

**BirdVision<sup>®</sup>**

## **Weiterentwicklung eines Kamerasystems zur Erfassung und zum Schutz windkraftempfindlicher Vogelarten an Windenergieanlagen**

**Abschlussbericht – Schlussbericht**

**Förderkennzeichen 03EE2013**

**Laufzeit: 01.11.2019 bis 31.12.2022**



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Bürgerwindpark  
Hohenlohe 

Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH  
Dezember 2022

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



**Titel:** BirdVision® - Weiterentwicklung eines Kamerasystems zur Erfassung und zum Schutz windkraftempfindlicher Vogelarten an Windenergieanlagen

**FKZ:** 03EE2013

**Laufzeit:** 01.11.2019 bis 31.12.2022

**Koordinator:** Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH (Kleines Unternehmen)  
Herr Markus Pubantz  
Braunsbergweg 5  
74676 Niedernhall  
Tel.: 07940 50 96 20 0  
Fax: 07940 50 96 21 0  
[pubantz@birdvision.org](mailto:pubantz@birdvision.org)  
[www.birdvision.org](http://www.birdvision.org)



## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	3
Abbildungsverzeichnis .....	4
Tabellenverzeichnis .....	6
Abkürzungsverzeichnis .....	6
I. Kurze Darstellung .....	8
I.1 Aufgabenstellung .....	8
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	11
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	11
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	12
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	16
II. Eingehende Darstellung .....	17
II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	17
II.1.1 Arbeitspaket 1 - Klassifikation deutschlandweit vorkommender Vogelarten .....	20
II.1.2 Arbeitspaket 2 - Rechtzeitige Erfassung schnell fliegender windkraftempfindlicher Vogelarten .....	31
II.1.3 Arbeitspaket 3 - Weitergehende Reduktion von Fehlauflösungen zur Schonung der Anlagentechnologie und zur Ertragsoptimierung .....	41
II.1.4 Arbeitspaket 4 - Ausgabe eines Flugbildes mit Geokoordinaten und freistehendes Monitoring- und Schutzsystem .....	52
II.1.5 Arbeitspaket 5 - Detektion von nächtlichen fliegenden Tieren wie Zugvögel und Fledermäuse .....	62
II.1.6 Arbeitspaket 6 - Prozessoptimierung der Verarbeitungshardware .....	74
Quellenverzeichnis .....	77



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Visualisierung Störeinflüsse .....	14
Abbildung 2: Kamerasystem mit sechs Paaren am Turmfuß (links) und Blick auf das Kameraschutzgehäuse aus Aluminium (rechts).....	17
Abbildung 3: Algorithmen von BirdVision®.....	18
Abbildung 4: Detektions- und Abschalttradien im Windpark Weißbach .....	19
Abbildung 5: BirdVision® bekannte Vogelgattungen zur Klassifikation .....	20
Abbildung 6: Bewertung der Klassifikation in der Basisversion von BirdVision® im Juli 2020 mit einem gemeinsamen Netzwerk.....	21
Abbildung 7: Bewertung der Klassifikation bei einem getrennten Klassifikationsnetzwerk im Juni 2021 .....	22
Abbildung 8: Beispiele für Mäusebussard und Rotmilan.....	23
Abbildung 9: Datenbankstruktur BirdVision® .....	25
Abbildung 10: Reporting/Diagramme auf der Webplattform .....	26
Abbildung 11: Reporting/Reports auf der Webplattform .....	26
Abbildung 12: Darstellung eines einzelnen Flugereignis in der Webplattform .....	27
Abbildung 13: Darstellung von Flugereignissen an drei Tagen auf der Webplattform .....	28
Abbildung 14: Auswertungen über definierbare Zeiträume.....	28
Abbildung 15: Änderung der Daten, die für ein Diagramm verwendet werden.....	29
Abbildung 16: Speziesverwaltung auf der Webplattform .....	29
Abbildung 17: Übersicht eines Windparks mit künftiger Darstellung von Ertragsverlusten .....	30
Abbildung 18: Beispiel für ein von BirdVision® erkanntes Vogelobjekt mit einer Größe von 5 Px x 4 Px .....	32
Abbildung 19: Beispiel für die Reichweite eines Kamerasystems mit verändertem Objektivöffnungswinkel.....	32
Abbildung 20: Kamerahardware Reichweitentests.....	34
Abbildung 21: Blickfeld dreier Brennweiten.....	34
Abbildung 22: Gegenüberstellung eines Mäusebussardfluges mit drei unterschiedlichen Brennweiten .....	35
Abbildung 23: Entwicklung der Kameragenerationen .....	37
Abbildung 24: Erfasster Rotmilan in einer Entfernung von ca. 500 m, ab dem roten Track innerhalb der 250 m Schutzzone .....	38
Abbildung 25: Gutachterliche Auswertung Vogelerkennung.....	40
Abbildung 26: Fehlauslöser des Systems .....	40
Abbildung 27: Aufnahmeverhalten der Basisversion von BirdVision® im August 2019 .....	41
Abbildung 28: Mäusebussard in einer Entfernung von ca. bis 200 m .....	42
Abbildung 29: Rotmilan in einer Entfernung von ca. 100, 300 m bis 400 m .....	42



Abbildung 30: Von BirdVision® detektiertes Insekt (links) und von BirdVision® detektiertes Flugzeug (rechts).....	43
Abbildung 31: Aufnahme eines Verkehrsflugzeuges in großer Höhe .....	44
Abbildung 32: Aufnahme eines Turmfalken .....	44
Abbildung 33: Auswertung Messwert Krümmung .....	45
Abbildung 34: Trackingalgorithmen im Vergleich .....	46
Abbildung 35: Ausgabe der BirdVision® Version im Juni 2022 .....	47
Abbildung 36: Fehlauslösung andere Windenergieanlage (links) und Fehlauslösung Flugzeug (rechts) .....	48
Abbildung 37: Alarmer mit simulierter Abschaltung der BirdVision® Version im Juni 2022.....	48
Abbildung 38: Unterteilung der Aufnahmen und Alarmer im Juni 2022 nach Vogelgröße.....	49
Abbildung 39: Klassifikationsklassen von BirdVision® nach Spannweite .....	50
Abbildung 40 Auswertung Drohnenflug .....	52
Abbildung 41: Darstellung eines kameraübergreifenden Kreisfluges eines Vogels im 3D-Raum .....	53
Abbildung 42: Kameraübergreifendes Bild zum aktuellen Entwicklungsstand .....	53
Abbildung 43: Schemaplan Energieversorgung .....	55
Abbildung 44: Einzelnes Kameraschutzgehäuse (links) und Konstruktionszeichnung Stereokonfiguration (rechts) .....	56
Abbildung 45: Stereokamerasystem freistehendes Monitoringsystem .....	57
Abbildung 46: Aufnahme eines Rotmilans durch das freistehende Monitoringsystem am Standort Erweiterung Windpark Dörrenzimmern .....	58
Abbildung 47: Freistehendes Monitoringsystem im fahrbereiten Zustand .....	59
Abbildung 48: Freistehendes Monitoringsystem im aufgebauten Betriebszustand .....	59
Abbildung 49: Freistehendes Monitoringsystem Innenansicht I.....	60
Abbildung 50: Freistehendes Monitoringsystem Innenansicht II.....	60
Abbildung 51: Freistehendes Monitoringsystem unabhängige Energieversorgung mit Generator.....	61
Abbildung 52: Freistehendes Monitoringsystem unabhängige Energieversorgung Gasvorrat.....	61
Abbildung 53: Manuelle Aufnahme einer Fledermaus an einer Windenergieanlage .....	62
Abbildung 54: links Flugzeug, rechts zahlreiche Insekten (rote Markierung) .....	63
Abbildung 55: Schäden durch direkte Sonneneinstrahlung auf dem Sensor.....	63
Abbildung 56: „Testfledermaus“ im Abstand von 15 m .....	64
Abbildung 57: Montageskizze von fünf Wärmebildkamarasystemen auf dem Maschinenhaus .....	66
Abbildung 58: IR-Kameraanordnung auf dem Maschinenhaus im Windpark Weißbach .....	66
Abbildung 59: Tagging Programm "TagBat", hier zum Taggen von Fledermäusen .....	68
Abbildung 60: Markierung von zwei Vögeln in TagBird.....	69
Abbildung 61: Falsche Markierung von zwei Vögeln in TagBird .....	69
Abbildung 62: Verschiedene Qualitäten von Fledermausaufnahmen .....	70



Abbildung 63: Fledermausaufnahme gegen bewölkten Hintergrund (links) und oberhalb des Kühlers (rechts).....	70
Abbildung 64: Fledermausaufnahme gegen den Boden (links) und Fehlauflöser an der Rotorblattspitze (rechts) .....	71
Abbildung 65: Installierte Kameras auf der Gondel der Windenergieanlage .....	71
Abbildung 66: IR-Kamera unten im Windschatten des Turmes der Windenergieanlage.....	72
Abbildung 67: Rolling-Shutter-Effekt an Rotoren .....	75

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispielhafter Objektivvergleich mit Darstellung eines Rotmilans .....	36
Tabelle 2: Größenklassifikation an zwei Tagen im September 2022 .....	50
Tabelle 3: Reichweitenermittlung Wärmebildkamera für unterschiedliche Objektive .....	65

## Abkürzungsverzeichnis

2-D	zweidimensional/Zweidimensionalität
3-D	dreidimensional/Dreidimensionalität
Abb.	Abbildung
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
DNP	Die Naturschutzplaner GmbH
GG	Grundgesetz
IR	Infrarot
KI	Künstliche Intelligenz
KNE	Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende
LRF	Laser Range Finder
MB	Mäusebussard
MP	Megapixel
PTP	Precision Time Protocol
Px	Pixel
RM	Rotmilan
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition - – deutsch: Überwachung, Steuerung und Datenerfassung. Ein Kontrollsystem welches zur Steuerung von technischen Prozessen in Windparks benutzt wird.



