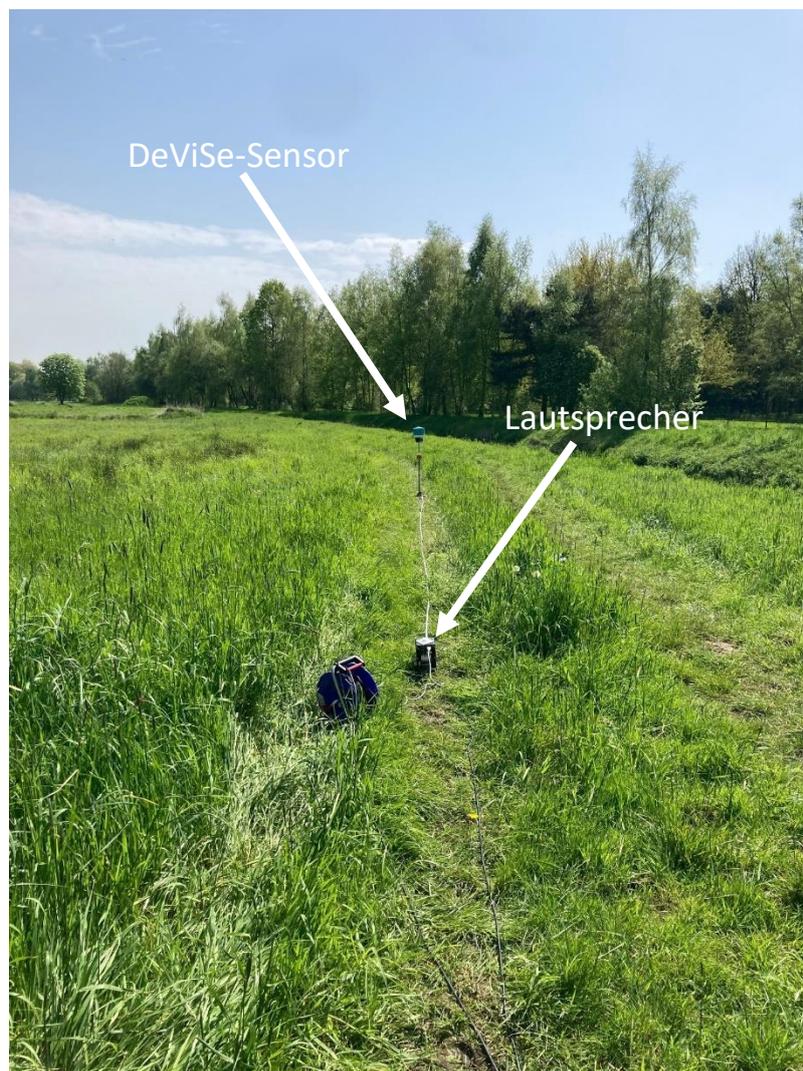


Abbildung 21: Testmessung mit einem Lautsprecher zur Bewertung der Lokalisationsgenauigkeit. Der Sensor wurde auf üblicher Höhe angebracht, wie bei den akustischen Freilandtests. Über den Lautsprecher wurden Wachtelkönigaufnahmen abgespielt und mit Hilfe des Sensors aufgenommen. Für die Ausrichtung des Sensors wurde ein Stativ mit Drehteller verwendet (vgl. Abb. 24). Der Abstand zwischen Lautsprecher und Sensor betrug 10m



Abbildung 22: DeViSe-Sensor mit Stativ bei der Lautsprechermessung. Im unteren Teil ist der Drehteller zu sehen, mit dem die Ausrichtung des Sensors eingestellt werden kann.

In Abbildung 23 sind die Ergebnisse der Lautsprechermessung dargestellt. Die obere Teilgrafik zeigt die geschätzte Richtung durch das SELD-Net in Abhängigkeit von der echten Richtung, also der Richtung, die bei der Messung auf dem Drehteller eingestellt wurde. In der unteren Teilgrafik ist der Schätzfehler, d.h. die Differenz zwischen der geschätzten und der echten Richtung dargestellt. Jeder Datenpunkt in der Grafik zeigt dabei eine Schätzung über einen 5s langen Ausschnitt der Aufnahmen, was der Verarbeitungslänge des SELD-Net entspricht. Es ist erkennbar, dass es keine groben Schätzfehler gibt und der Schätzfehler überwiegend in einem Bereich von -5 bis 5° (vgl. untere Teilgrafik) liegt. Es ist ebenfalls erkennbar, dass die Schätzergebnisse für den Bereich 0 bis -180° sich nicht wesentlich vom Bereich 0 bis 180° unterscheiden. Seitenverwechslungen liegen demnach nicht vor. Die einzige grobe Auffälligkeit betrifft den Bereich von 170 , 175 , 180 , -170 und -175° . Diese Richtungen werden alle auf ca. -170° geschätzt. Insgesamt ergibt sich über alle Richtungen mittlerer Schätzfehler von 3.3° und eine Standardabweichung von 3.2° .

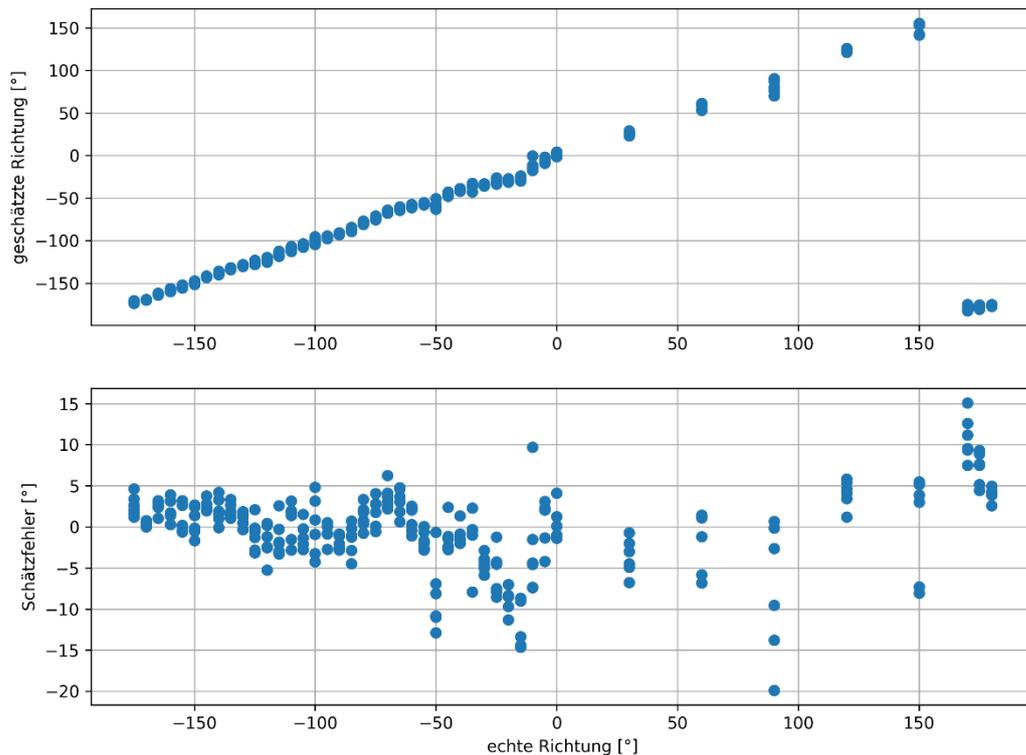


Abbildung 23: Ergebnisse des Lokalisationstests mit einem Lautsprecher. Die obere Teilgrafik zeigt die geschätzte Richtung als Funktion der echten Richtung. In der unteren Teilgrafik ist die Abweichung der geschätzten Richtung von der echten Richtung dargestellt.

Kombination von Arterkennung und Lokalisation

Auf dem DeVise-Sensor wurden BirdID-Europe254 und SELD-NET zur kombinierten Arterkennung und Lokalisation integriert. Theoretisch bietet das SELD-Net bereits eine kombinierte Detektion und Lokalisation von Wachtelkönigen, aber wie bereits im Abschnitt Arterkennung innerhalb dieses Kapitels beschrieben, erzielt BirdID-Europe254 im Vergleich zu SELD-NET robustere Detektionsergebnisse. Die zeitliche Detektion der Rufaktivität durch BirdID-Europe254 wird dabei als Vorauswahl genutzt, um die nachträgliche Lokalisation der Tiere mittels SELD-NET zu ermöglichen. Diese Kombination der Algorithmen führt zu einer signifikanten Reduzierung des Ressourcen- und Energieverbrauchs des Sensorsystems, da die rechenintensive Lokalisation nur für Audioabschnitte mit tatsächlicher Rufaktivität durchgeführt werden muss. Die höhere Rechenintensität der Lokalisation ist dabei vor allem auf die mehrkanalige Verarbeitung zurückzuführen, während für die Arterkennung nur ein Mikrofon benötigt. Die Speicherung der Ergebnisse der Arterkennung und Lokalisation erfolgt in separaten json- bzw. txt-Files (vgl. Tabellen 5 und 6). Hier wird für die 5-sekündigen Abschnitte der jeweils 1 Minute dauernden Aufnahmen eine Wahrscheinlichkeit für die Detektion eines Wachtelkönigs gespeichert oder die geschätzte Richtung. In Abbildung 24 ist noch das vollständige Prozessdiagramm des DeVise-Sensors dargestellt. Im oberen Teil wird dies für einen Einzelsensor beschrieben. Hier ist aufgelistet, wie die Algorithmen miteinander kombiniert sind und welche Daten abgelegt werden. Der untere Teil beschreibt

die Verarbeitung im Sensornetz, um die Position eines Wachtelkönigrufes per Kreuzpeilung zu bestimmen. Hierbei ist zu beachten, dass die Umsetzung eines Sensornetzes im Projekt nicht realisiert werden konnte. Die Kreuzpeilung wurde durch manuelle Zusammenführung und Synchronisation der Daten mehrerer Sensoren ermöglicht und deren Funktionsfähigkeit konzeptionell nachgewiesen. Für eine automatisierte Positionsbestimmung müssten die Sensoren allerdings in ein Sensornetzwerk integriert werden, um die Sensordaten an einer zentralen Rechenstelle zusammenzuführen.

Tabelle 5: Auszug der Ergebnisse der Mustererkennung, auf dem Sensor als json-File gespeichert. Einminütige Aufnahmen wurden in 12 Intervalle je 5 Sekunden unterteilt. Im Ergebnis wird für jedes Intervall ein Wahrscheinlichkeitswert für Rufe des Wachtelkönigs ermittelt. Ist der Wert größer 0,5 erfolgt eine Richtungsschätzung (Tabelle 6).

Datum / Uhrzeit	Int01	Int02	Int03	Int04	Int05	Int06	Int07	Int08	Int09	Int10	Int11	Int12
2023-06-30T23-02-10	0,90	0,95	0,95	0,94	0,93	0,89	0,86	0,88	0,85	0,89	0,92	0,67
2023-06-30T23-12-15	0,85	0,71	0,42	0,56	0,94	0,45	0,94	0,90	0,92	0,94	0,93	0,94
2023-06-30T23-22-20	0,50	0,84	0,90	0,84	0,52	0,26	0,20	0,74	0,91	0,74	0,79	0,81
2023-06-30T23-32-25	0,05	0,86	0,91	0,74	0,70	0,09	0,94	0,87	0,92	0,89	0,68	0,10
2023-06-30T23-42-30	0,89	0,90	0,89	0,80	0,91	0,84	0,93	0,93	0,91	0,91	0,88	0,93
2023-06-30T23-52-35	0,94	0,93	0,93	0,90	0,94	0,94	0,93	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94
2023-07-01T00-02-40	0,95	0,94	0,92	0,91	0,91	0,92	0,89	0,93	0,87	0,90	0,94	0,93
2023-07-01T00-12-41	0,91	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,95	0,94	0,94	0,94	0,95	0,95
2023-07-01T00-22-50	0,94	0,94	0,94	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,94	0,91
2023-07-01T00-32-55	0,94	0,92	0,90	0,95	0,94	0,93	0,89	0,94	0,91	0,94	0,94	0,93
2023-07-01T00-43-00	0,95	0,94	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,95	0,94	0,94	0,95
2023-07-01T00-53-05	0,90	0,95	0,93	0,94	0,96	0,92	0,93	0,95	0,92	0,90	0,93	0,93
2023-07-01T01-03-10	0,83	0,92	0,92	0,94	0,88	0,91	0,94	0,94	0,94	0,93	0,94	0,93
2023-07-01T01-13-15	0,90	0,90	0,86	0,86	0,92	0,94	0,76	0,82	0,94	0,92	0,94	0,91

Tabelle 6: Auszug der Ergebnisse der Richtungsschätzung, auf dem Sensor als txt-File gespeichert. Rot hinterlegt sind Zeitintervalle, in denen kein Wachtelkönigruf detektiert wurde, orange Intervalle ohne gültiges Ergebnis für die Richtungsbestimmung.