Tab.

Tabelle

TF

Turmfalke

WEA

Windenergieanlage



## I. Kurze Darstellung

### I.1 Aufgabenstellung

Die Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH entwickelt unter dem Namen BirdVision® seit Dezember 2017 ein kamerabasiertes System zur Erfassung und zum Schutz windkraftempfindlicher Vogelarten an Windenergieanlagen. Ziel des Systems ist es, Flüge windkraft- und nichtwindkraftempfindlicher Vogelarten im direkten Umfeld einer Windenergieanlage vollautomatisch zu detektieren, zu verfolgen und im Bedarfsfall zum Schutz vor einer Kollision die entsprechende Windenergieanlage rechtzeitig außer Betrieb zu nehmen. Damit soll das Kollisionsrisiko windkraftempfindlicher Vogelarten unter die Signifikanzschwelle gesenkt werden sowie die derzeitigen manuell umzusetzenden pauschalen Vermeidungsmaßnahmen bedarfsorientiert automatisiert werden. Die Signifikanzschwelle legt dar, ob eine Windenergieanlage das Tötungs- und Verletzungsrisiko kollisionsgefährdeter Brutvogelarten signifikant erhöht oder nicht. Für die Signifikanzschwelle gab es bisher keine festgelegten Grenzwerte. Erst mit der Novellierung des Bundesnaturschutzgesetzes im Jahr 2022 hat der Gesetzgeber in § 45b BNatSchG definiert, wann das Tötungs- und Verletzungsrisiko erhöht ist und wann nicht. Als Hilfwert wurden Radien um eine Windenergieanlage definiert, in denen sich keine Brutplätze windkraftempfindlicher Vogelarten befinden dürfen bzw. ab welchem Abstand oder mit welchen Vermeidungsmaßnahmen (darunter Antikollisionssysteme) kein signifikant erhöhtes Tötungsrisiko mehr vorliegt.

Das Konfliktfeld Windenergie und Artenschutz soll dadurch deutlich entspannt werden. Ebenfalls kann BirdVision® ohne eine direkte Schnittstelle zur Windenergieanlage zum Monitoring von Vogelarten im Umfeld der Windenergieanlage eingesetzt werden. Ziel der Entwicklung ist es, ein langlebiges, effektives und nahezu fehlerfreies System mit aktueller Bildverarbeitungstechnologie zu entwickeln, in den Markt einzuführen und als Vermeidungsmaßnahme an Windenergieanlagen zu etablieren.

Zum Zeitpunkt des Projektstartes befanden sich im Nord-Osten Baden-Württembergs sechs Prototypensysteme im Einsatz, welche das oben skizzierte Ziel in groben Zügen umsetzen konnten. BirdVision® basiert auf langlebigen Industriekameras mit entsprechenden hochwertigen Objektiven und Schutzgehäusen als Sensoren auch im Stereobetrieb (Entfernungsmessung), einer hochtechnologischen Servereinheit mit mehreren Grafikeinheiten zur Signalverarbeitung, einer entsprechenden Software bestehend aus einem neuronalen Netzwerk (Deep Learning, KI, mit umfangreicher Datenbank) zur Erfassung von fliegenden Objekten in Verbindung mit einem intelligenten Tracking (Filtern von Störeinflüssen und Verfolgung von fliegenden Tieren) sowie einer Schnittstelle zur Windenergieanlage als Aktor. Das hier ausgeführte System wird im Folgenden als „Basissystem“ bezeichnet.

Das Basissystem erfüllt noch nicht alle Anforderungen, welche seitens Genehmigungsbehörden, des Naturschutzes und von Anlagenbetreiber an derartige Systeme gestellt werden. Außerdem ist es



technisch möglich, weitere Elemente der industriellen Bildverarbeitung zu verwenden, um die Anwendungsmöglichkeiten von BirdVision® deutlich zu erweitern.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes, im Folgenden als „geförderte Weiterentwicklung“ von BirdVision® bezeichnet, sollen in sechs Arbeitspaketen die Möglichkeiten von BirdVision® verbessert und erweitert werden. Diese sind:

- **Klassifikation deutschlandweit vorkommender Vogelarten (Themenbereich 1)**

Die Basisversion konzentriert sich ausschließlich auf die Erkennung des Artenspektrums im Nord-Osten Baden-Württembergs bestehend aus der windkraftempfindlichen Vogelart Rotmilan sowie den nichtwindkraftempfindlichen Vogelarten Mäusebussard, Turmfalke und Saatkrähe. Weitere deutschlandweit vorkommende windkraftempfindliche Vogelarten wie beispielsweise der Wespenbussard, der Seeadler und der Schwarzstorch sind BirdVision® nicht bekannt. Die geförderte Weiterentwicklung soll daher BirdVision® um weitere windkraftempfindliche Vogelarten, zu deren Erkennung und Unterscheidung erweitern. Zusätzlich soll in diesem Schritt eine Datenbank- und Webplattform aufgebaut werden, mit der ein Monitoring zur Validierung der Ergebnisse durch Biologen effizienter und einfacher gestaltet werden kann.

- **Rechtzeitige Erfassung schnell fliegender windkraftempfindlicher Vogelarten (Themenbereich 2)**

Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurde BirdVision® in Bezug auf eine vergleichsweise langsam fliegende windkraftempfindliche Vogelart (den Rotmilan) entwickelt. Daran orientiert sich auch die zum Einsatz kommende Hard- und Software. Zur rechtzeitigen Erfassung schnell fliegender windkraftempfindlicher Vogelarten wie beispielsweise dem Seeadler muss eine andere Zusammenstellung der Kamera- und Serverhardware sowie gegebenenfalls der Software projektiert, entwickelt und im Feld getestet werden.

- **Weitergehende Reduktion von Fehlauslösungen zur Schonung der Anlagentechnologie und zur Ertragsoptimierung (Themenbereich 3)**

Die Basisversion wird noch von zahlreichen Störeinflüssen begleitet, welche in der Lage sind zu Fehldetektionen und damit auch zu nicht erforderlichen Abschaltungen von Windenergieanlagen führen. Im Zuge der Weiterentwicklung sollen diese Fehlauslösungen auch im Hinblick zur Schonung der Anlagentechnologie (weniger Stopp- und Startmanöver) sowie zur Ertragsoptimierung durch weniger Abschaltungen berücksichtigt werden. Ergänzend soll eine Darstellung eines Flugbildes über mehrere Kameras in einer Foto- und Videomontage für BirdVision® entwickelt werden.



- **Ausgabe eines Flugbildes mit Geokoordinaten und freistehendes Monitoring- und Schutzsystem (Themenbereich 4)**

Die Basisversion gibt als „Output“ ein Kamerabild mit Fluglinie des Vogels sowie ein komprimiertes Video mit Fluglinie zur Dokumentation aus. Mit Verknüpfung des Stereobetriebes kann nach einer weiteren Entwicklung der Software die Flugbewegung des Vogels mit x, y und z-Werten von Geokoordinaten im Raum angegeben werden. Damit wären umfangreiche Auswertungen des Flugverhaltens von Vogelarten im Umfeld von Windenergieanlagen möglich. Ziel könnte beispielsweise sein, die tatsächliche Gefährdung von Vogelarten an Windenergieanlagen in der Praxis in großem Stil zu ermitteln oder beispielsweise ein Meideverhalten nachzuweisen. Durch die Ausgabe von Geokoordinaten ist dies für eine große Anzahl an Flügen nachvollziehbar. Die Geokoordinaten sollen hierbei für eine Bearbeitung in geografischen Informationssystemen aufbereitet sowie selbst in von BirdVision® generierten Karten dargestellt werden. Hierfür wird auch eine „Stand-Alone“-Montage unabhängig von der Windenergieanlage entwickelt. BirdVision® wird dabei auch zum Monitoring von Vogelarten auf freiem Feld als mobile Einheit, beispielsweise im Vorfeld einer Windenergiegenehmigung oder auch bei der Planung und Überwachung anderer Querschnittstechnologien oder zur bedarfsgerechten Abschaltung von einem WEA-unabhängigen Standort aus eingesetzt. Hierzu ist unter anderem die Entwicklung einer mobilen Stromversorgung und Datenübertragung sowie eine automatische Kalibrierung mit weiteren BirdVision®-Systemen im Gelände erforderlich.

- **Detektion von nächtlichen fliegenden Tieren wie Zugvögel und Fledermäuse (Themenbereich 5)**

Die Basisversion kommt nur tagsüber bei Lichteinstrahlung zum Einsatz. Nächtlich fliegende Tiere wie bestimmte Zugvogelarten und Fledermäuse werden von der Basisversion nicht erfasst. Das System könnte jedoch um wärmebildgebende Sensoren ergänzt und daraufhin ein neuronales Netzwerk programmiert werden, damit ein Monitoring und eine bedarfsgerechte Anlagenabschaltung für nachtaktive, fliegende Tiere umgesetzt werden kann. Neben dem bedarfsgerechten Schutz dieser Tiere könnte auch eine Ertragssteigerung durch die seitherige pauschale nächtliche Abschaltung bei fledermausfreundlichen Bedingungen erfolgen. Insbesondere bei Offshore-Windenergieanlagen wird das Kollisionsrisiko im Dunkeln durch nachts ziehende Arten (Singvögel, Drosseln) als besonders hoch eingeschätzt. BirdVision® wird um wärmebildgebende Sensoren ergänzt und könnte damit den Markt der Offshore-Windenergie erschließen, da an diesen Anlagen ein nächtliches Schutzsystem als zwingend erforderlich erachtet wird.