Datum / Uhrzeit	Int01	Int02	Int03	Int04	Int05	Int06	Int07	Int08	Int09	Int10	Int11	Int12
2023-06-30T23-02-10	196,83	205,38	207,49	212,12	NaN	213,58	211,04	207,72	214,14	214,86	212,13	210,09
2023-06-30T23-12-15	39,74	27,62	NA	NaN	36,30	NA	NaN	40,92	37,71	34,99	30,64	33,62
2023-06-30T23-22-20	310,89	NaN	32,55	NaN	28,60	NA	NA	40,67	32,97	32,36	35,57	32,86
2023-06-30T23-32-25	NA	NaN	37,21	NaN	NaN	NA	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NA
2023-06-30T23-42-30	236,99	36,36	37,22	216,38	62,36	216,28	29,41	29,62	33,69	26,36	29,07	37,59
2023-06-30T23-52-35	26,55	29,56	33,69	23,25	26,67	31,61	32,79	32,71	34,61	34,14	41,89	271,08
2023-07-01T00-02-40	241,24	239,68	250,77	12,37	11,56	291,19	238,83	290,86	351,16	20,20	261,44	9,25
2023-07-01T00-12-41	242,01	13,09	25,89	23,73	343,35	23,05	243,53	31,74	30,46	231,68	228,97	223,99
2023-07-01T00-22-50	240,25	234,11	246,02	244,08	246,03	243,27	247,00	246,64	247,29	248,01	248,43	266,15
2023-07-01T00-32-55	22,11	28,82	26,26	29,69	27,59	27,90	26,23	15,26	16,91	27,77	26,02	330,56
2023-07-01T00-43-00	239,79	241,91	240,41	243,86	245,51	241,26	242,24	240,94	244,87	243,12	240,30	243,86
2023-07-01T00-53-05	238,50	235,90	232,56	230,89	233,62	235,04	236,01	241,82	243,47	238,84	243,64	244,20
2023-07-01T01-03-10	220,15	202,36	214,13	NaN	NaN	NaN	218,62	209,18	NaN	251,53	NaN	332,40
2023-07-01T01-13-15	241,60	235,74	226,86	238,57	229,14	255,00	230,64	232,13	235,07	233,78	239,98	224,60

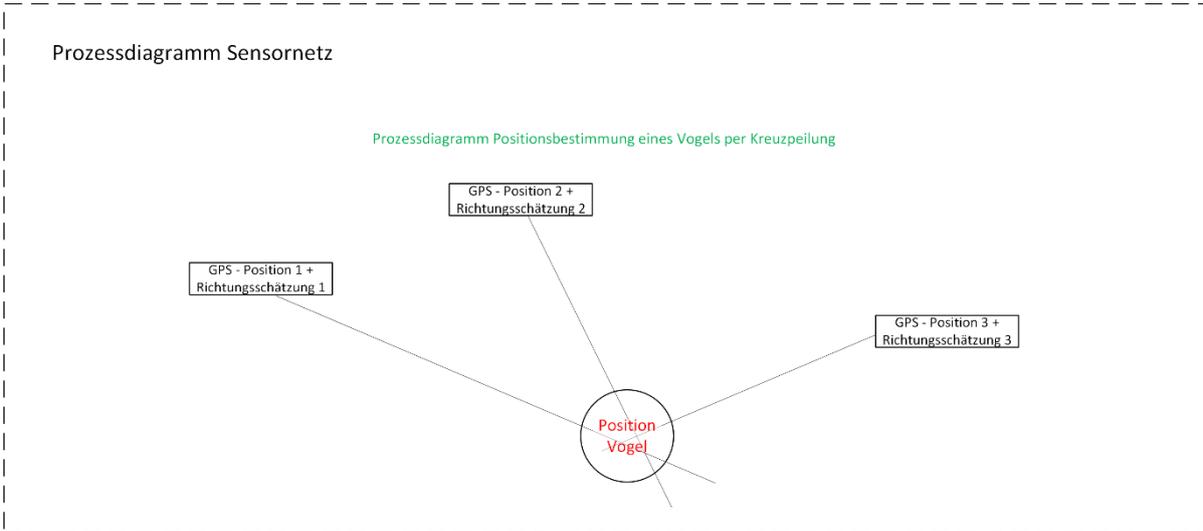
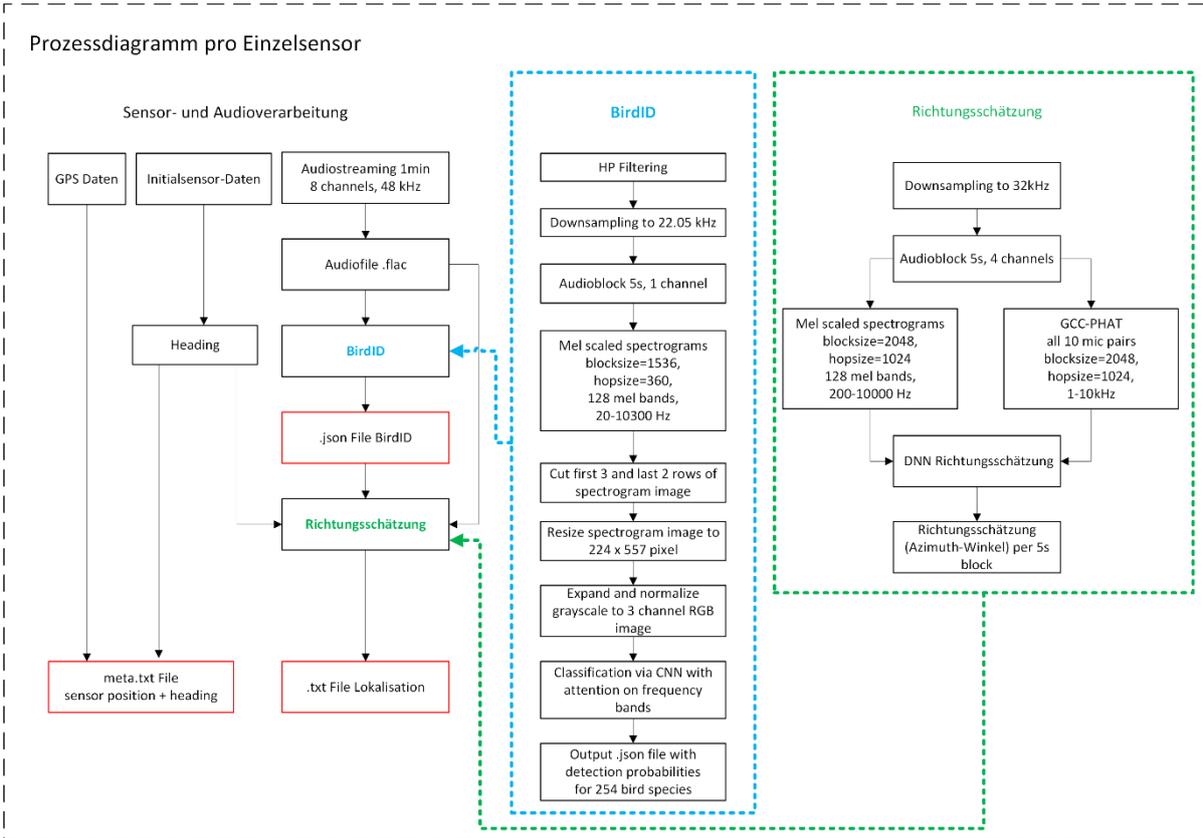


Abbildung 24: Prozessdiagramm des DeVise Sensors

4.4 Freilandtests

Waldschneepfe

Präsenz-/Absenz-Kartierungen

Während der Erfassungstermine konnten über 100 Balzflüge der Waldschneepfe durch Kartierer registriert werden. Dabei wurden rund 800 Rufe (Quorren und/oder Puitzen) mit Hilfe des DeVise-Systems aufgezeichnet. Der Großteil der registrierten Balzflüge fand im Bereich der Beobachtungspunkte 4 und 5 statt (Abb. 25).

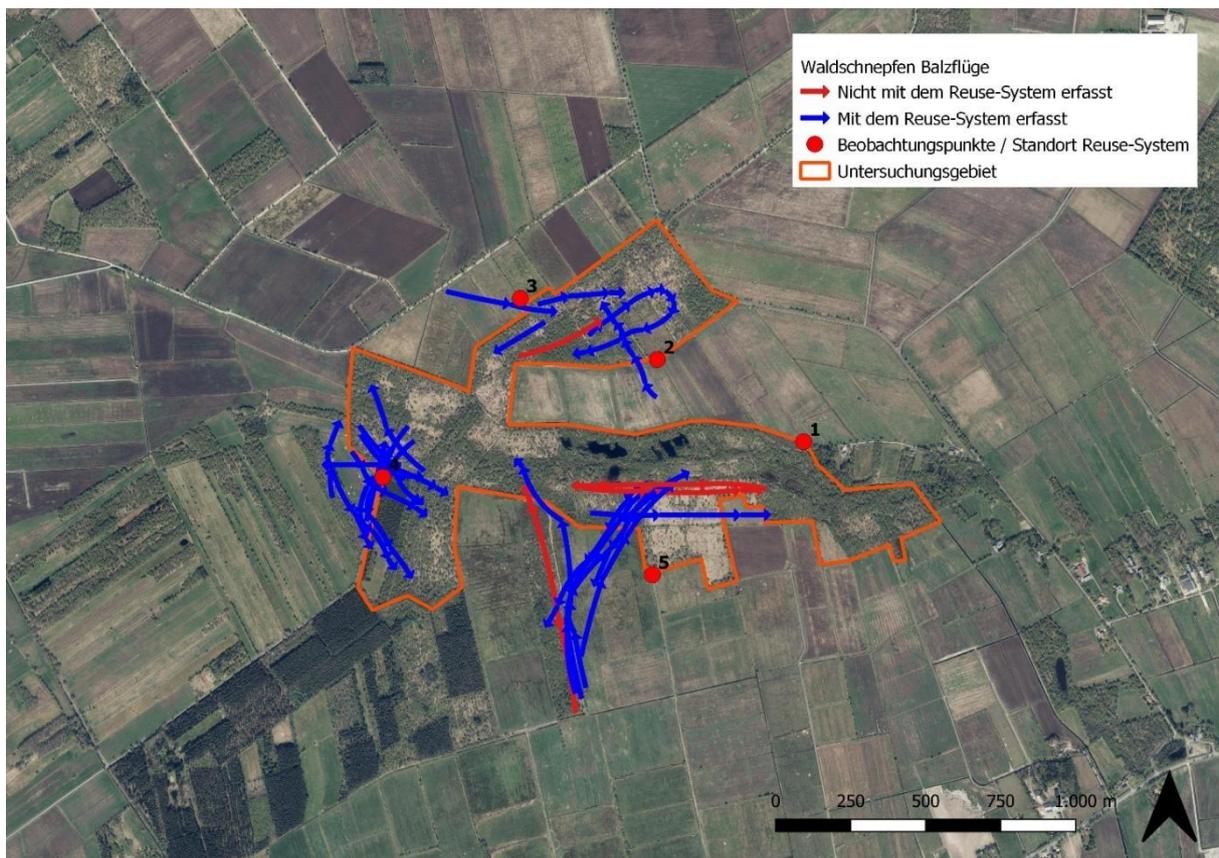


Abbildung 25: Während der Präsenz-/Absenz-Kartierungen erfasste Waldschneepfenbalzflüge (Darstellungsgrundlage: DOP LGLN)

Anwendung des Mustererkennungs-Algorithmus in realen Monitoring-Szenarien

Der BirdIDEurope254-Algorithmus wurde auf Aufnahmen, die mit den DeVise-Sensoren in den Gellener Torfmöörten erstellt wurden, angewandt. Aus den drei Projektjahren wurden insgesamt 58,5 Stunden Audiomaterial analysiert und geprüft. Bei Anwendung eines Schwellenwertes von 0.5 für die Detektion wurden insgesamt 803 Segmente mit einer Dauer von 5 s ermittelt, die Rufe von Waldschneepfen enthalten können. Jedes Segment mit Waldschneepfendetektion wurde durch Abhören unter Zuhilfenahme des Programmes RavenPro geprüft. Von diesen 803 Segmenten waren 784 richtig erkannt (true

positives), 19 waren falsch oder unsicher (false positives). Damit ergibt sich eine Präzision von 97,6 % für den Erkennungsalgorithmus. Die Rufe verteilten sich auf 212 Überflüge. Abbildung 26 illustriert die Aktivität der Waldschnepfe in einer Nacht. Deutlich zu erkennen sind dabei zwei Aktivitätsphasen.

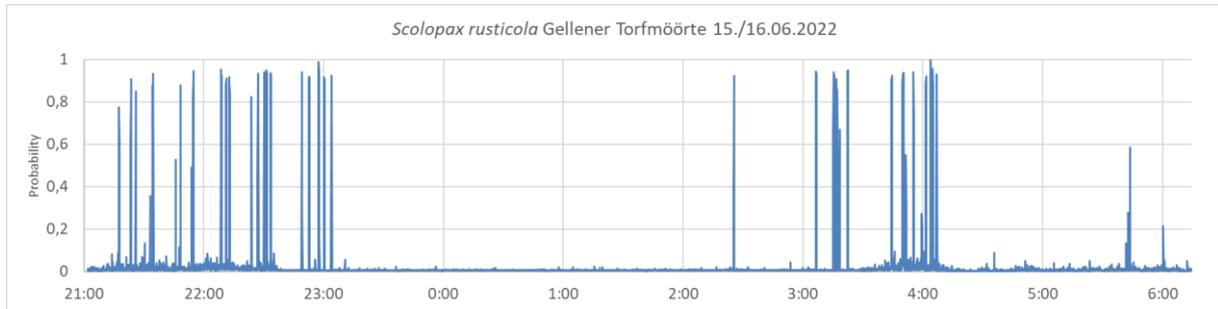


Abbildung 26: Aktogramm von Waldschnepfen-Balzrufen unter Anwendung des BirdID-Algorithmus.

Es wurden auch sehr schwache Rufe erkannt, die im Spektrogramm kaum sichtbar waren. Abbildung 27 zeigt eine beispielhaft eine Ausschnittsvergrößerung einer Aufnahme, wo schwache Rufe auch vor starkem Hintergrund erkannt wurden. Von vier Rufen wurden 3 erkannt, obwohl die Rufe im Spektrogramm kaum zu erkennen sind. Ruf 3 wurde nicht detektiert, da dieser stark von Gesangelementen von Singvögeln überlagert wurde.

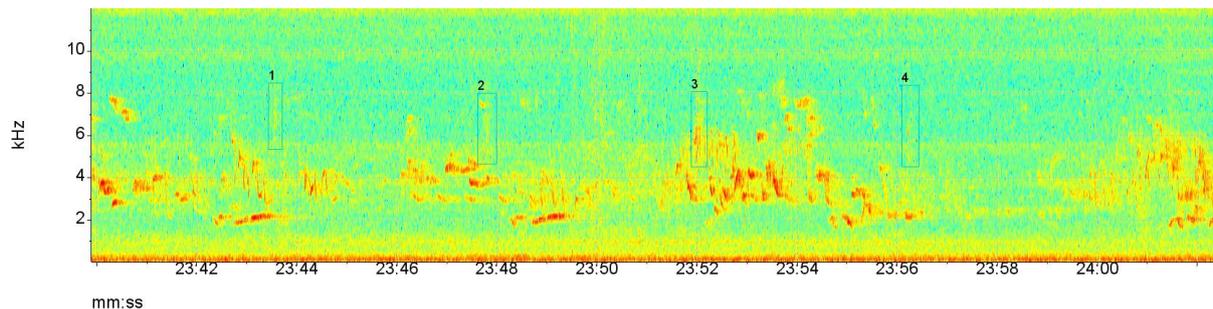


Abbildung 27: Beispielhafte Ausschnittsvergrößerung einer Waldschnepfen-Rufsequenz (Gellener Torfmöörte, 09.06.2021).

Die Erkennung der Waldschnepfe mittels des BirdID Algorithmus erwies sich insgesamt als sehr zuverlässig. Zur Überprüfung wurden auch Audioaufzeichnungen aus anderen Monitoringprojekten hinzugezogen (Tab. 7). In mehr als 675 Stunden analysierten Audiomaterialies mit unterschiedlicher Geräuschkulisse wurden lediglich 48 Fehldetektionen festgestellt.

Tabelle 7: Verifizierung der Güte der Mustererkennung. Als Schwellenwert wurde einheitlich eine Probability von 0.5 gesetzt

Aufnahmeort	Technik	Anzahl 5s Intervalle	Dauer	Detektionen	True Positive	False Positive
Gellener Torfmöörte (2021 bis 2023)	Devise-Sensor	42120	58 h 30 min	803	784	19
Criewen (Unteres Odertal) Juni-Juli 2023	Devise-Sensor	54060	75 h 05 min	2	0	2
Britz (Schorfheide) (März bis Mai 2022)	Devise-Sensor	39324	54 h 37 min	11	6	5
Wallberge (Unteres Odertal) April-Mai 2023	Wildlife Acoustics SM4	351180	487 h 45 min	22	0	22

Test zur Bestimmung der Erfassungsreichweite

Durch die engmaschigere Platzierung der Aufnahmesysteme war es möglich, die maximale Distanz, bis zu der ein Waldschnepfenruf noch durch händische Analyse der Aufnahmen zu identifizieren ist, enger einzugrenzen. Aufgrund der geringen Stichprobe sind die Einschätzungen jedoch zunächst als Annäherung zu sehen.

Abbildung 28 gibt einen Überblick, welche der acht Balzflüge während der Erfassungen am 16.06.2021 an den vier Gerätestandorten jeweils erfasst wurden.

In Abbildung 29 ist die minimale Distanz der Balzflüge zum nächstgelegenen Gerätestandort aufgeführt und zusätzlich angegeben, ob ein (oder mehrere) Rufe des Balzfluges händisch in den Aufnahmen detektiert werden konnte. Es wird ersichtlich, dass die Balzflüge bis zu einer Entfernung von 100 m zum Sensor relativ sicher händisch in den Aufnahmen nachgewiesen werden können. Der Großteil der nicht erfassten Balzflüge fanden in größerer Entfernung statt. Ein nachgewiesener Balzruf in einer geschätzten Entfernung von über 250 m Entfernung kann als Hinweis auf teilweise erschwerte visuelle Entfernungsschätzungen während der Kartierungen gewertet werden. Neben der Entfernung der Waldschnepfe sind ebenfalls die Flugrichtung sowie „Störgeräusche“ (z.B. parallel rufende Vögel) entscheidend für den Nachweis auf den Aufnahmen.

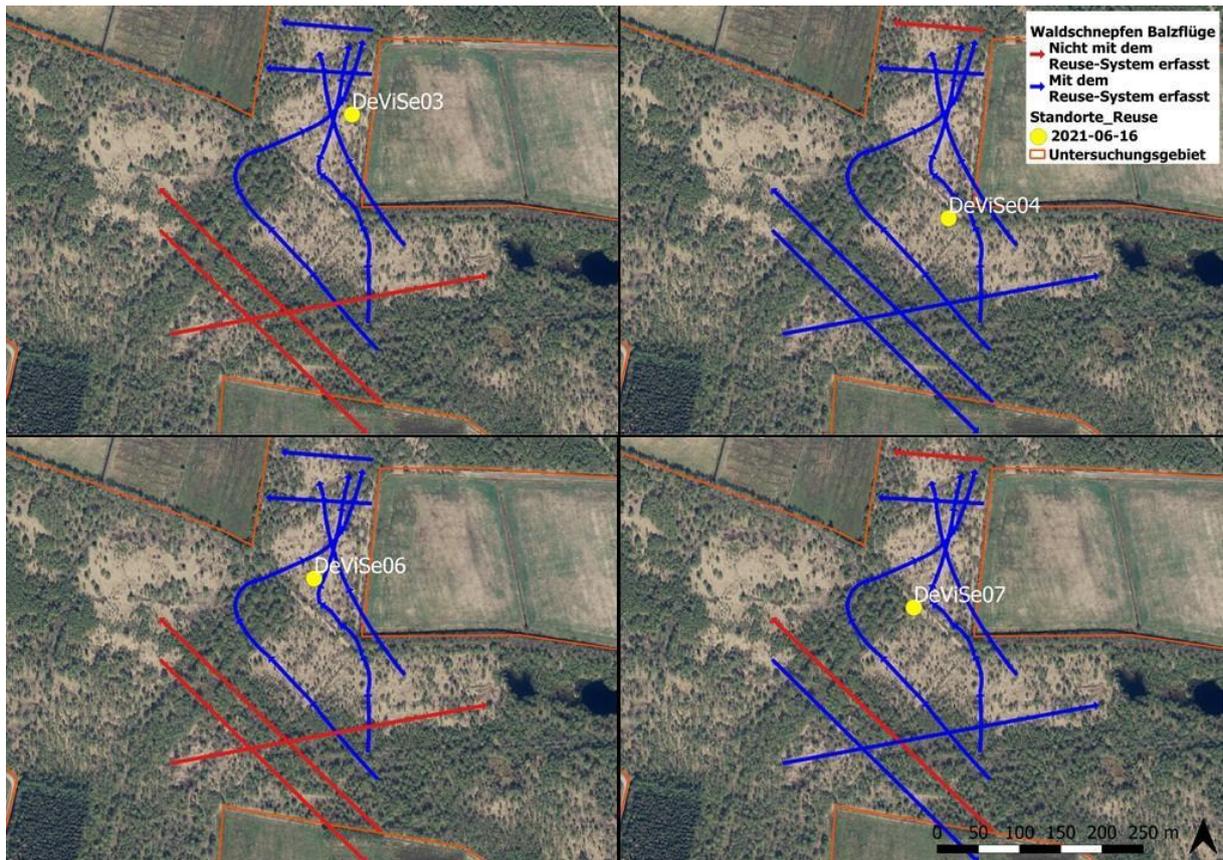


Abbildung 28: Von unterschiedlichen DeViSe-Systemen erfasste Balzflüge (Darstellungsgrundlage: DOP LGLN)

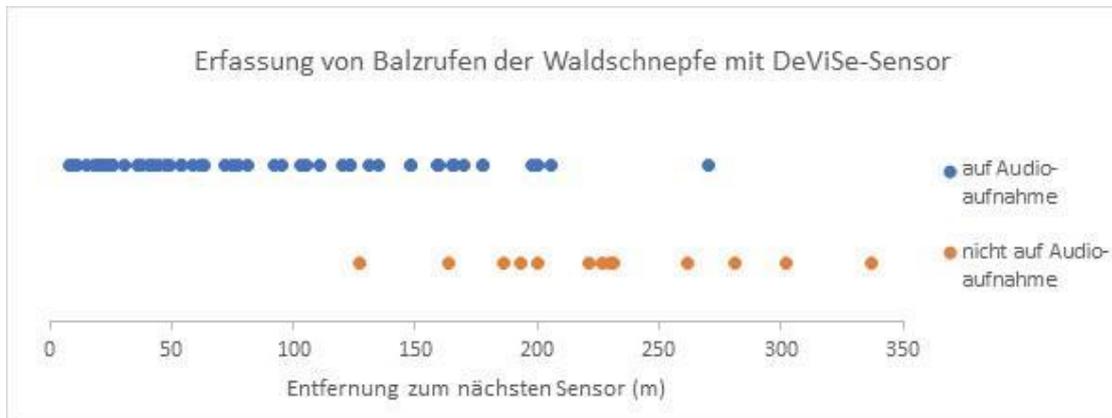


Abbildung 29: Geschätzte minimale Entfernung der Waldschnepfenbalzflüge zum nächstgelegenen DeViSe-Sensor.

Lokalisation mittels Mikrofonarray

Mit Hilfe des Mikrofonarrays konnten in drei Nächten insgesamt 60 Überflüge der Waldschnepfe erfasst werden. Jedoch nur auf einer Aufnahme flog eine Waldschnepfe unmittelbar über das Mikrofonarray und ein Ruf konnte auf Grundlage einer Hyperbolischen Ortung innerhalb der Fläche, die von den 4 äußeren Mikrofonen eingegrenzt wurde, verortet werden (Abb. 30). Unter Einbeziehung der vorangegangenen und nachfolgenden Rufe konnte dieser Ruf auch eindeutig in den Aufnahmen mit den DeViSe-Sensoren wiedergefunden werden. Auch wenn der Ruf am entferntesten Sensor (D1) in

127 m nur schwach zu hören war, wurde er auch mit dem BirdID-Algorithmus sicher erkannt (probability 0.95). Der vorangegangene Ruf war nicht mehr zu hören. Damit kann abgeschätzt werden, dass die Erfassungsreichweite des Systems bei ca. 150 m liegt.



Abbildung 30: Simultane Aufzeichnung eines exakt verorteten Rufes mit mehreren DeViSe-Sensoren. Das rote Dreieck symbolisiert den Ort, an dem der Ruf abgegeben wurde. A – Spektrogramm der Aufzeichnung des Mikrofonarrays. B – Aufzeichnung Sensor D09. C – Sensor D07. D – Sensor D01. Die roten Pfeile kennzeichnen den verorteten Ruf im Spektrogramm.

Wachtelkönig

Kartierungen

Mit den Kartierungen konnten zumindest Angaben gewonnen werden, ob ein rufendes Tier potenziell in Erfassungsreichweite des Sensors war und wie viele Tiere gleichzeitig riefen. Eine exakte Ortsbestimmung des Vogels war damit jedoch nicht möglich.

Kontinuierliche Aufzeichnungen

Die Auswertungen der mit den SM4-Recordern (Abb. 31) erstellten kontinuierlichen Aufzeichnungen von 2021 erfolgten zunächst mit einem einfachen Algorithmus, mit Hilfe dessen mit hoher Sicherheit langanhaltende Rufreihen identifiziert werden konnten. Sehr kurze Rufsequenzen wurden nicht erkannt. Die Erkennung basierte auf typischen Rufparametern (Frequenzbereich, zeitliche Struktur der Einzelsignale und zeitliche Abfolge der Signale). Die Visualisierung erfolgte mit Microsoft Excel. Abbildung 32 zeigt Beispiele für Aktogramme der Rufaktivität für den Monat Mai. Kurze vertikale Balken

sind ein klares Indiz für langanhaltende Rufe der Art in der Nähe des Recorders. Deutlich zu erkennen ist, dass die Wachtelkönige fast jede Nacht rufen. Die Aktogramme belegen erste rufende Tiere für den 8. Mai (Recorder03). Die unterschiedlichen Aktivitätsmuster an den verschiedenen Recorders deuten darauf hin, dass es sich hier um unterschiedliche Tiere handelt. Erwähnenswert sind die akustischen Nachweise am Tag der Synchronzählung am 14./15.05.2021 an den Recorders 1, 2 und 3. Bei der in dieser Nacht erfolgten Synchronzählung wurden diese Tiere nicht erfasst. Die Angaben zur Rufaktivität erlauben es, Empfehlungen für den zeitlichen Einsatz der Devisen-Sensoren zu erarbeiten. Ausgehend davon beschränkten wir uns in den Folgejahren auf Aufzeichnungen in den Nachtstunden. Die Aktogramme geben Auskunft darüber, ob in der Umgebung des Recorders Wachtelkönigrufe zu hören sind, Aussagen zu Anzahl der Tiere und Richtung, aus der der Ruf kommt, können nicht gemacht werden.