- **Prozessoptimierung der Verarbeitungshardware (Themenbereich 6)**

In der Bildverarbeitungsbranche sind derzeit spezielle Industriekameras mit interner Verarbeitung für die Deep Learning Technologie auf dem Vormarsch. Diese versprechen deutliche Kosteneinsparungen der aufwendigen Bildverarbeitungstechnik auf speziellen Servern. Hierfür müsste das neuronale Netzwerk von BirdVision® in der Leistung und Verarbeitungsdauer auf diese Technik hin optimiert werden.

Die Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH plant die Basisversion weiterzuentwickeln und in einer derzeit in Gründung befindlichen Vertriebs- und Betriebsgesellschaft zu einer Marktreife / Markteinführung zu bringen. Die hochwertige Bildverarbeitungshardware soll darüber hinaus bei Leerlauf nachts für die Detektion nächtlich fliegender Vögel und Fledermäuse via Wärmebildkameras sinnvoll verwendet werden.

## **I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Die Bürgerwindpark Hohenlohe Unternehmensgruppe plant, entwickelt und betreibt Windenergieprojekte und Freiflächenphotovoltaikanlagen. Zum Zeitpunkt des Abschlusses der Förderung sind dies 23 Windenergieanlagen und drei Freiflächenphotovoltaikanlagen.

Im Windpark Weißbach setzt die Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH als technische Betriebsführung seit 2016 umfangreiche artenschutzrechtliche Vermeidungsmaßnahmen für die windkraftempfindliche Vogelart Rotmilan um und hat diese durch biologische Monitorings bereits weiterentwickelt. Dieser nahe gelegene Windpark war während der Projektlaufzeit Haupttest- und Entwicklungsort der geförderten Weiterentwicklung, da dieser ideale Entwicklungsvoraussetzungen mit der regelmäßigen Anwesenheit von mehreren windkraftempfindlichen Vogelarten aufweist.

Im Dezember 2017 hat die Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH mit der Entwicklung der Basisversion von BirdVision® begonnen und damit Erfahrungen mit der Bildverarbeitungstechnologie im Hinblick auf die Nutzung zur Detektion, Erfassung und zum Schutz von windkraftempfindlichen Vogelarten an Windenergieanlagen sammeln können. Mit Projektstart der geförderten Weiterentwicklung hat die Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH zahlreiche Entwicklungsleistungen für BirdVision® extern an spezialisierte Dienstleister vergeben. Im Zuge der geförderten Weiterentwicklung wurde eigenes Personal aufgebaut. Dies hat sowohl die hardware- als auch softwareseitige Entwicklung sowie die Projektsteuerung und Zuarbeit übernommen.

## **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die Projektlaufzeit begann im November 2019 und sollte ursprünglich im Dezember 2021 abgeschlossen werden. Insbesondere aufgrund der Einschränkungen der Corona-Pandemie, der



Lieferkettenproblematik sowie der anfangs unterschätzten zeitlichen Komplexität des Projektes wurde die Projektlaufzeit bis Dezember 2022 verlängert. Die Gesamtprojektzeit betrug damit 38 Monate. Die Steuerung des Projektes erfolgte durch die Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH. Hierzu fanden unter den internen Mitarbeitern wöchentliche Jour-Fix zur Abstimmung des Projektstandes und der Verteilung einzelner Aufgaben statt. Der Hauptsoftwareentwickler arbeitete kontinuierlich an monatlichen Aufgaben, so genannte Entwicklungssprints. Diese wurden vierwöchentlich konstruiert, bearbeitet und validiert. Mit den externen Dienstleistern fand je nach Projektstand ein inhaltlicher Austausch statt.

Die Entwicklungstätigkeit ist stark beeinflusst von den jahreszeitlichen Aktivitäten der windkraftempfindlichen Vogelarten. Grob gegliedert sind diese (insb. der Rotmilan) im Zeitraum März bis September aktiv. Im Winterhalbjahr ziehen diese Vogelarten überwiegend in den Süden, so dass mit deutlich geringerer Großvogelaktivität zu rechnen ist. Im nordöstlichen Baden-Württemberg sind im Winterhalbjahr lediglich die Vogelarten Mäusebussard und Turmfalke präsent. Entsprechend wurden die Entwicklungsschritte an diese Zeiträume angepasst. Theoretische Entwicklungen fanden verstärkt im Winterhalbjahr statt, während Testphasen im Windpark Weißbach vermehrt in den Sommermonaten durchgeführt wurden. Ebenfalls stand das Bearbeiten von Fehlern (Bug-Fixing) in den Sommermonaten an.

#### **I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Bei der Bürgerwindpark Hohenlohe Unternehmensgruppe, als auch in der Windbranche allgemein, besteht Bedarf, pauschale und manuell umzusetzende Vermeidungsmaßnahmen für windkraftempfindliche Vogelarten zu automatisieren. Bei einer Marktsondierung nach etwaigen Systemen ergab sich, dass kein System auf dem Markt erhältlich war, welches den hohen Anforderungen des deutschen Naturschutzrechtes, als auch den Anforderungen von Windparkbetreibern gerecht wird.

Die Besonderheit in Deutschland ist, dass Tiere sowohl durch das Grundgesetz als auch durch verschiedene andere Gesetze unter besonderen Schutz gestellt werden. In Paragraf 20a des Grundgesetzes heißt es:

„Der Staat schützt auch in Verantwortung für die künftigen Generationen die natürlichen Lebensgrundlagen und die Tiere im Rahmen der verfassungsmäßigen Ordnung durch die Gesetzgebung und nach Maßgabe von Gesetz und Recht durch die vollziehende Gewalt und die Rechtsprechung.“ (§ 20a GG)

Eine Vertiefung findet sich im Tierschutz- und im Bundesnaturschutzgesetz. Auf letzteres wird in Kapitel III.3.2 genauer eingegangen, da sich in diesen speziellen Regelungen und Vorgaben für den Bau und Betrieb von Windenergieanlagen finden. An dieser Stelle sei bereits das Tötungsverbot für



besonders geschützte Arten genannt. Zu diesen geschützten Arten zählen unter anderem Rot- und Schwarzmilan sowie Wespenbussard und verschiedene Fledermausarten. Das Tötungsverbot wurde ursprünglich eingeführt, um „Arten konsequent vor menschlichen Eingriffen zu schützen, also vor Neugierde, vor Sammelwut und illegalem Handel die sich [...] zu einer echten Bedrohung für die Artenvielfalt entwickelten“ (KNE. 2022, S. 3). Für die Windkraft gilt, dass das Tötungsrisiko nicht signifikant erhöht werden darf und Maßnahmen getroffen werden müssen, um unbeabsichtigte Tötungen zu minimieren.

Weitere Regelungen werden durch EU-Richtlinien festgelegt. Die Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie) ist wohl die bedeutendste, die die Gesetzesregelungen in Deutschland beeinflusst hat.

Auf dieser rechtlichen Grundlage werden in den Genehmigungen für neu zu errichtende Windkraftanlagen Maßnahmen definiert, die zum Schaffen von Ablenkflächen<sup>1</sup> bis zu Pauschalabschaltungen<sup>2</sup> über mehrere Monate führen können. Diese Auflagen sind mit Mehrkosten und oftmals Ertragsverlusten verbunden.

Um die hier lediglich angeschnittene Problematik des deutschen Naturschutzrechtes und den wirtschaftlichen Anforderungen von Windparkbetreibern gerecht zu werden, gibt es verschiedene Ansätze, die überbrückt werden sollen. Im Folgenden eine nähere Betrachtung.

Es werden verschiedene technische Lösungen entwickelt, um das Kollisionsrisiko von fliegenden Tieren an Windenergieanlagen zu reduzieren oder zu vermeiden. Die fliegenden Tiere werden dabei durch Radar oder durch Kamerasysteme erfasst. Diese werden im Folgenden als „Kamerasysteme“ bezeichnet.

Zum Zeitpunkt der Förderungsbeantragung bestehen gemäß der Synopse „Technische Systeme zur Vermeidung von potenziellen Auswirkungen auf Vögel und Fledermäuse durch die Windenergienutzung“ (KNE, 2018), nur solche ausländischen kamerabasierte Vorrichtungen und Verfahren zu Verfügung, welche im deutschsprachigen Raum noch keine Behördenanerkennung haben. Die eingesetzte Technik erfüllt noch nicht alle Anforderungen an eine Vermeidungsmaßnahme (sichere Senkung des Tötungsrisikos unter die Signifikanzschwelle). In Deutschland entwickelte kamerabasierte Systeme sind zu diesem Zeitpunkt nicht auf dem Markt erhältlich.

Häufig überwachen Kamerasysteme nur Teilbereiche um eine Windenergieanlage und somit nicht den vollständigen Gefahrenbereich. Die Bildverarbeitungstechnik auf der Auswertungseinheit findet in der Regel auch nicht alle fliegenden Tiere im Gefahrenbereich, da durch Filteralgorithmen für Umwelteinflüsse auch ein Teil der fliegenden Tiere gefiltert werden. Nicht zuletzt hatten die Kamerasysteme, zum Zeitpunkt der Förderungsbeantragung, eine sehr hohe Positiv-False-Rate. Das

---

<sup>1</sup> Bewirtschaftung einer außerhalb des Windparks befindlichen Ackerfläche, die die Attraktivität, der sich im Windpark befindlichen landwirtschaftlichen Flächen reduzieren/verschieben soll.