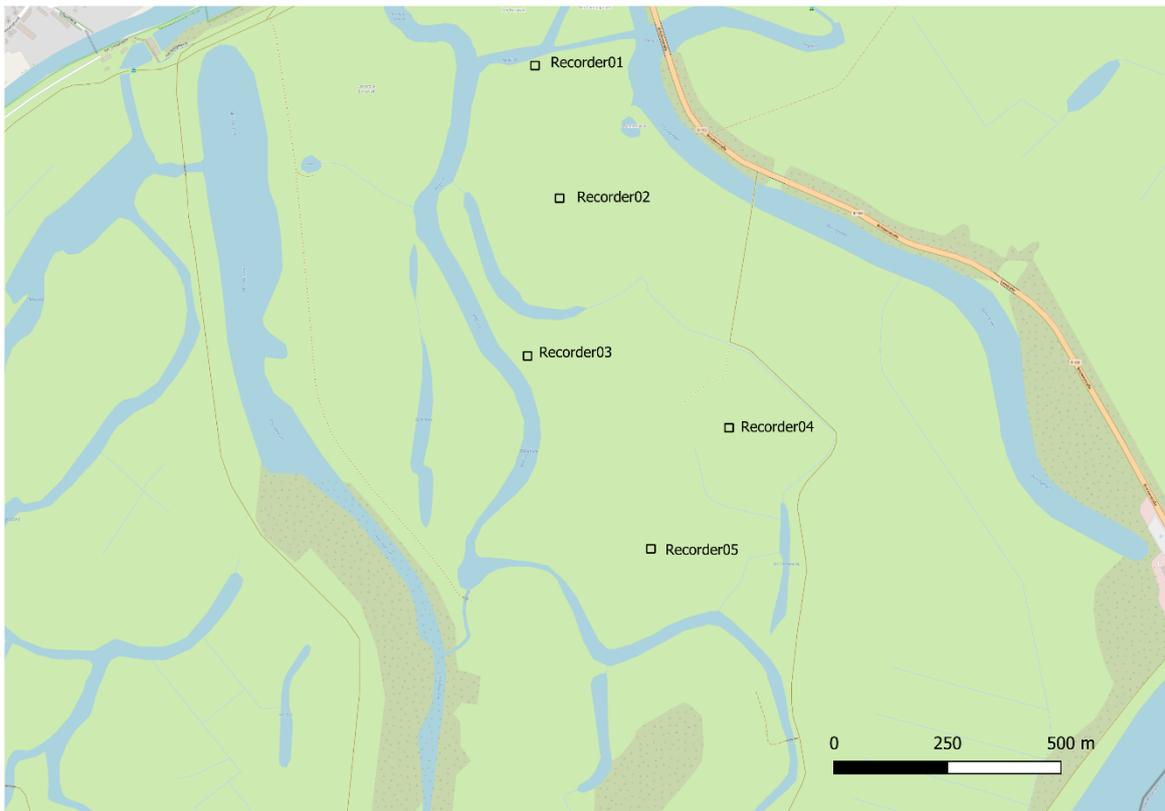


Abbildung 31: Positionen der SM4 Recorder im südlichen Teil des Polder B im Unteren Odertal im Jahre 2021 (Karte erstellt mit QGIS 3.34 unter Nutzung des Open Street Layers).

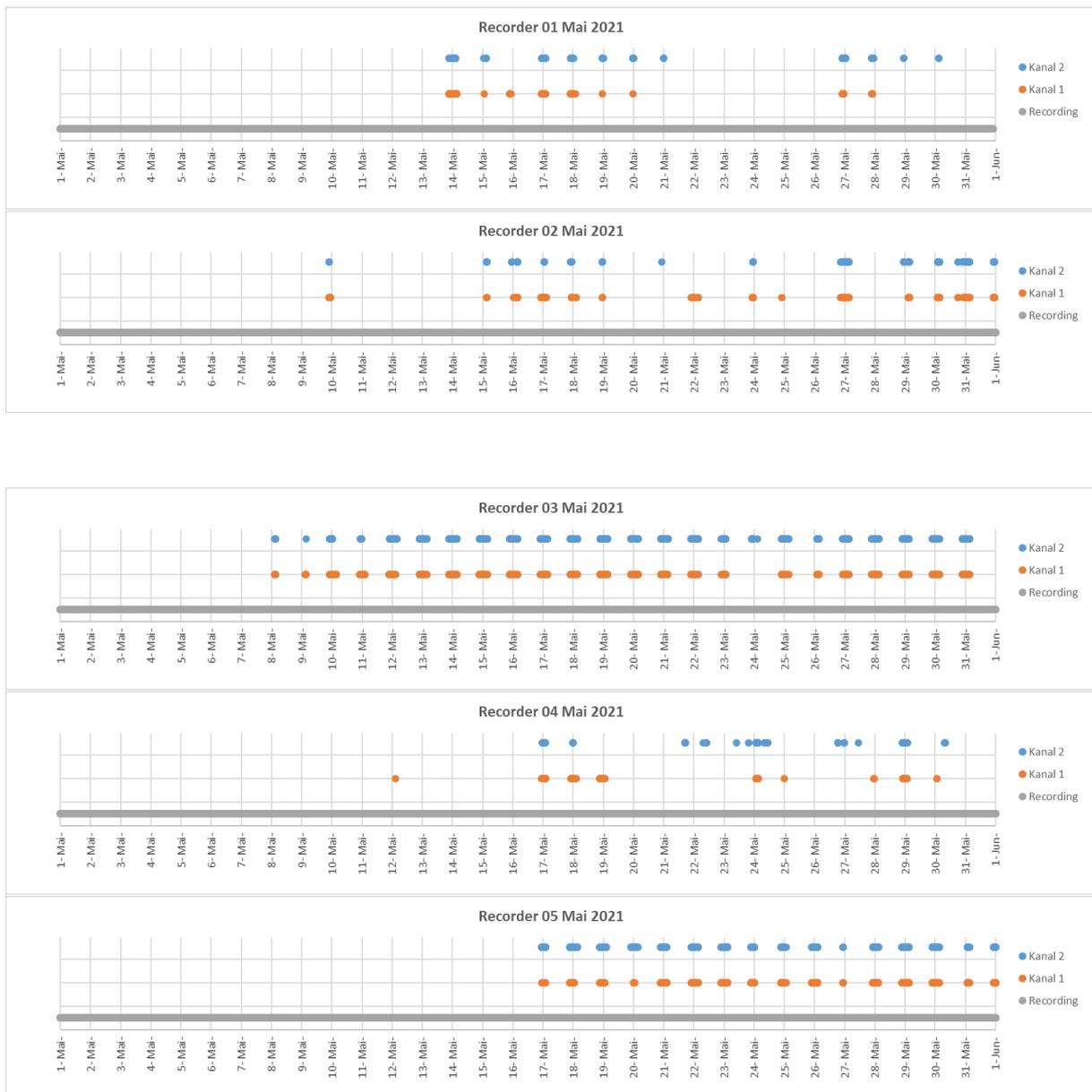


Abbildung 32: Aktogramme der Rufaktivität des Wachtelkönigs im Mai 2021 an fünf Standorten auf der Grundlage von Aufzeichnungen mit SM4-Recordern. Die vertikalen Balkenstrukturen zeigen anhaltende Rufreihen. Der graue Balken indiziert, ob im jeweiligen Zeitraum aufgezeichnet wurde.

Eine deutliche bessere Auflösung ergibt sich unter Nutzung des Algorithmus BirdID-Klassifikators (Abb. 33). Da dieser Algorithmus auch Einzelrufe mit hoher Sicherheit erkennt. Deutlich zu erkennen ist eine erhöhte Tagaktivität kurz nach Ankunft der Tiere und Mitte Juni. Die Tagaktivität Mitte Juni deutet darauf hin, dass es sich um ein verpaartes Männchen handelt (SÜDBECK ET AL. 2005)

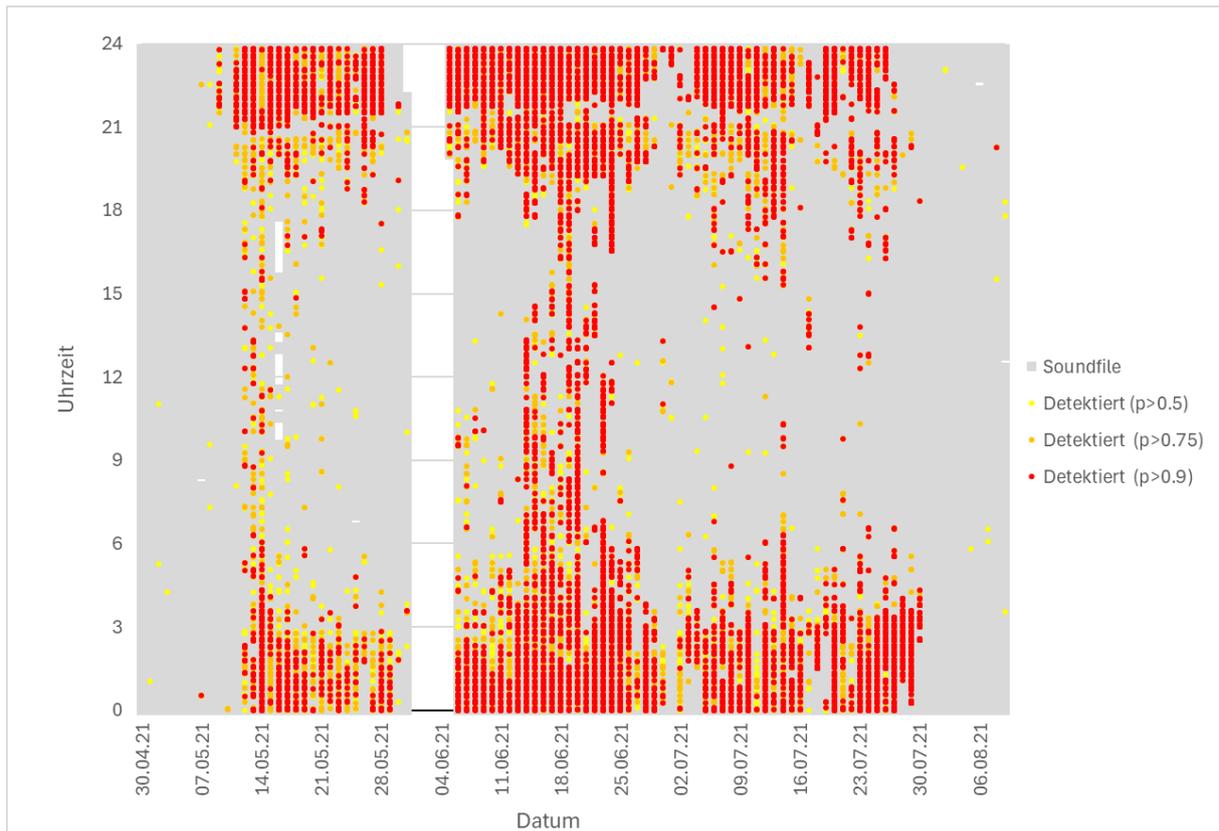


Abbildung 33: Detailliertes Aktogramme der Rufaktivität des Wachtelkönigs an einem Standort auf der Grundlage von Aufzeichnungen mit SM4-Recordern im Jahre 2021 (Recorder 01, Kanal 1). Der graue Bereich indiziert, ob im jeweiligen Zeitraum aufgezeichnet wurde. Vom 1. bis 5. Juni war das Aufzeichnungsgerät ausgefallen.

Im dritten Untersuchungsjahr wurden bereits die DeViSe-Sensoren für eine kontinuierliche Erfassung genutzt (Abb. 34). Für dieses Anwendungsszenario wurde die Güte des Mustererkennungsalgorithmus BirdID separat geprüft. Dazu wurde von Sensor03 jeweils eine Minute pro Aufzeichnungsstunde (jeweils erstes Aufzeichnungsintervall der Stunde ausgewertet (Abb. 35)). Von insgesamt 2760 überprüften 5s-Intervallen konnten 1867 Wachtelkönigrufe bestätigt werden (True Positives). Es gab keine Fehldetektionen (False Positives). In 91 Fällen wurden Wachtelkönigrufe gehört, die nicht vom Algorithmus erkannt wurden (False Negatives). Damit ergibt sich ein Wert für Precision von 100% und für Recall von 95.35%.

Die Rufaktivität in der Umgebung der einzelnen Sensoren ist in den Abbildungen 36 bis 38 dargestellt. Abgesehen von den Ausfällen des Sensors04 konnte eine durchgängige Rufaktivität bis Mitte Juli festgestellt werden.

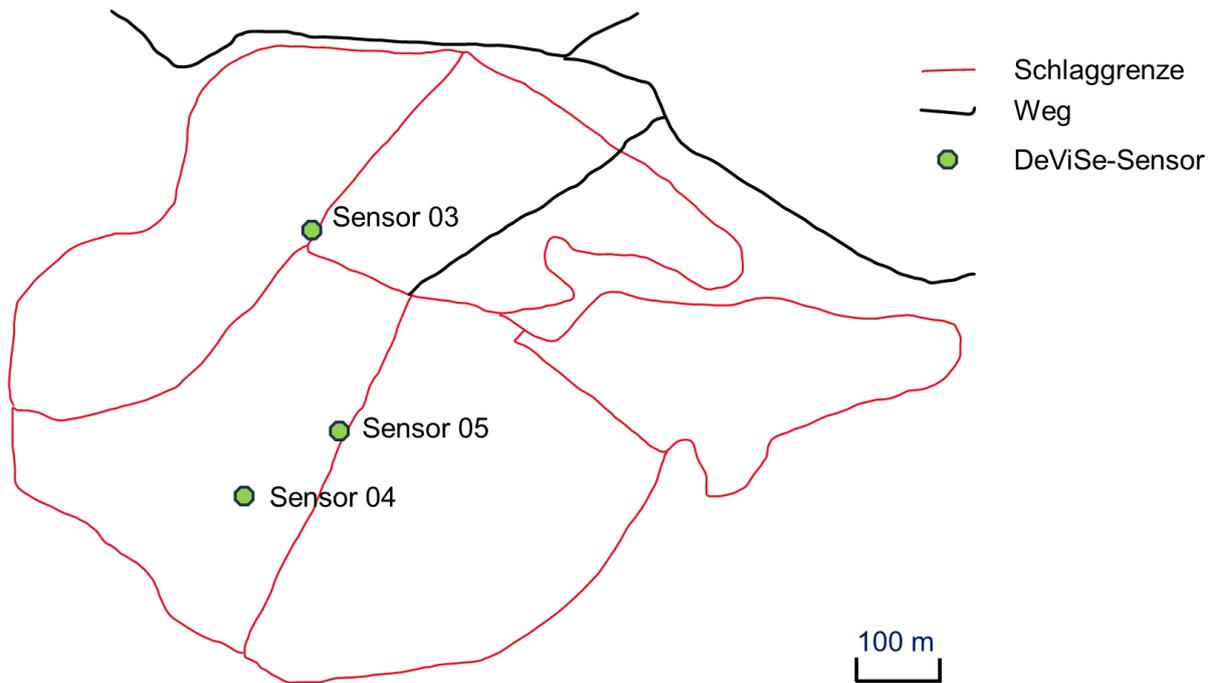


Abbildung 34: Schematische Darstellung der Anordnung der DeViSe-Sensoren im Polder A des Nationalparks Unteres Odertal im Jahre 2023.

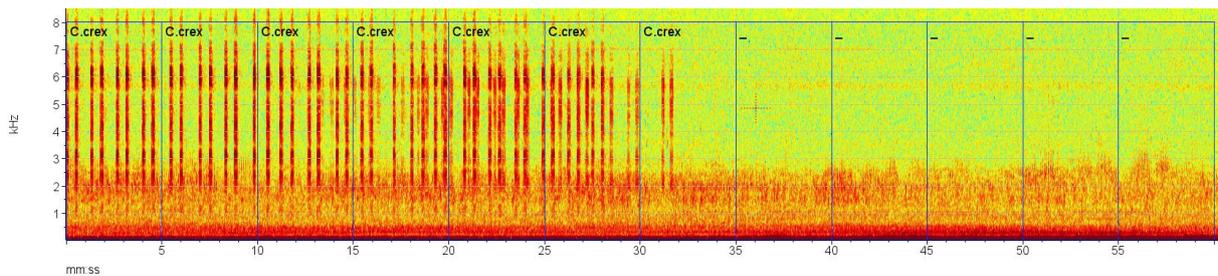


Abbildung 35: Ergebnis der Klassifikation mit BirdID dargestellt in Raven Pro (Devise03, 19.06.2023 23:02 Uhr).

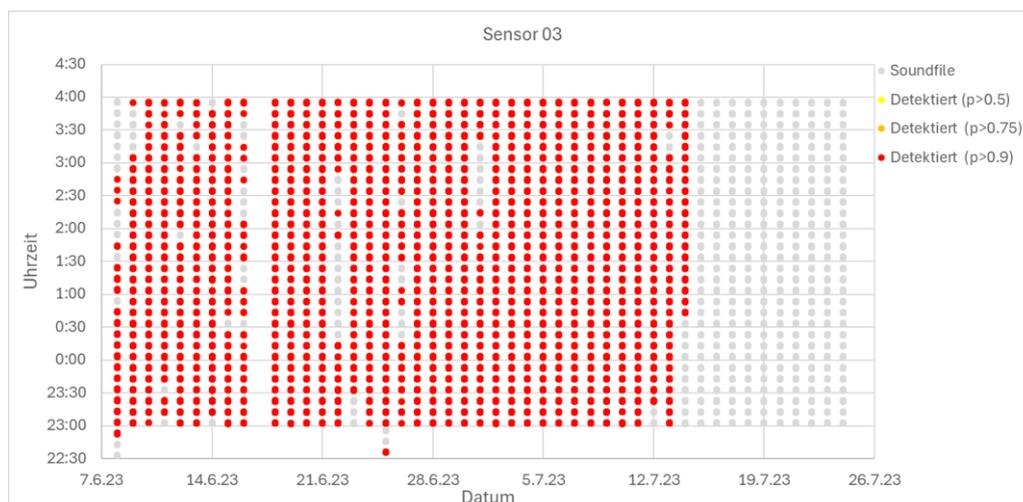


Abbildung 36: Aktogramm der Rufaktivität des Wachtelkönigs aufgezeichnet mit Sensor03 auf Basis der Analyse mit BirdID. Dargestellt sind Erkennungen mit einem Score $>0,5$, $>0,75$ und $>0,9$.

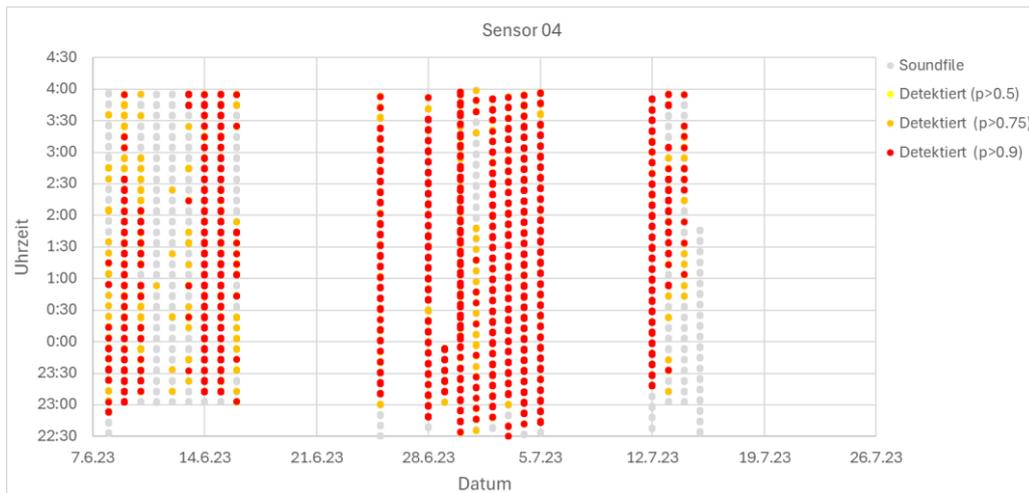


Abbildung 37: Aktogramm der Rufaktivität des Wachtelkönigs aufgezeichnet mit Sensor04 auf Basis der Analyse mit BirdID. Dargestellt sind Erkennungen mit einem Score $>0,5$, $>0,75$ und $>0,9$. Bei diesem Sensor traten längere Ausfälle auf.

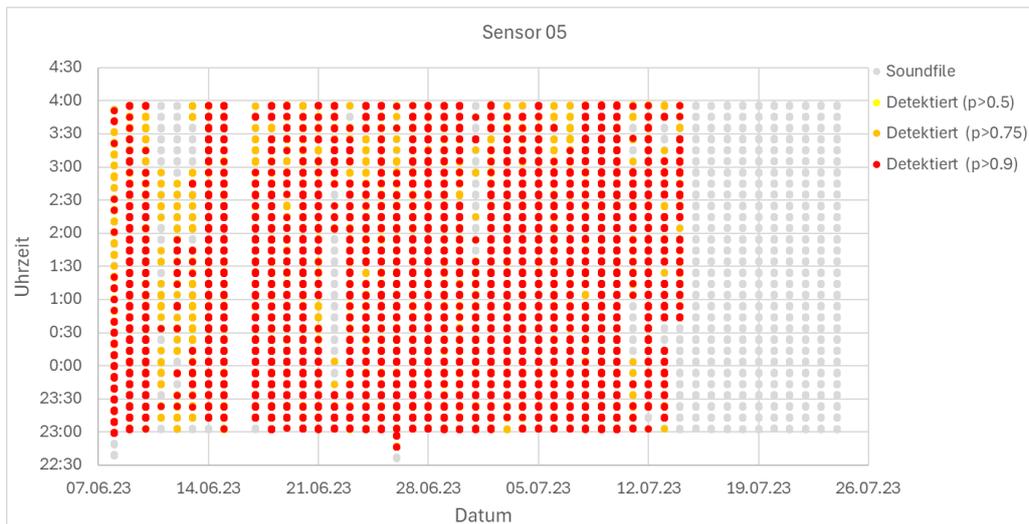


Abbildung 38: Aktogramm der Rufaktivität des Wachtelkönigs aufgezeichnet mit Sensor05 auf Basis der Analyse mit BirdID. Dargestellt sind Erkennungen mit einem Score $>0,5$, $>0,75$ und $>0,9$.

Bestimmung des Schalldruckpegels

Für 7 Wachtelkönige konnten repräsentative Daten zum Schalldruckpegel gewonnen werden. Berücksichtigt wurden nur Tiere, die weniger als 40 m vom Mikrophon entfernt waren. Bezogen auf eine Entfernung von 1 m variieren die Mittelwerte der Spitzenpegel der einzelnen Tiere von 96 bis 107 dB (re $20\mu\text{Pa}$). Es deutet sich eine Tendenz an, dass Rufe am Anfang der Nacht oder von neu ankommenden Tieren leiser sind. Die Messergebnisse können als Grundlage für gezielte Experimente zur Bestimmung der Reichweite des Erfassungssystems unter Berücksichtigung der jeweiligen örtlichen Gegebenheiten dienen.

Lokalisation

Die experimentelle Bestimmung der Lokalisationsgenauigkeit mit einem über Lautsprecher abgestrahlten Signal deuten darauf hin, dass mit dem derzeitigen Algorithmus und Versuchsdesign eine exakte Lokalisation mittels Triangulation nur schwer möglich ist.

Vereinzelte Messungen mit einem mobilen Sensor, mit dem ein Tier von verschiedenen Positionen aufgenommen wurden, zeigen aber, dass eine Lokalisation generell möglich ist. In Abbildung 39 sind drei Messungen dargestellt, bei denen die Ortsbestimmung auf Grundlage der Triangulation im Einklang mit der subjektiven Wahrnehmung des Beobachters vor Ort war. Eine Verifizierung mit einem Linienarray konnte hier nicht erfolgen.

Auch bei Daueraufzeichnungen traten Situationen auf, in den Tiere trianguliert werden konnten (Abb. 40). In dem Beispiel vom 25.06.2023 ist anzumerken, dass sich die Triangulation auf der Basis von Sensor03 (vgl. Abb. 34) und einem zusätzlichen, östlich davon positionierten, Sensors in guter Übereinstimmung mit der Ortsbestimmung mittels Linienarray war. Der Schnittpunkt im Westen der Untersuchungsfläche deutet auf ein Tier hin, dass bei Kontrolle der Sensoren vom Beobachter schwach zu hören war, von der regulären Kartierungsrouten aus jedoch nicht erfasst werden konnte.

Die Polarplots für die Daueraufzeichnungen mit den drei DeVise-Sensoren können die Aktivitätsschwerpunkte innerhalb der Fläche indizieren (Abb. 41).