<sup>2</sup> Komplette Abschaltung der entsprechenden Windenergieanlage



bedeutet, Störeinflüsse führen häufig zu Fehlauflösungen und zur nicht erforderlichen Abschaltung der jeweiligen Windenergieanlage (Stark, 2018, S. 16). Neben Ertragseinbußen führt dies auch zu einem zusätzlichen Verschleiß der Windenergieanlage. Einige Kamerasysteme setzen auch ausschließlich auf eine Vergrößerung, welche nicht besonders zuverlässig und in Deutschland nicht mit dem bestehenden Artenschutzrecht vereinbar ist. Die bis dahin eingesetzte Bildverarbeitungstechnologie auf der Auswertungseinheit aller auf dem deutschen Markt befindlichen Kamerasysteme genügt damit nicht den Ansprüchen eines Windenergieanlagenbetreibers.

Zu ersten Testzwecken wurde die oben beschriebene Bildverarbeitungstechnik im Bürgerwindpark Weißbach von der Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH getestet. In folgender Grafik sind Bewegungen im Kamerafeld über einen 3 Minuten-Zeitraum an einem Frühjahrstag dargestellt:

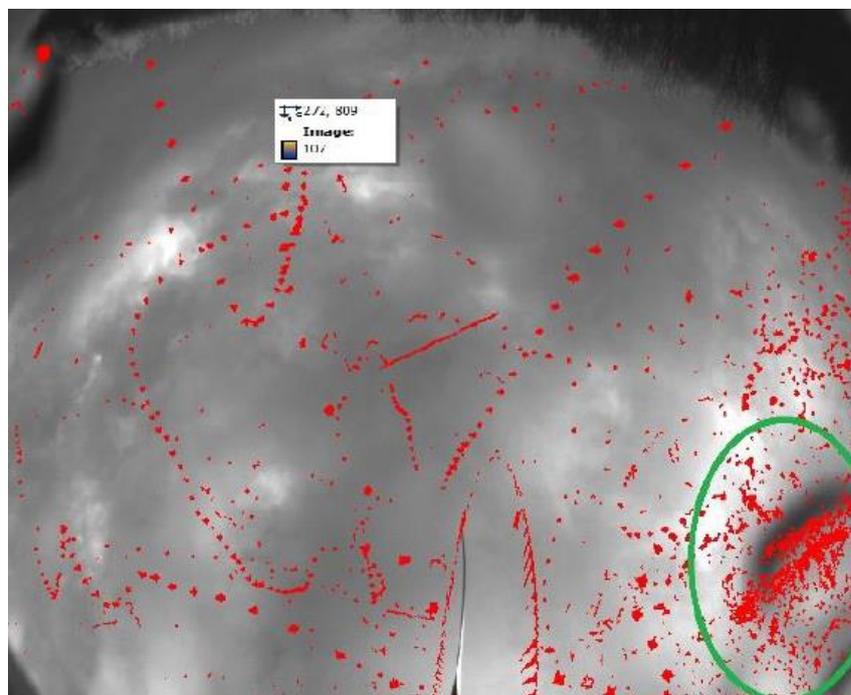


Abbildung 1: Visualisierung Störeinflüsse  
Quelle: Eigene Darstellung

In dieser Grafik ist dabei keinerlei Vogel zu erkennen. Die Bewegungen entstanden ausschließlich über Störeinflüsse wie Flugzeuge (Bildmitte), Insekten, Rotor spitze, Wassertropfen und Bäume am Waldrand. Diese Störeinflüsse sind zwar prinzipiell algorithmisch zu filtern, allerdings nur bis zu einem gewissen Grad, da sonst die Gefahr einer Filterung von Vögeln entsteht. Die Versuche der Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH haben dabei ergeben, dass diese Art der Bildverarbeitung nicht den hohen Ansprüchen und Zielen an ein derartiges Kamerasystem genügen.

Aus diesem Grund erfolgt bei BirdVision® der Sprung der Bildverarbeitungstechnologie zur neuen Deep-Learning-Technologie, welche bei der Erkennung von fliegenden Tieren und dem Ausfiltern von Störeinflüssen deutlich bessere Resultate verspricht. Hierfür wurden in ein Deep Learning Netzwerk



380.000 Bilder der Vogelarten Rotmilan, Mäusebussard, Turmfalke und Saatkrähe eintrainiert. Dieses Netzwerk erkennt auf Einzelbildern des Kamerasystems vogelähnliche Objekte innerhalb von ein bis zwei Sekunden und verfolgt diese sehr zuverlässig. Gleichzeitig ist das Netzwerk mit Nicht-Vogel-Bildern gefüllt um Fehlauflöser auszuschließen.

Zum Zeitpunkt der Förderungsbeantragung weißten die auf dem deutschen und europäischen Markt befindlichen Kamerasysteme folgende Unsicherheiten auf:

- Nicht in der Praxis in Deutschland erprobt und nicht von Behörden anerkannt wurden
- Teilweise lange Reaktionszeiten aufweisen
- Teilweise nicht den vollständigen Gefahrenbereich um die Windenergieanlage überwachen
- Aufgrund der eingesetzten Bildverarbeitungstechnik bzw. Kamerahardware nicht alle Vögel erfassen können (Securitykameratechnik mit Kompression)
- Sehr hohe Fehlauflöserquoten aufweisen und damit zu häufigen unnötigen Abschaltungen von Windenergieanlagen führen werden
- Nicht rechtzeitig die Windenergieanlage außer Betrieb nehmen können (Reaktionszeit, geringe Erfolgsquote, ...)
- Keine Klassifizierung von Vogelgattungen durchführen
- Keine exakte Entfernungsmessung durch Stereobetrieb ermöglichen

Alle diese Unsicherheiten sollen durch BirdVision® sowie der hier zu Förderung beantragten Weiterentwicklungen von BirdVision® aus dem Weg geräumt werden.

Zusätzlich soll die vorhandene Bildverarbeitungshardware auch nachts ausgelastet werden um Synergieeffekte zu erzielen und um eventuelle Auflagen und Anforderungen speziell im Bereich der Offshore-Windenergieanlagen zu erfüllen. Hierfür soll ein Erkennungs- und Abschaltalgorithmus auf Basis von BirdVision® für nachtfliegende Vögel und Fledermäuse mit wärmebildgebendem Kamerasystem entwickelt werden. Bei nächtlicher Kollisionsgefahr sollen die Windenergieanlagen wie tagsüber bei windkraftempfindlichen Vogelarten bedarfsgerecht abgeschaltet werden. Eine derartige Technologie ist gänzlich neu und wurde bis dato nur versuchsweise in den RENEBA-T-Studien I bis III erprobt (Behr, et. al. 2011, 2015 und 2018) wobei hier lediglich die Frage positiv beantwortet wurde, ob Wärmebildkameras Fledermäuse auf Höhe von Windenergieanlagen detektieren können.

Bis dahin wird der Schutz von Fledermäusen nur durch pauschale und evtl. um ein Gondelmonitoring angepasste Abschaltalgorithmen bestehend aus Temperatur-, Wind- und ggf. Niederschlagswerten gewährt. Dies hat zur Folge, dass in der überwiegenden Zeit der pauschalen Abschaltung Windenergieanlagen außer Betrieb sind, jedoch kein Flug von Fledermäusen im Gefahrenbereich stattfindet



Für nachfliegende Vogelarten, wie beispielsweise Uhu oder weitere Eulenarten (Aumüller, 2013, S. 63), bestehen noch keine automatischen Vermeidungsmaßnahmen.

### **I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Zusammenarbeit mit anderen Stellen wurde bereits unter I.2 skizziert. Eine fachliche Bewertung und Begleitung der Entwicklungsergebnisse erfolgte vor allem durch ein auf Naturschutz- und Landschaftsplanung spezialisiertes Gutachterbüro.



## II. Eingehende Darstellung

### II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

In diesem Kapitel werden die einzelnen erzielten Ergebnisse je nach Arbeitspaket kurz vorgestellt und veranschaulicht. Ebenfalls werden der jeweilige Entwicklungsweg sowie die Anwendungsmöglichkeit übersichtlich skizziert. Für ein besseres technisches Verständnis wird jedoch vorab die prinzipielle Funktionsweise von BirdVision® erläutert.

#### Technische Funktionsweise BirdVision®

Die Hardware von BirdVision® besteht aus sechs zueinander kalibrierten Kamerapaaren. Hochleistungsfähige Industriekameras und Objektive werden dabei in einem selbst entwickelten Schutzgehäuse montiert und betrieben. Separiert werden zwei Industriekameras im Stereobetrieb durch eine verwindungssteife und temperaturunempfindliche Vierkantstange aus Carbon. Jede Kamera verfügt über ein witterungsstabilisiertes Kabel, welche gemeinsam in den Turmfuß eingeführt werden. Die Montagehöhe des Systems ist abhängig vom Standort der Windenergieanlage. Bei Offenlandstandorten beträgt die Höhe in der Regel 5 bis 6 m, an Waldstandorten bis zu 40 m. Je nach Material des Turmes (Stahl oder Beton), werden die Stereokamerapaare mit Magneten befestigt oder geklebt. Im Inneren jeder Windenergieanlage befindet sich ein Hochleistungsbildverarbeitungsserver, welcher über mehrere Grafikkarten zur Verarbeitung der Bilder verfügt. Über eine Schnittstelle zur Windenergieanlage kann ein Abschaltsignal gesendet werden.



Abbildung 2: Kamerasystem mit sechs Paaren am Turmfuß (links) und Blick auf das Kameraschutzgehäuse aus Aluminium (rechts)

Quelle: Eigenes Bildmaterial

Softwareseitig werden zur Detektion und zur Verfolgung von vogelähnlichen Objekten sowie zur Filterung von Nicht-Vogel-Objekten drei unterschiedliche Verfahrensweisen der industriellen Bildverarbeitung verwendet.