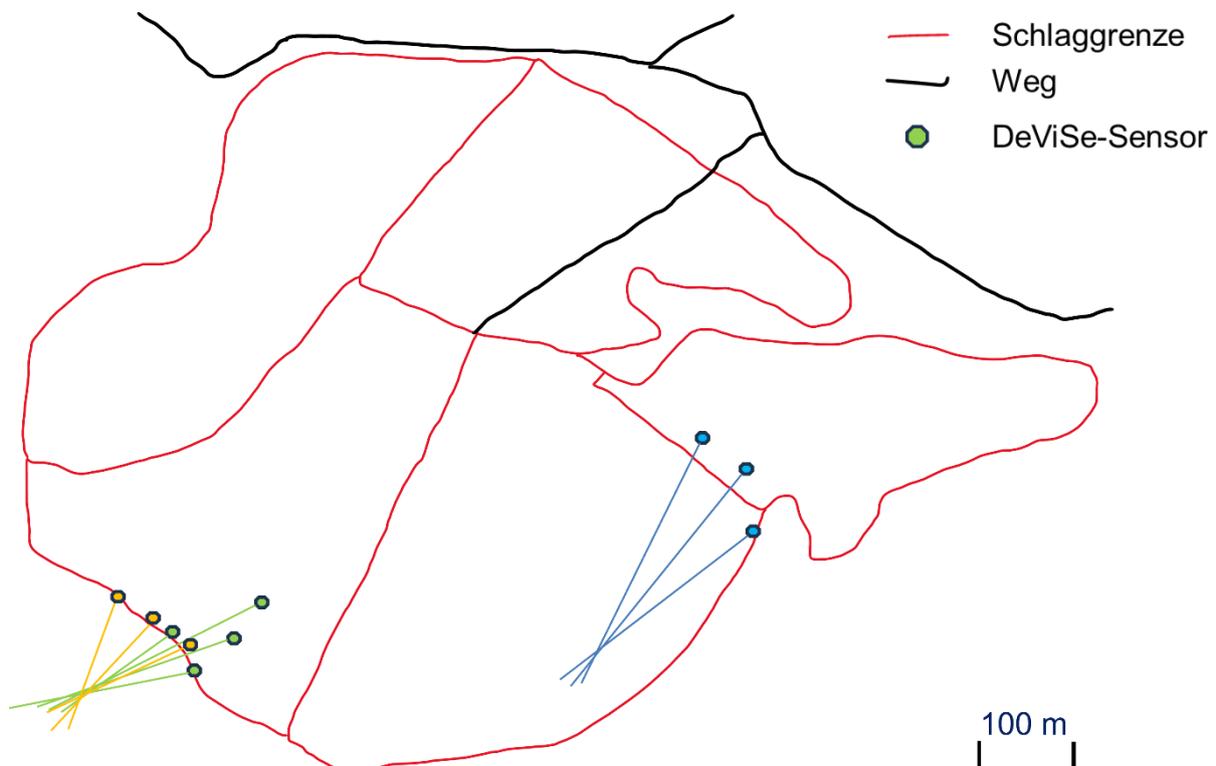


Abbildung 39: Drei Beispiele für Triangulation rufender Wachtelkönige mittels eines DeVise-Sensors, mit dem von verschiedenen Orten aus aufgenommen wurde. Unterschiedliche Farben bezeichnen unterschiedliche Triangulationen.

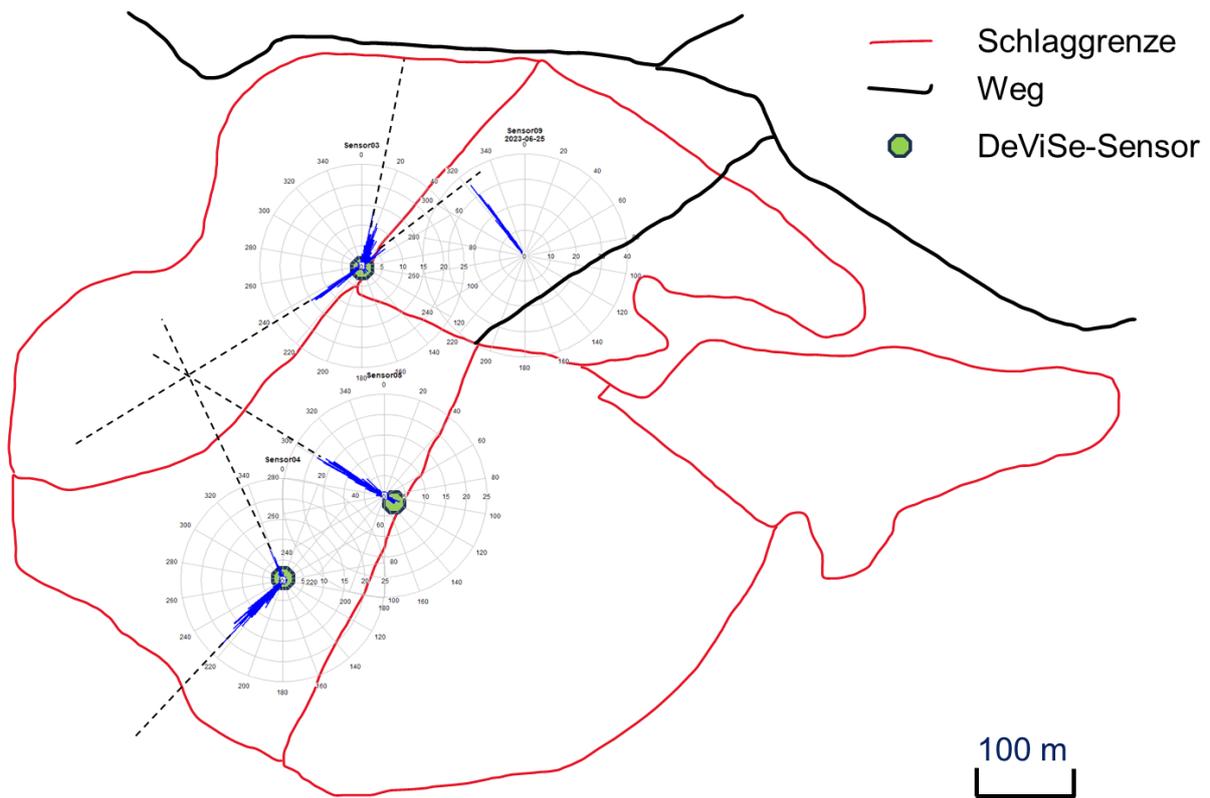


Abbildung 40: Polarplots der in einer Nacht (25./26.06.2023) bestimmten Richtungen. Die Auflösung beträgt 1° . Die Länge der Linien entspricht der Häufigkeit der berechneten Richtungen. Gestrichelte Linien kennzeichnen die Hauptrichtungen (Winkel mit größter Häufigkeit)

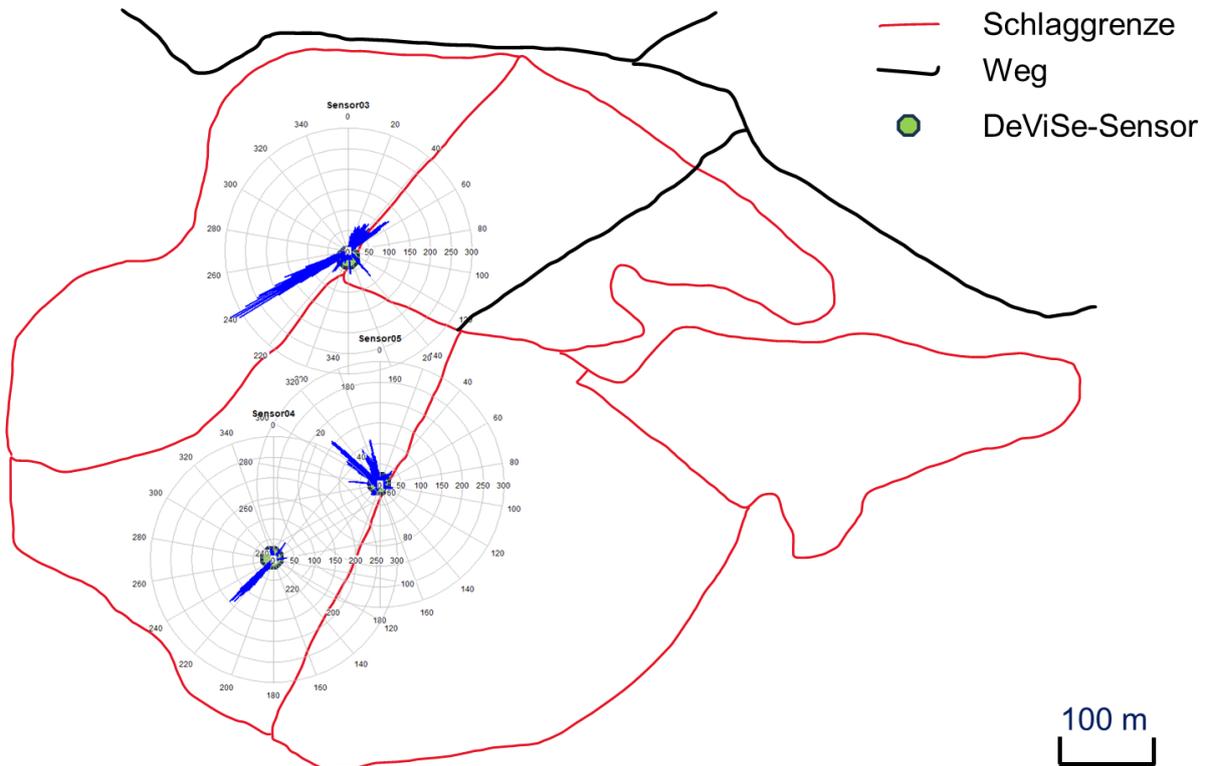


Abbildung 41: Summarische Darstellung der Polarplots der bestimmten Richtungen für 2023

5 Öffentlichkeitsarbeit

Über das Projekt DeViSe wurde auf Webseiten auf der Homepage des Museums für Naturkunde (<https://www.museumfuernaturkunde.berlin/de/wissenschaft/lauschangriff-auf-artenschwund>) und dem Fraunhofer IDMT (<https://www.idmt.fraunhofer.de/de/institute/projects-products/projects/de-vise.html>) informiert.

Das Projekt wurde zudem im Rahmen von Veranstaltungen vor Fachpublikum, potenziellen Anwendern und politischen Entscheidungsträgern vorgestellt:

- 21.06.2021 Frommolt, K.-H. "Akustische Ortung des Wachtelkönigs (Crex crex) im Unteren Odertal" Treffen des Vereins der Freunde des Deutsch-Polnischen Europa-Nationalparks Unteres Odertal, Schwedt.
- 16.03.2022 Frommolt, K.-H. "Akustische Ortung des Wachtelkönigs (Crex crex) im Unteren Odertal 2021", Beratung zum Wiesenbrüterschutz, NP Unteres Odertal, Schwedt.
- 10.04.2022 Frommolt, K.-H. "Lauschangriff: Die Welt der Bioakustik" Podcast Beats and Bones (<https://beats-and-bones.podigee.io/35-neue-episode>)
- 05.07.2022 Frommolt, K.-H. Vorstellung des Projektes bei Besuch der Staatssekretärin im MLUK Brandenburg (A. Boudon) im Nationalpark Unteres Odertal, Schwedt.
- 24.09.2022 Frommolt, K.-H., Adrian J.-A., Brandes, M., Dogan, H., Hollosi, D., Lasseck, M., Müller, M., Rollwage, C., Tim Steinkamp, T. "DeViSe – Automatische Detektion, Lokalisation und Tracking von Vögeln und lautgebenden Tierarten mittels intelligenter akustischer Sensorik". Jahrestagung Deutsche Ornithologengesellschaft, Wilhelmshaven.
- 04.11.2022 Frommolt, K.-H. "Akustische Erfassung des Wachtelkönigs im Nationalpark Unteres Odertal". Grünlandtag des Nationalparks "Unteres Odertal", Schwedt.
- 31.01.2023 Frommolt, K.-H. "Automatische Detektion und Lokalisation des Wachtelkönigs mittels intelligenter akustischer Sensorik – Perspektiven der Anwendung für den Wiesenbrüterschutz". Workshop "KI statt IQ? Potentiale und Herausforderungen des KI-Einsatzes in der Vogelbeobachtung und im Vogelmonitoring", Internationale Naturschutzakademie, Insel Vilm.
- 21.06.2023 Steinkamp, Tim Demonstration des DeViSe-Sensors im Zuge der niedersächsischen landesweiten Wachtelkönig-Erfassung (NLWKN)
- 16.10.2023 Frommolt, K.-H. Vorstellung des Projektes vor Mitgliedern des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz des Bundestages, Berlin.
- 18.11.2023 Frommolt, K.-H. "Anwendung KI-gestützter akustischer Erfassungsmethoden für naturschutzfachliche Entscheidungen am Beispiel des Wachtelkönigs." Vortrag auf Herbsttagung Birdlife Österreich, Wien.
- 06.12.2023 Steinkamp, Tim: Kurzvortrag zu aktuellen Forschungsfragen der ARSU GmbH (u. a. DeViSe) auf dem BfN-Vernetzungskolloquium
- 08.02.2024 Steinkamp, Tim: Austausch mit der AG „Umweltprüfungen“ der TU Berlin zu potenziellen Anwendungsmöglichkeiten KI-gestützter Systeme am Beispiel DeViSe
- 22.04.2024 Frommolt, K.-H. "Akustische Erfassung des Wachtelkönigs im Nationalpark Unteres Odertal". Grünlandtag des Nationalparks "Unteres Odertal", Schwedt.

6 Fazit

Die Zusammenfassung und Bewertung der erzielten Projektergebnisse erfolgt abschließend vor dem Hintergrund der übergeordneten Zielstellung: Der Anwendung automatisierter, akustischer Erfassungssysteme in der gutachterlichen Praxis.

Relevante Ziele konnten innerhalb des Projekts realisiert werden, so wurde die grundsätzliche Funktionalität nachgewiesen. Andere Aspekte sind bereits konzeptionell erarbeitet und/oder im Einzelfall durch Nachbereitung der Daten erreicht worden. Die Ansprüche an die Erfassungssysteme sind im gutachterlichen Kontext derweil andere, so steht insbesondere die Anwenderfreundlichkeit der Systeme und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse im Fokus.

Die grundsätzlichen Informationen und Eigenschaften von naturschutzfachlichen Daten, welche im Zuge von Planungen, Genehmigungen oder Monitorings erhoben werden, können klar definiert werden. SÜDBECK ET AL. (2005) beschreiben die Anforderungen an avifaunistische Fachdaten demnach als

- qualitativ hochwertig,
- quantitativ,
- standardisiert erhoben und somit
- überprüfbar und nachvollziehbar.

Grundsätzliche Informationen, die für die Beantwortung der meisten naturschutzfachlichen Fragestellung benötigt werden, umfassen

- das (vollständige) Artenspektrum,
- die Anzahl der Individuen,
- den Zeitpunkt der Erfassung
- sowie den Ort der Erfassung.

Nachfolgend wird der aktuelle Leistungsstand automatisierter akustischer Sensorsystem zur Arterfassung (Schwerpunkt Vögel) dargestellt. Im DeVise-Projekt erfolgte Verbesserungen werden explizit erwähnt. Ergänzt wird der Anforderungskatalog in Hinblick auf besondere Anforderungen für die naturschutzfachliche Praxis. Daraus ergeben sich notwendige Verbesserungen, die für eine grundlegende Praxistauglichkeit bzw. Marktreife zukünftig noch umgesetzt werden müssen. Im Laufe des Projekts wurde eine prinzipielle Praxistauglichkeit exemplarisch nachgewiesen. Der technische Stand des DeVise-Systems ist ausführlich in Kapitel 4.1 dargestellt.

Einsatzschwerpunkte von automatisierten akustischen Erfassungssystemen stellen kurz- bis mittelfristig besondere Fragestellungen sowie nur schwer erfassbare Arten dar. Perspektivisch ist auch der grundsätzliche Einsatz der Systeme in der gutachterlichen Praxis realisierbar. Im Projekt wurden mit der Erfassung von Wachtelkönig und Waldschnepfe zwei potenzielle Einsatzszenarien beispielhaft dargestellt. Der notwendige Leistungsstand orientiert sich an diesen Einsatzmöglichkeiten, durch weitere Verbesserungen oder die Kombination mit herkömmlichen Erfassungsmethoden können zukünftig auch weitere Bearbeitungsfelder geschaffen werden.

In den einzelnen Aspekten der Erfassungen (Effektivität der Erfassungen im Gelände, Erfassungsdauer, Auswertungsmöglichkeiten, Informationsgewinn und Kosten) bestehen zum Teil deutliche Unterschiede, welche eine Bevorzugung von Kartierern oder akustischen Erfassungsgeräten in bestimmten Szenarien begründen. Umfangreiche Literaturstudien (SHONFIELD & BAYNE 2017; DARRAS *et al.* 2019; RHINEHART *et al.* 2020) und Anwenderbefragungen (ABRAHAMS 2018) liefern eine allgemeine Übersicht des Leistungsstands von autonomen akustischen Erfassungsgeräten sowie potenziellen Optimierungsmöglichkeiten und Erweiterungen.

6.1 Arterkennung

Für aktuell verfügbare Aufzeichnungsgeräte wurde mehrfach eine ähnliche Leistungsfähigkeit bezüglich der reinen Erfassung von Vogelstimmen im Vergleich zu Kartierern nachgewiesen (siehe Übersichten in SHONFIELD & BAYNE 2017; DARRAS *et al.* 2019). BROWNING *et al.* (2017) liefern eine Übersicht bereits für faunistische Erfassungen eingesetzter akustischer Technik. Spezifikationen bezüglich der Sensitivität, des Frequenzspektrums etc. sind abhängig von der zu untersuchenden Tiergruppe zu treffen.

Der größte Unterschied zwischen herkömmlichen Erfassungsmethoden und automatischen akustischen Erfassungen bestand zuletzt darin, dass menschliche Kartierer Rufe bereits im Gelände unterscheiden und Individuen zuordnen können. Aufnahmen von Vogelrufen mussten in der Regel noch nachgeschaltet von Ornithologen ausgewertet werden. Dieser Arbeitsschritt ist sehr arbeitsaufwendig und steht einem effizienten Einsatz von Audiorecordern im Weg.

Durch die Weiterentwicklung von Arterkennungsalgorithmen kann dieser Arbeitsschritt zunehmend automatisiert erfolgen (SCHUSTER ET AL. 2024; TEIXEIRA ET AL. 2024), dies geht mit einer deutlichen Effizienzsteigerung einher. Für die Zielarten Wachtelkönig und Waldschnepfe konnten im Projekt sehr hohe Erfassungsraten bei geringem Fehleranteil nachgewiesen werden. Auch für weitere Arten liefert der im Projekt verwendete Klassifikator BirdID-Europe254 bereits sehr gute Ergebnisse, eine Verbesserung ist durch gezieltes Training zu erreichen.

Informationen, die mittels autonomen akustischen Erfassungsgeräten generiert wurden, besitzen zudem den Vorteil einer sehr guten Vergleichbarkeit, da der Einsatz technischer Geräte exzellente Möglichkeiten zur Standardisierung bietet (ABRAHAMS 2018; DARRAS *et al.* 2019; RHINEHART *et al.* 2020, ROSS ET AL. 2023).

Je nach Fragestellung und Zielart kann der Grenzwert, ab wann der Klassifikator ein Signal als Ruf der Zielart wertet, strenger oder weniger streng gesetzt werden. Für selten und/oder leise rufende Arten kann so verhindert werden, dass einzelne Rufereignisse nicht erkannt werden. Für gut nachweisbare Arten kann wiederum der Arbeitsaufwand der Nachbearbeitung reduziert werden. Grundsätzlich besteht immer die Möglichkeit, Aufnahmen händisch zu kontrollieren, dies steigert die Belastbarkeit der Datengrundlage enorm.

6.2 Erfassungsdauer

Autonome akustische Erfassungsgeräte sind potenziell dazu in der Lage, Tiere kontinuierlich über einen längeren Zeitraum zu erfassen. Menschliche Kartierer können hingegen „nur“ über wenige Stunden die nötige Konzentration aufrechterhalten, um Rufe ad hoc im Gelände zu erfassen und zu unterscheiden. Zudem sind Arbeitnehmer sinnvollerweise durch das Arbeitszeitgesetz vor unzumutbar langen Kartierungen geschützt. Autonome akustische Erfassungsgeräte entfalten daher vor allem bei längeren

Erfassungen über mehrere Tage ihre Vorteile und entlasten menschliche Kartierer beispielsweise bei anstrengenden nächtlichen Kartierungen. Somit ist es potenziell möglich die aktuell geltenden (Mindest-) Standarderfassungsdauern ohne nennenswerten Mehraufwand zu erhöhen und somit den Informationsgewinn deutlich zu steigern.

Als limitierende Faktoren sind die Stromversorgung sowie die Größe des Speichermediums zu nennen, wobei portable Datenspeicher inzwischen kostengünstig mit sehr großem Speichervolumen (≥ 1 Terabyte) zur Verfügung stehen. Die Stromversorgung sollte idealerweise durch Akkus realisiert werden. Der Größe der Akkus werden in erster Linie durch die Verringerung der Transportmöglichkeit Grenzen gesetzt. Eine zusätzliche Stromversorgung mittels Solarzellen bietet insbesondere für Langzeiterfassungen Vorteile, da so der Wartungsaufwand durch weniger Akkuwechsel reduziert werden kann. Aufgrund der Beschattung dürfte in einigen Lebensräumen der Nutzen von Solarzellen jedoch stark eingeschränkt sein.

Als minimale Erfassungsdauer wird der relevante Aktivitätszeitraum der Zielarten an drei Tagen angesehen, da für den Auf- und Abbau der Geräte jeweils Arbeit im Gelände notwendig ist, die bei kürzerer Erfassungsdauer ein deutlicher Mehraufwand im Vergleich zu herkömmlichen Kartierungen bedeuten würde. Im Einzelfall und je nach Fragestellung ist der Einsatz von autonomen Erfassungsgeräten auch bei kürzeren Erfassungsdauern sinnvoll. Mit dem im Projekt eingesetzten Makita-Akkus (90 Wh) konnte eine ununterbrochene Laufzeit von ca. 8 Stunden realisiert werden. Die Erfassungsdauer kann jedoch verlängert werden, indem die Aufnahmen nur in für die Zielarten relevanten Zeiträumen stattfinden und das System anschließend in einen stromsparenden „Schlafmodus“ versetzt wird.

Die längere Erfassungsdauer stellt einen der Hauptvorteile von autonomen akustischen Erfassungssystemen im Vergleich zu menschlichen Kartierern dar. Positive Auswirkungen sind hinsichtlich des Informationsgewinns sowie der Kosten von Erfassungen zu erwarten.

6.3 Lokalisation

Die Möglichkeit zur Verortung von Vogelrufen kann durch den Einsatz von mehreren Mikrofonen und /oder Erfassungsgeräten während der Kartierungen grundsätzlich geschaffen werden. Herausforderungen bestehen bezüglich der Synchronisation und der späteren Lokalisation (RHINEHART *et al.* 2020).

Durch das Verorten der Vogelrufe ergeben sich weitere Informationsgewinne, welche das Anwendungsfeld autonomer akustischer Erfassungen deutlich erweitern. Dazu zählt insbesondere eine verbesserte Möglichkeit zur Unterscheidung von Individuen derselben Art und somit ein Hilfsmittel zur Zählung/Schätzung der Bestandsgrößen.

Die Richtungsbestimmung von Wachtelkönigrufen konnte bereits mittels eines Algorithmus, welcher direkt auf dem DeViSe-Sensor läuft und an die Arterkennung gekoppelt ist, realisiert werden. Die eigentliche Bestimmung des Ruforts erfolgte innerhalb des Projekts durch nachgeschaltete Triangulationen auf dem Computer. Die Durchführung der Lokalisation direkt im Gelände soll mit Hilfe eines Sensornetzwerks ermöglicht werden, sodass die Informationen zum Rufort auch potenziellen Anwendern ohne tiefere Kenntnisse zur Auswertung von Schallquellen zur Verfügung stehen. Die Etablierung eines Sensorsystems wurde bereits konzeptionell erarbeitet, konnte innerhalb des Projekts jedoch nicht umgesetzt werden.

Für eine exakte Lokalisation weiterer Arten wird noch weitere Entwicklungszeit benötigt. Auch das zeitgleiche Rufen mehrere Individuen einer Art erschwert die Lokalisation. Doch auch schon die Richtungsbestimmung von Rufen kann für die Bewertung von Teilflächen ausreichend sein.

6.4 Datentransfer

Die weitere Auswertung und Bearbeitung der naturschutzfachlichen Daten erfolgt in der Regel in einem Geoinformationssystem (GIS; z. B. ArcGIS oder Quantum-GIS). Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Erkennen- und Lokisationsalgorithmen soll daher auf einen Datentransfer in ein GIS zugeschnitten sein. In einer weiterentwickelten Version des DeViSe-Systems soll die Durchführung der Algorithmen im Gelände erfolgen, sodass keine Nachbereitung der Daten erforderlich ist.

Für die Weiterverarbeitung der Daten im GIS wird eine Attributtabelle (Dateityp .csv) benötigt, welche alle relevanten Informationen enthält. Jedes lokalisierte Rufereignis der Zielart wird mit Angaben der X- und Y-Koordinaten des ermittelten Ruforts versehen. Über die Angaben der Koordinaten können die Informationen mit Raumbezug problemlos ins GIS eingeladen werden.

Möglichkeiten zum Datentransfer wurden im Projekt berücksichtigt und können nach Finalisierung der Erfassung und Lokalisation umgesetzt werden.

6.5 Anwenderfreundlichkeit

Um den Einsatz von autonomen akustischen Erfassungsgeräten für eine großen Anwenderkreis zu öffnen, sollte die Anwendung so unkompliziert wie möglich gestaltet sein. Im Gegensatz zu speziellen Forschungsprojekten stehen in Planungsbüros oder Behörden in der Regel keine Bioakustiker oder Informatiker zur Verfügung, die ein kompliziertes Setup oder langwierige Auswertungen betreuen können. Zudem erhöht sich die Fehlerwahrscheinlichkeit generell, wenn eine Vielzahl an Bearbeitungsschritten notwendig ist.

Grundsätzlich sollten die Einstellungsmöglichkeiten so weit wie möglich festgelegt sein und dabei einen möglichst großen Anwendungsbereich abdecken. Notwendige Anpassungen für einzelne Erfassungen, wie z.B. die Festlegung von Erfassungszeiten sollten mit grundlegenden EDV-Kenntnissen durchführbar sein.

Ein besonderes Augenmerk liegt auch auf der Installation im Gelände. Dort sollten nach Möglichkeit nur noch wenige Schritte notwendig sein, um die Geräte funktionsbereit zu machen. Aufwendige Vorbereitungs-schritte erhöhen den Zeitaufwand der Geländearbeit und sorgen für Fehler, die die Vergleichbarkeit oder die Verfügbarkeit der Daten behindern.