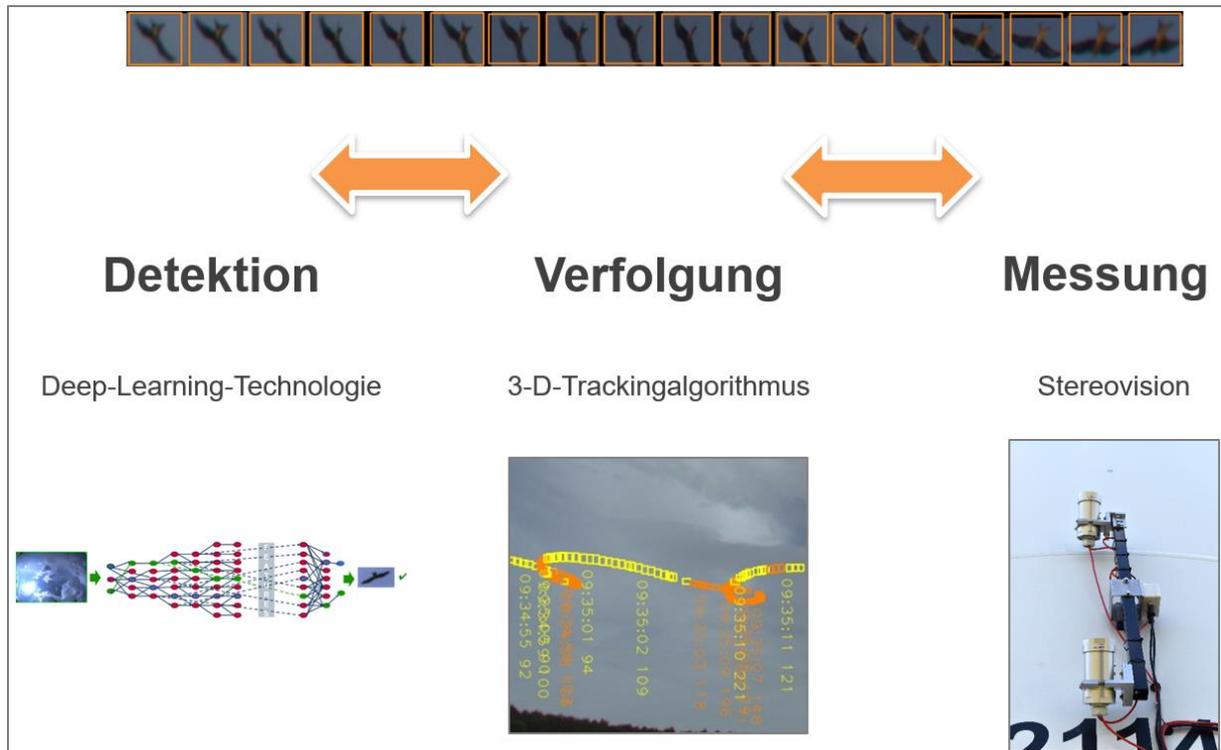


Abbildung 3: Algorithmen von BirdVision®  
Quelle: Eigene Darstellung

Im ersten Schritt untersucht ein neuronales Deep-Learning-Netzwerk einzelne Kamerabilder nach vogelähnlichen Objekten. Anhand einer umfassenden Datenbank mit einer sechsstelligen Anzahl von Vogelbildern sowie einer ähnlichen großen Anzahl von „Nicht-Vogelbildern“ wurde das Netzwerk trainiert und kann daher hinreichend genaue Detektionen und Filterungen durchführen. Die Datenbank wurde während der Entwicklung der Basisversion von BirdVision® aufgebaut und in umfangreicher Arbeit mit von windkraftempfindlichen Vogelarten manuell generierten Bildern gefüllt.

Sobald ein vogelähnliches Objekt detektiert wurde, wird dieses mittels eines Trackingalgorithmus über eine Abfolge von Bildern des Kamerasystems verfolgt und dessen Flugbahn auf Plausibilität geprüft. Dabei findet eine regelmäßige Rückkopplung mit dem Deep-Learning-Netzwerk statt, um sicherzustellen, dass es sich hierbei optisch noch um ein vogelähnliches Objekt handelt.

Im dritten Schritt wird mit einer Entfernungsmessung die Entfernung des vogelähnlichen Objektes bestimmt. Damit kann beurteilt werden, ob es sich zum einen aufgrund der Entfernung um einen Vogel handeln kann, als auch, ob dieser sich auf einem Kollisionskurs zur Windenergieanlage hin befindet.

Durch die Kombination aller drei Technologien können Vögel sehr sicher detektiert und gegenüber Nicht-Vogel-Objekten abgegrenzt werden, als auch sinnvolle und prozesssichere Abschaltungen der Windenergieanlage zum Schutz des Vogels durchgeführt werden.



Mit dem Gesamtsystem aus Hardware und Software können beispielsweise folgende Zonen und Abschalttradien um einzelne Windenergieanlagen herum aufgebaut und durchgeführt werden:

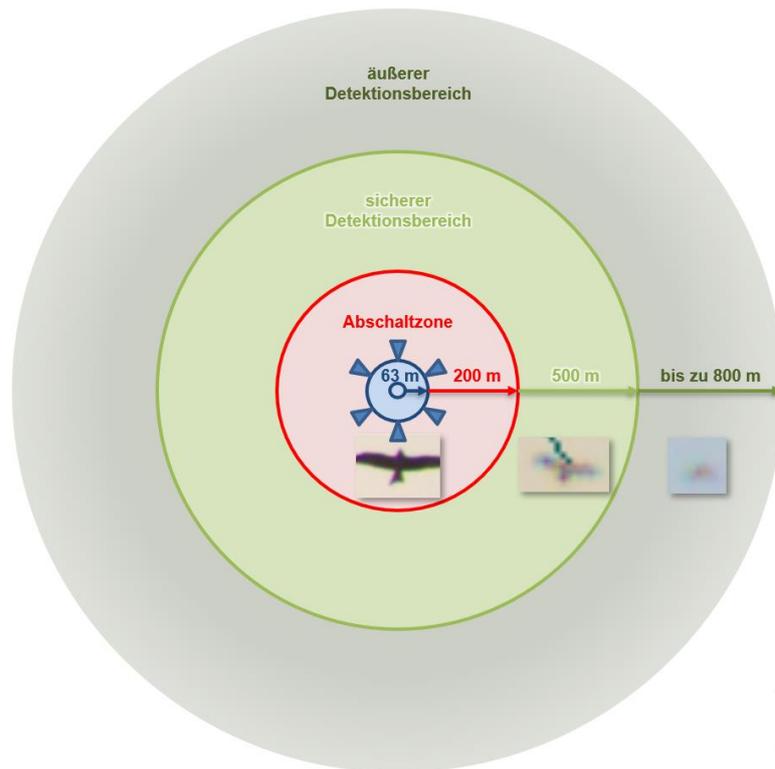


Abbildung 4: Detektions- und Abschalttradien im Windpark Weißbach  
Quelle: Eigene Darstellung

Das Kamerasystem von BirdVision® wird am Turmfuß der Windenergieanlage in einem gleichmäßigen horizontalen Abstand montiert. Im Beispiel des Windparks Weißbach wurde darum eine Abschaltzone mit einem Radius von 200 m definiert. Sobald ein vogelähnliches Objekt in diese Zone eindringt, wird ein Stoppbefehl an die Windenergieanlage gesendet, welche in einem Zeitraum von 20 bis 25 Sekunden in den gefahrlosen Trudelbetrieb übergeht und der Vogel die Windenergieanlage passieren kann. Sicher detektiert BirdVision® nach Abschluss der geförderten Weiterentwicklung die windkraftempfindliche Vogelart Rotmilan in einem Radius von ca. 500 m. Einzelne Detektionen und Aufnahmen gelingen je nach Sichtverhältnissen, Sonnenstand und Ausrichtung des Vogels zur Kamera auch in einem Umkreis von bis zu 800 m.



### II.1.1 Arbeitspaket 1 - Klassifikation deutschlandweit vorkommender Vogelarten

Die Basisversion von BirdVision® wurde zuallererst entwickelt, um Vogelobjekte grundsätzlich gegenüber Störeinflüssen abzugrenzen und zu erkennen. Dabei war zu Beginn der Entwicklung die zu erkennende Vogelart irrelevant. Die ersten Betriebserfahrungen haben gezeigt, dass im Nahbereich einer Windenergieanlage zahlreiche unterschiedliche Vogelarten und Vogelgattungen tagtäglich aktiv sind. Nur ein Bruchteil dabei ist windkraftempfindlich (wie beispielsweise der Rotmilan), welche bei der Windenergie besonders unter Schutz stehen. „Allerweltvogelarten“ wie beispielsweise Feldlerchen, Turmfalken oder Mäusebussarde gelten dabei nicht als windkraftempfindlich und stehen unter keinem besonderen Schutz.

Daher ist der Branchenwunsch, durch eine Erkennung der Vogelart oder Vogelgattung explizit nur für windkraftempfindliche Vogelarten die Windenergieanlage außer Betrieb zu nehmen. Hierfür ist es erforderlich, auf Seiten der Bildverarbeitung Vogelgattungen zu erkennen und gegeneinander abzugrenzen, die so genannte „Klassifikation“.



Abbildung 5: BirdVision® bekannte Vogelgattungen zur Klassifikation  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Entwicklung von BirdVision® konzentriert sich ausschließlich auf die Erkennung des Artenspektrums im Nord-Osten Baden-Württembergs bestehend aus der windkraftempfindlichen Vogelart Rotmilan sowie den nichtwindkraftempfindlichen Vogelarten Mäusebussard und Turmfalke. Weitere deutschlandweit vorkommende windkraftempfindliche Vogelarten wie beispielsweise der Wespenbussard, der Seeadler und der Schwarzstorch sind BirdVision® nicht bekannt.

Innerhalb der geförderten Weiterentwicklung sollen daher die Grundlagen geschaffen werden, weitere Vogelarten in die Klassifikation aufzunehmen, um diese zu verbessern.

Hierfür ist es erforderlich, zuallererst die Klassifikationsfähigkeit der Basisversion von BirdVision® zu beurteilen. Diese ist softwareseitig so aufgebaut, dass das bestehende Deep-Learning-Netzwerk



sowohl die Detektion von vogelähnlichen Objekten vornimmt, als auch gleichzeitig diese nach ihren Gattungen klassifiziert. Dabei handelt es sich um eine „Betaversion“ der Software, welche noch nicht umfangreich getestet wurde. Eine Klassifikation ist in der Bildverarbeitung mittels Deep-Learning-Technologie eine sehr neu aufgekommene Technologie.

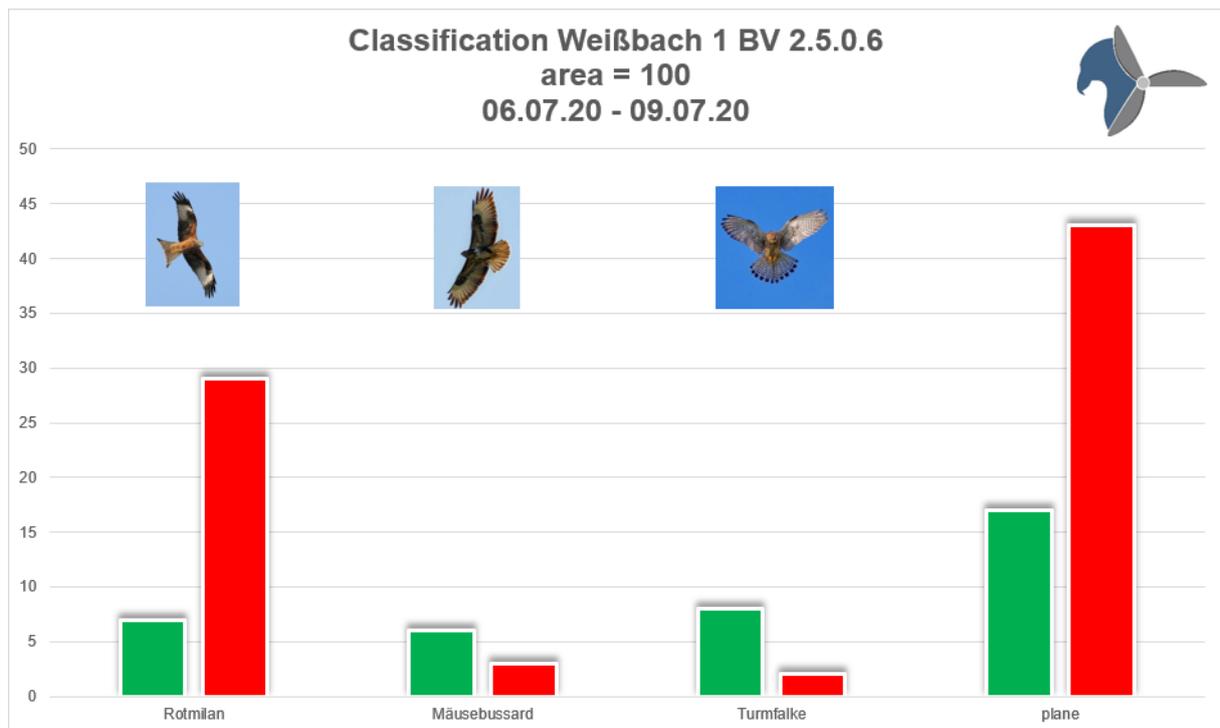


Abbildung 6: Bewertung der Klassifikation in der Basisversion von BirdVision® im Juli 2020 mit einem gemeinsamen Netzwerk  
Quelle: Eigene Darstellung

Klassifiziert wurden von der Basisversion von BirdVision® die Vogelgattungen Milane, Bussarde und Falken sowie Flugzeuge als „Fehlauslöser“. Der grüne Balken steht dabei für eine korrekte Klassifikation (bspw. Rotmilan als Rotmilan), der rote Balken steht für eine falsche Klassifikation (bspw. Rotmilan als Flugzeug).

Leider ergab die Auswertung, dass die Klassifikation nur beim Mäusebussard und beim Turmfalken überwiegend eine richtige Klassifikation ergibt. Allerdings ist hier nur eine geringe Eindeutigkeit der Klassifikation gegeben. Vor allem der Rotmilan als auch Flugzeuge werden zu einem hohen Grad falsch klassifiziert. Möglicherweise lassen sich diese Ergebnisse mit einem besseren oder schlechteren Datenmaterial der jeweiligen Vogelgattung als Grundlage der Klassifikation erklären.

Gleichzeitig ergaben interne Auswertungen, dass durch eine gleichzeitige Detektion und Klassifikation in einem Deep-Learning-Netzwerk sowohl die Geschwindigkeit des Netzwerkes als auch die Erkennungsfähigkeit kleinerer Objekte deutlich nachgelassen hat. Beide Auswirkungen reduzieren die Reichweite und Erkennungsrate des Systems.



Nach diesen Erkenntnissen wurde daraufhin die Idee entwickelt, dass die Detektion von der Klassifikation getrennt werden sollte. Gleichzeitig benötigt die Klassifikation gegenüber eines reinen Detektionsnetzwerkes eine deutlich höhere Rechenleistung bei der Entwicklung.

Um eine sinnvolle Grundlage für die Aufnahme weiterer Vogelgattungen in die Klassifikation zu legen, wurde vorerst entschieden, mit den bekannten „Basisvogelarten“ ein neues, reines Klassifikationsnetzwerk innerhalb der geförderten Weiterentwicklung zu arbeiten. Aufgrund des hohen Rechenleistungsbedarfs wurde zudem die Chance genutzt, den in Arbeitspaket 2 beschafften Hochleistungsbildverarbeitungsserver mit weiterentwickelten Grafikkarten zur Entwicklung des Klassifikationsnetzwerkes zu verwenden.

Nachdem diese Entwicklung abgeschlossen wurde, wurden auch hier die Klassifikationsergebnisse im Juni 2021 bewertet:

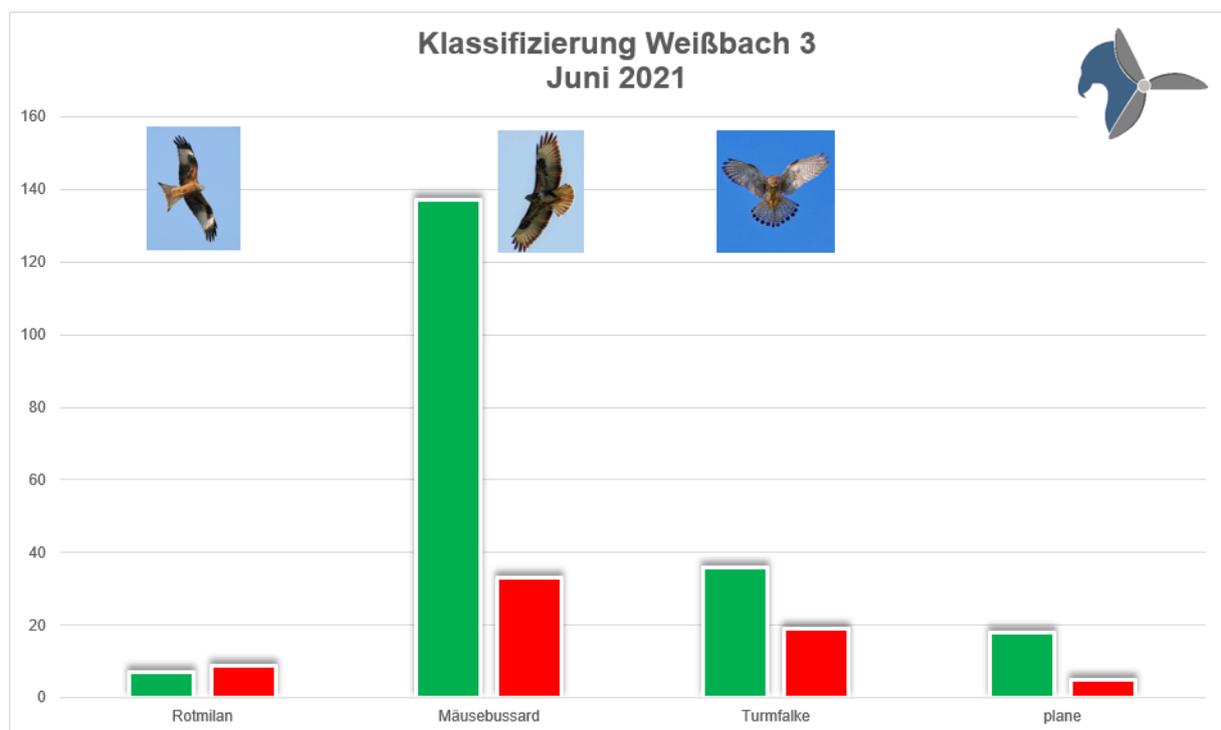


Abbildung 7: Bewertung der Klassifikation bei einem getrennten Klassifikationsnetzwerk im Juni 2021  
Quelle: Eigene Darstellung

Im Untersuchungszeitraum waren verhältnismäßig wenig Rotmilane anwesend, was die Aussagekraft der Auswertung leider schmälert.