Zu den Vereinfachungen der Installation im Gelände zählt auch eine gute Handhabbarkeit und ein geringes Gewicht, was den Transport vereinfacht. Insbesondere die letzten Meter werden im Gelände in der Regel zu Fuß zurückgelegt. Schwere und überflüssige Gerätschaften reduzieren die Mobilität im Gelände und machen den Einsatz unattraktiv. Dies gilt in gesteigertem Maße für unwegsames Gelände, für das autonome akustische Erfassungsgeräte in erster Linie eine adäquate Alternative darstellen sollen.

Ein Fernzugriff auf das System bietet verschiedene Vorteile und Möglichkeiten, welche die Anwenderfreundlichkeit erhöhen. Idealerweise ist es möglich, aus dem Büro auf einzelne Geräte zuzugreifen, um

zu überprüfen, ob die Erfassung wie geplant durchgeführt wird und ob eventuell schon erste Ergebnisse vorliegen. Störungen oder Beschädigungen können dadurch frühzeitig und mit vergleichsweise geringem Aufwand festgestellt werden, um anschließend die Fehler im Gelände zu beheben und somit den Datenverlust minimal zu halten.

Da es sich bei dem im Projekt entwickelten Sensor in erster Linie um einen Prototypen handelt, besteht in puncto Anwenderfreundlichkeit noch großer Verbesserungsbedarf.

6.6 Kosten

Der Einsatz von autonomen akustischen Erfassungsgeräte bietet großes Potenzial, die Kosten von immer aufwendiger und anspruchsvoller werdenden Vogelerfassungen zu senken. Voraussetzungen dafür sind die Möglichkeit, dass Geräte über einen längeren Zeitraum im Gelände verbleiben können und dort aufnehmen sowie die Verbesserung von automatisierten Auswertungsverfahren (Artbestimmung und Lokalisation).

Kosten entstehen durch das Ausbringen und das Einbringen der Geräte sowie durch ggf. notwendige Kontrollen oder Wechsel der Stromversorgung bzw. des Speichermediums. Sofern für diese Termine weniger Personalstunden benötigt werden als für vergleichbare Erfassungen durch menschliche Kartierer, überwiegt der finanzielle Nutzen der akustischen Erfassungsgeräte. Sofern eine automatische Auswertung möglich ist, reduziert sich dort der benötigte Arbeitsaufwand deutlich. Der tatsächliche monetäre Vorteil lässt sich pauschal nicht quantifizieren, sondern ist stets abhängig von der Fragestellung und dem Umfang der Arbeiten.

Der zu erwartende Aufwand von herkömmlichen Kartierungen hängt von der konkreten Aufgabenstellung ab. Insbesondere wenn vielen Termine an unterschiedlichen Tageszeitpunkten und/oder lange Anfahrtszeiten benötigt werden, rentieren sich automatisierte Alternativen. Für herkömmliche Revierkartierungen stehen oftmals nur wenige Arbeitsstunden zur Verfügung, um großflächige Areale zu bearbeiten. So werden bei SÜDBECK ET AL. (2005) für die Bearbeitung eines 100 ha großen Gebiets maximal zehn Termine à 8 Stunden vorgesehen. Eine vergleichbare räumliche Abdeckung kann nur mit einer Vielzahl an Geräte realisiert werden.

Kosten für die Hardware stellten in der Vergangenheit ein größeres Hemmnis für einen flächendeckenden Einsatz in der naturschutzfachlichen Praxis dar. Inzwischen hat sich der Preis für Audiorecorder, Speichermedien und Motherboards deutlich reduziert, sodass die Materialkosten von einsatzbereiten Geräten im dreistelligen bis niedrigen vierstelligen Bereich liegen. Dadurch, dass in der Regel mehrere Geräte für (parallele) Kartierungen benötigt werden, sind dennoch höhere Investitionskosten für Planungsbüros und sonstige Anwender zu erwarten. Diese Kosten amortisieren sich jedoch durch die erwartbaren Vorteile bei den Erfassungen. Diese Rechnung verbessert sich zusätzlich durch eine wünschenswerte Wartungsarmut der Geräte.

Der Verkaufspreis von handelsüblichen passiven Aufnahmesystemen für Fledermausrufe liegt inkl. (nicht-automatisierter) Auswertungssoftware bei 1.000 bis 2.000 Euro. Für umfassende Fledermauserfassungen (z.B. für den Straßenbau) werden nicht selten dutzende Geräte gleichzeitig benötigt. Auch in diesem Beispiel überwiegt der Nutzen die Kosten auf lange Sicht deutlich.

Die Hardware-Kosten des DeVise-Systems liegen aktuell bei wenigen hundert Euro, im Zuge weiterer Anpassungen sind ggf. Anpassungen zu treffen. Durch die Projektförderung sind große Teile der Entwicklung, insbesondere der Auswertungssoftware, bereits finanziert. Dies wirkt sich positiv auf einen potenziellen Verkaufspreis aus.

Zusätzlich gilt es zu berücksichtigen, dass sich der Fachkräftemangel erwartbar auch im Berufsfeld der Freilandbiologen bemerkbar macht und technische Alternativen somit langfristig die Handlungsfähigkeit sicherstellen und sogar erhöhen können.

6.7 Übersicht der Systemeigenschaften

In Tabelle 8 ist eine Übersicht der wichtigsten Systemleistungen und deren Erfüllungsgrad innerhalb des Projekts dargestellt. Nicht alle benötigten Systemleistungen konnten im Projekt bereits vollständig realisiert werden. Für die Erfüllung der wesentlichen Projektziele war dies allerdings auch nicht zwingend notwendig bzw. nicht immer möglich.

Eine „vollständige“ Realisierung innerhalb des Projekts ist gleichzusetzen mit einem Entwicklungsstand, der einer potenziellen Nutzung durch zukünftige Anwender entspricht. Systemleistungen die „teilweise“ erreicht wurden, müssen entweder noch überarbeitet/verbessert werden oder können aktuell nur durch besonders geschultes Personal erbracht werden. Für „konzeptionell“ realisierte Punkte wurden bereits die Voraussetzungen erarbeitet, aufgrund noch nicht finaler vorgeschalteter Punkte, erfolgte jedoch keine weiterführende Ausarbeitung.

Tabelle 8: Übersicht des Erfüllungsgrads verschiedener Systemeigenschaften des Sensorsystems

Systemleistungen	Im Projekt realisiert			
	Vollständig	Teilweise	Konzeptionell	Nicht erreicht
Automatische Erkennung	x			
Anforderungen an die Erfassungsdauer		x		
Automatische Lokalisation		x		
Datentransfer			x	
Anwenderfreundlichkeit		x		

7 Ausblick

Im Projekt wurde ein Prototyp eines akustischen Sensors entwickelt, der es erlaubt mit hoher Sicherheit zwei Zielarten (Wachtelkönig und Waldschnepfe) zu erkennen. Die Berechnung der Erkennung erfolgt direkt auf dem Sensor und liegt in quasi Echtzeit (wenige Minuten nach Speicherung der Audio-datei) auf dem Sensor vor. Für den Wachtelkönig konnte auch ein Lokalisationsalgorithmus entwickelt und auf dem Sensor implementiert werden. Unter Einsatz mehrerer Sensoren kann damit die räumliche Verteilung der akustischen Aktivität erfasst werden. Für Untersuchung der räumlichen Verteilung von Heuschrecken konnte jedoch auf Grund der extremen Komplexität der Problemstellung bisher noch kein befriedigender Lösungsansatz gefunden werden.

Für die beiden Modellarten wurde der Sensor bereits für gutachterliche Tätigkeit bzw. Als Unterstützung naturschutzfachlicher Entscheidungen eingesetzt. Dadurch konnten zum einen Verbesserungsvorschläge für Design des Sensors und den Workflow der Ergebnisaufbereitung aufgezeigt werden. Zum anderen konnten potenzielle weitere Einsatzgebiete definiert werden. Die Ausweitung des Artenspektrums auf 20 Wiesenbrütervogelarten erfolgt derzeit im Projekt DeWiese. Im Rahmen dieses Projektes erfolgt auch eine weitere Entwicklung des Sensors mit dem Ziel, dass das System selbständig von Nutzern in der Praxis betrieben werden kann.

8 Literatur

- ABRAHAMS, C. (2018): Bird Bioacoustic Survey - Developing a Standard Protocol. In Practice (120): 20-23.
- ADAVANNE, S., POLITIS, A., NIKUNEN, J. & T. VIRTANEN (2019): Sound Event Localization and Detection of Overlapping Sources Using Convolutional Recurrent Neural Networks. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, **13**: 34-48, doi: 10.1109/JSTSP.2018.2885636.
- BRAAKSMA S & J. VAN DER STRAATEN (1994): *Crex crex* - Wachtelkönig, Wiesenralle. In: GLUTZ VON BLOTZHEIM, U.N., BAUER, K.M. & E. BEZZEL: Handbuch der Vögel Mitteleuropas. Band 5. Galliformes. AULA-Verlag, Wiesbaden: 444-468.
- BRAVO, C.J.C, BERRIOS, R.A. & T. M. AIDE (2017): Species-specific audio detection: a comparison of the three template-based detection algorithms using random forests. PeerJ Computer Science, **3**: e113. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.113>.
- BROWNING, E., R. GIBB, P. GLOVER-KAPFER & K. E. JONES (2017): Passive acoustic monitoring in ecology and conservation. 75 S.
- BUDKA, M., & T. S. OSIEJUK (2017): Microgeographic call variation in a non-learning species, the Corn-crake (*Crex crex*). Journal of Ornithology **158**: 651-658.
- DARRAS, K., BATÁRY, P., FURNAS, B. J., GRASS, I., MULYANI, Y. A., & T. TSCHARNTKE (2019): Autonomous sound recording outperforms human observation for sampling birds: a systematic map and user guide. Ecological Applications **29**: e01954.
- DI BIASE, J. H. (2000): A high-accuracy, low-latency technique for talker localization in reverberant environments using microphone arrays. Brown University.
- FODOR, G., (2013): Random Forest Algorithm Source Code, The Ninth Annual MLSP Challenge, Web Reference. https://github.com/GABORFODOR/MLSP_2013.
- FUNOSAS, D., L. BARBARO, L. SCHILLÉ, A. ELGER, B. CASTAGNEYROL & M. CAUCHOIX (2024): Assessing the potential of BirdNET to infer European bird communities from large-scale ecoacoustic data. Ecol. Indicators (164): 13 S.
- GLUTZ VON BLOTZHEIM, U.N., BAUER, K.M., BEZZEL, E. (1985): Handbuch der Vögel Mitteleuropas. Band 7. Charadriiformes (2. Teil). AULA-Verlag, Wiesbaden.
- LASSECK M. (2019): Bird Species Identification in Soundscapes. In: CEUR Workshop Proceedings 2380. https://CEUR-WS.org/Vol-2380/paper_86.pdf
- LASSECK M. (2023): Bird Species Recognition using Convolutional Neural Networks with Attention on Frequency Bands. In: CEUR Workshop Proceedings 3497. <https://ceur-ws.org/Vol-3497/paper-175.pdf>
- MARCKMANN, U. & B. PFEIFFER (2020): Bestimmung von Fledermausrufaufnahmen und Kriterien für die Wertung von akustischen Artnachweisen. Teil 1 – Gattungen *Nyctalus*, *Eptesicus*, *Vespertilio*, *Pipistrellus* (nyctaloide und pipistrelloide Arten), Mopsfledermaus, Langohrfledermäuse und Hufeisennasen Bayerns. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Hrsg.). Augsburg, 86 S.
- MU Nds. (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz) (2016): Leitfaden Umsetzung des Artenschutzes bei der Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen in

Niedersachsen. Niedersächsisches Ministerialblatt 66. (71.) Jahrgang, Nr. 7. Hannover, 24.2.2016, 15 S.

RHINEHART, T. A., L. M. CHRONISTER, T. DEVLIN & J. KITZES (2020): Acoustic localization of terrestrial wildlife: Current practices and future opportunities. *Ecology and Evolution* **10**: 6794-6818.

ROSS, S. R. P.-J., D. P. O'CONNELL, J. L. DEICHMANN, C. DESJONQUÈRES, A. GASC, J. N. PHILLIPS, S. S. SETHI, C. M. WOOD & Z. BURIVALOVA (2023): Passive acoustic monitoring provides a fresh perspective on fundamental ecological questions. *Funct. Ecol.* (37): 959-975.

SCHUSTER, G. E., L. WALSTON, J., & A. R. LITTEL (2024): Evaluation of an autonomous acoustic surveying technique for grassland bird communities in Nebraska. *PLoS ONE*: 18 S.

SHONFIELD, J., & E. M. BAYNE (2017): Autonomous recording units in avian ecological research: current use and future applications. *Avian Conservation and Ecology* **12**: 14.

SÜDBECK, P., H. ANDREZKE, S., FISCHER, K. GEDEON, T. SCHIKORE, K. SCHRÖDER & C. SUDFELDT (2005): Methodenstandards zur Erfassung der Brutvögel Deutschlands. Radolfzell.

TEIXEIRA, D., P. ROE, B. J. VAN RENSBURG, S. LINKE, P. G. McDONALD, D. TUCKER & S. FULLER (2024): Effective ecological monitoring using passive acoustic sensors: Recommendations for conservation practitioners. *Conservation Science and Practice*: 15 S.