Gegenüber den Auswertungen im Juli 2020 ergab sich eine deutliche Verbesserung der Klassifikationsergebnisse. Vor allem die Ergebnisse des Mäusebussards aber auch der Flugzeuge können sich sehen lassen. Hingegen sind die Ergebnisse beim Rotmilan und beim Turmfalke wenig überzeugend. Vor allem eine korrekte Klassifikation des Rotmilans wäre für die weitere Entwicklung von Bedeutung. Sinnvoll wäre hier eine sehr zielgerichtete Klassifikation mit über 80 bis 90 %. Die



Ergebnisse zeigen jedoch, dass das Klassifikationsnetzwerk weit von dieser Rate entfernt ist. Zudem verschlechtern sich bei Deep-Learning-Netzwerke die Klassifikationsergebnisse, je mehr Klassifikationsarten hinzukommen.

Daraufhin wurde eine Ursachenforschung für die bescheidenen Ergebnisse durchgeführt. Folgende zwei Theorien ergaben sich daraus:

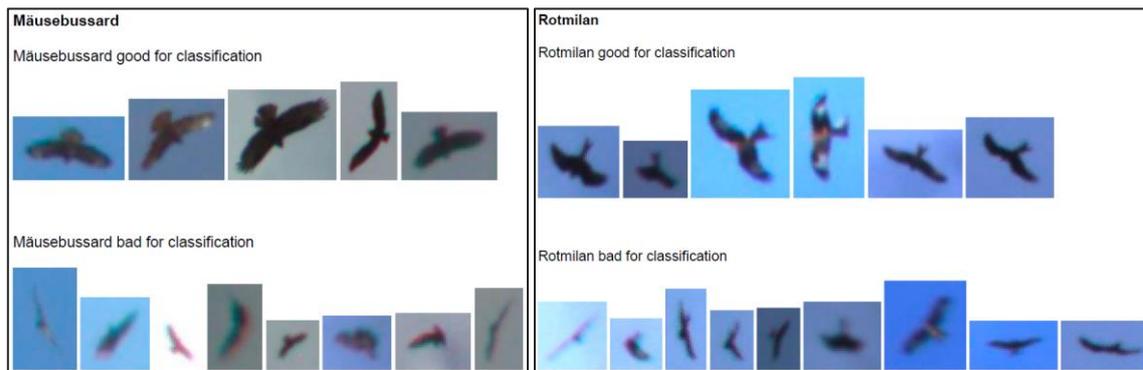


Abbildung 8: Beispiele für Mäusebussard und Rotmilan  
Quelle: Eigene Darstellung

Ein Blick auf das Datenmaterial zeigt, dass je nach Silhouette, Flugrichtung sowie Größe des Vogels und damit der Entfernung zur Kamera, unterschiedlich deutliche Bilder der Vögel entstehen. Auf großen, scharfen und „von unten“ aufgenommenen Vögeln lässt sich für den menschlichen Betrachter sehr deutlich die Vogelart erkennen (good for classification). Bei Aufnahmen der Vögel von vorne, von der Seite oder auch kleinen Aufnahmen (große Entfernung zur Kamera), ist hingegen für den menschlichen Betrachter nicht immer die Vogelart zu erkennen. Viel mehr gibt es auch einen fließenden Übergang zwischen den Vogelarten (bad for classification), teilweise ist sogar gar kein Unterschied zwischen den Vogelarten zu erkennen. Es ist zu vermuten, dass für ein Deep-Learning-Netzwerk ähnliche Aussagen zur Unterscheidung der Vogelarten bei schlechter Bildqualität gelten, wie für den menschlichen Betrachter.

Darüber hinaus wurden Versuche zu Klassifikationsergebnissen nach Größe des Vogels im Bild anhand des Datenmaterials durchgeführt.

Die Auswertung zeigt, dass grundsätzlich je größer ein Objekt ist, desto besser die Klassifikationsergebnisse.

Nach weiteren Untersuchungen wurde klar, dass eine korrekte eindeutige Klassifikation zum einem stark vom Eingangsmaterial abhängig ist. Hierfür wäre es erforderlich, dass bestehende Datenmaterial des Deep-Learning-Netzwerks umfangreich zu sichten und zu selektieren. Aufgrund der unterschiedlichen Vogelsilhouetten im Flug, würden sicherlich auch Flüge entstehen, die damit nicht klassifizierbar wären. Zudem müssten weitere umfangreiche Aufnahmen zur Füllung des Netzwerkes generiert werden.



Zum anderen ist eine eindeutige Klassifikation stark von der Größe des Objektes abhängig. BirdVision® ist mit Weitwinkelkameras ausgestattet. Dies würde bedeuten, dass eine gute Klassifikation nur im Nahbereich der Windenergieanlage bei großen Vogelgrößen möglich ist. Für eine zielgerichtete Abschaltung nach Vogelgattungen ist diese Klassifikationsreichweite zu gering, da bei dieser Entfernung bereits eine Abschaltung erfolgt sein müsste. Entsprechend ist eine Klassifikation mit dem Ziel einer gattungsspezifischen Abschaltung mit der technischen Auslegung von BirdVision® nicht möglich. Viel mehr wären beispielsweise Zoom-Kameras erforderlich, um den entsprechenden Vogel in weiter Entfernung detektieren zu können.

Beide Faktoren würden umfangreiche Arbeiten oder sogar Neu-Designs des Systems erforderlich machen. Eine Gewissheit zur Erreichung sehr hoher Detektionsraten hätte es bei dieser Entscheidung jedoch nicht gegeben. Dies hätte den Umfang der geförderten Weiterentwicklung bei weitem überschritten. Zudem haben Gespräche mit der hiesigen unteren Naturschutzbehörde ergeben, dass eine gezielte Abschaltung nur für einzelne Vogelgattungen möglicherweise nicht mit dem Bundesnaturschutzgesetz vereinbar wäre, da dieses prinzipiell jedes wild lebende Tier unter Schutz stellt und nicht einzelne Arten. Eine Anwendung einer gattungsspezifischen Abschaltung wäre daher ebenfalls zumindest im Windpark Weißbach fraglich.

Daher wurde beschlossen, diesen Teil des Arbeitspaketes 1 aufzugeben und die Entwicklungskapazitäten auf andere Arbeitspakete zu konzentrieren.

### **Datenbank mit Webplattform**

In der Basisversion von BirdVision® werden die Ausgangsdaten lediglich als JPEG und Text-Datei in einem Dateienarchiv abgelegt. Bei der hohen Anzahl an Flugbewegungen, eingesetzten Systemen und Zeiträumen ist dies nicht mehr zeitgemäß. Außerdem sind keine übergreifenden Auswertungen und Visualisierungen möglich. Als zweites Projekt im Arbeitspaket 1 wurde daher der Aufbau einer Datenbank- und Webplattform definiert. Mit dieser soll ein Monitoring zur Validierung der Ergebnisse durch Biologen während der geförderten Weiterentwicklung effizienter und einfacher gestaltet werden. Außerdem steht dadurch nach Abschluss der geförderten Weiterentwicklung die „Beta-Version“ einer Schnittstelle für Kunden, Behörden und Gutachter zur Verfügung, in der die Ergebnisse von BirdVision® eingesehen werden können.

Auf die Basis Version aufbauend wurden die Daten zuerst in eine maschinell effektivere Form – eine Datenbank - umgewandelt. Die Daten sind hier wesentlich dichter gespeichert und die Zugriffszeiten auf diese sind deutlich geringer. Damit wurde es möglich flugübergreifende oder anderweitig verbundene Daten miteinander zu verknüpfen.

Die Datenbank speichert diese Daten zuerst nur lokal im Windpark. Da der Nutzer aber nicht direkt auf das System zugreifen soll, sondern über eine Webseite, wird ein zentraler Server benötigt. Mit diesem



synchronisieren sich die lokalen Datenbanken regelmäßig und erzeugen dadurch eine redundante Sicherung. Hierfür wurde im Arbeitspaket 1 ein Datenbankserver, mit entsprechend für die Zukunft ausreichendem Speicherplatz, beschafft. Aufgrund der Anforderungen der IT-Sicherheit, der Flexibilität sowie der unabhängigen Zugänglichkeit der Daten hat eine Eigenbeschaffung gegenüber einem Leasing von Datenplatz bei Serverbetreibern überwogen. Ergänzt wurde der Server um einen Serverschrank samt Zubehör. Dieser Server wurde aus Arbeitspaket 2 übernommen, um die geförderten Ziele erreichen zu können.

Die angekommenen Daten am zentralen Server werden dann einmal in einer unveränderlichen Form und in einer veränderlichen Form abgelegt. Ziel ist es, Anwendern zu ermöglichen, Fehler zu korrigieren und an BirdVision® zu melden.

Zusätzlich zur Verwaltung der BirdVision®-Daten stellt der zentrale Server auch den Webserver zur Verfügung mit dem die Nutzer letztendlich auf diese Daten zugreifen. Um die höchstmögliche Sicherheit zu garantieren wird eine separate Datenbank für die Rechte und der Zugänge der Nutzer verwendet.

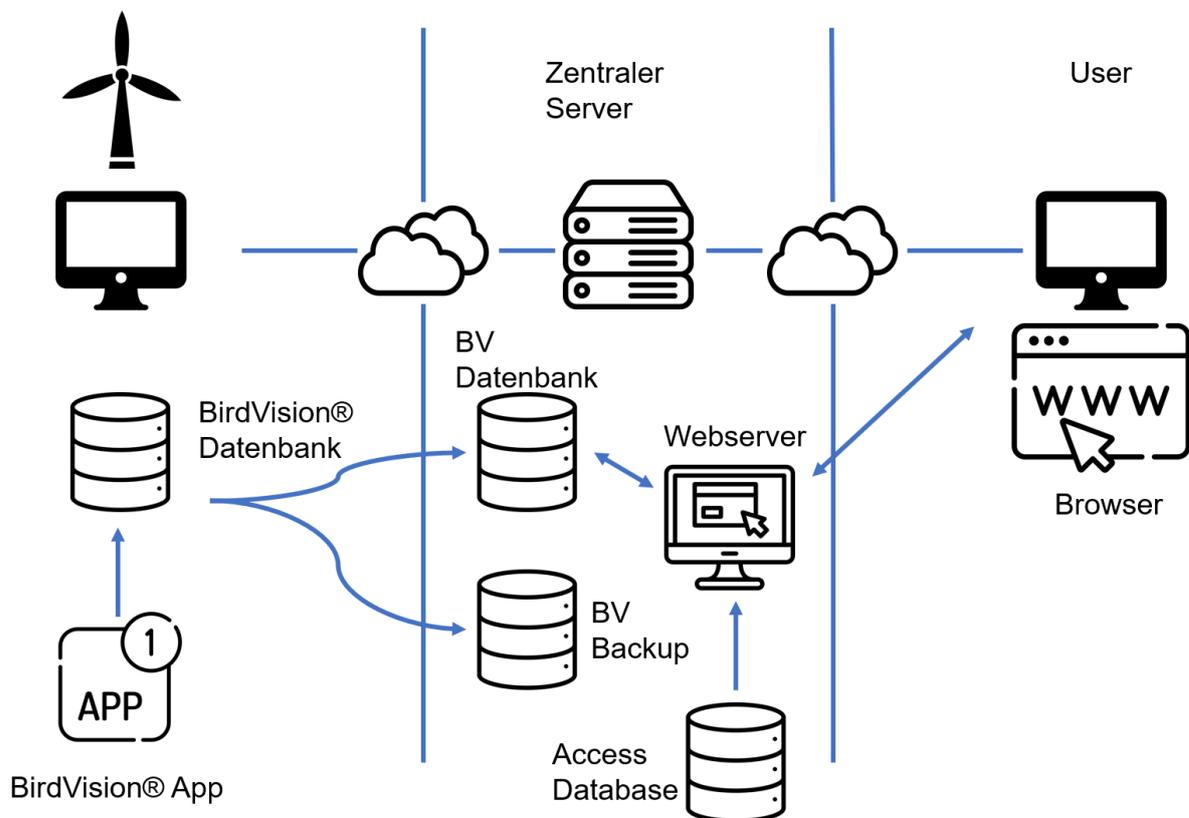


Abbildung 9: Datenbankstruktur BirdVision®  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Webplattform von BirdVision® soll modern, übersichtlich und funktional in einem werden. Dabei sollen die unterschiedlichen Windparks und Windenergieanlagen ausgewählt werden. Es soll die



Möglichkeit bestehen, einzelne Flüge zu sichten und auszuwerten ebenso wie es Auswertungsmöglichkeiten für kürzere Zeiträume (Stunden, Tage) oder längere Zeiträume (Wochen, Monate) geben soll. Auswertungen sollen dabei grafisch veranschaulicht dargestellt werden und downloadbar sein. Zudem soll die Webplattform erweiterbar für die Zukunft insbesondere nach Abschluss der geförderten Weiterentwicklung von BirdVision® sein. Ebenso soll sie auf Daten von Windenergieanlagen zugreifen können.

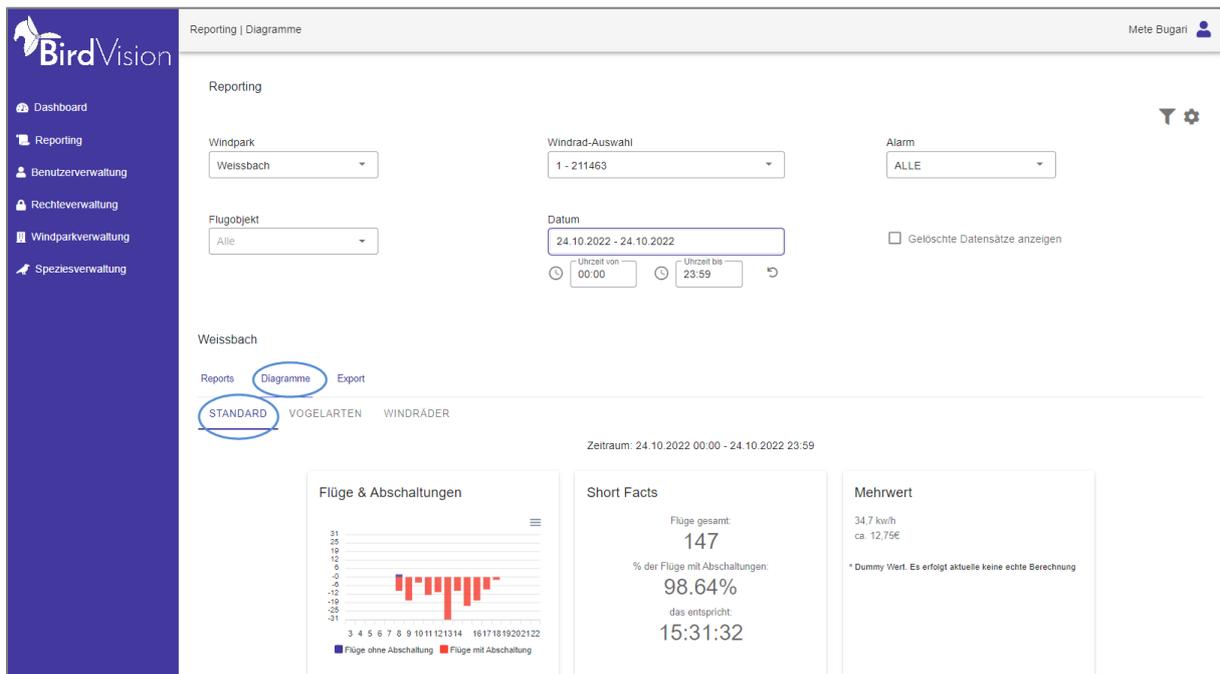


Abbildung 10: Reporting/Diagramme auf der Webplattform  
Quelle: Eigene Darstellung

Datum	Zeit	Windrad	Alarm	Flugobjekt	Flugdauer	Abschaltung	Kamera	Aktionen
24.10.2022	09:10:45	211463	▲ Ja	Flugzeug (3)	00:01:26	00:03:51		
24.10.2022	09:31:53	211463	▲ Ja	Unbekannt	00:00:04	00:03:01		
24.10.2022	09:46:30	211463	▲ Ja	Unbekannt (3)	00:00:20	00:03:09		
24.10.2022	11:04:12	211463	▲ Ja	Unbekannt	00:00:20	00:03:02		
24.10.2022	11:33:32	211463	▲ Ja	Flugzeug (2)	00:01:07	00:03:07		
24.10.2022	12:52:10	211463	▲ Ja	Flugzeug (2)	00:01:23	00:03:07		
24.10.2022	13:09:22	211463	▲ Ja	Flugzeug	00:00:56	00:03:06		
24.10.2022	14:28:21	211463	▲ Ja	Unbekannt (2)	00:00:49	00:03:14		
24.10.2022	15:00:27	211463	▲ Ja	Flugzeug (2)	00:00:39	00:03:04		
24.10.2022	15:21:26	211463	▲ Ja	Flugzeug (2)	00:01:14	00:04:21		
24.10.2022	15:34:01	211463	▲ Ja	Unbekannt	00:00:34	00:03:01		
24.10.2022	16:16:35	211463	▲ Ja	Unbekannt	00:00:50	00:03:16		

Abbildung 11: Reporting/Reports auf der Webplattform  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Webplattform gruppiert einzelne Aufnahmen von BirdVision® zu Flugereignissen. Bei der Darstellung eines Flugereignisses sind die einzelnen Aufnahmen auf der linken Seite auswählbar.



Auch hier ist eine manuelle Klassifikation des Flugobjektes sowie das Bearbeiten einzelner Einträge möglich. Das dargestellte Flugbild sowie Flugvideos sind in der Mitte einzeln auswählbar und können vergrößert werden. In der rechten Spalte werden Metadaten zum Flugereignis, zu den Umgebungsbedingungen sowie zur Windenergieanlage dargestellt. Abschaltungen der Windenergieanlage werden hier ebenfalls dokumentiert. Das einzelne Flugereignis kann exportiert werden.

The screenshot displays the 'Reportdetails' page in the BirdVision web application. On the left, a sidebar lists navigation options like 'Dashboard', 'Reporting', 'Benutzerverwaltung', 'Windparkverwaltung', and 'Speicherverwaltung'. The main area is divided into three sections: a table of flight events, a central video player, and a right-hand metadata panel.

KOLLEKTION	FLUGOBJEKT	STATUS
Nein	Unbekannt	✓ ↻
Nein	Flugereignis	✓ ↻
Nein	Unbekannt	✓ ↻

The central video player shows a flight path over a landscape with wind turbines. A red line indicates the flight path, with a red circle highlighting a specific event. Below the video is a grid of 12 small video thumbnails. The right-hand panel displays the following metadata:

Flugobjekt	
Beginn	27.06.2022 12:33
Flugdauer	00:01:20

Windereignisse	
Windstop	27.06.2022 12:29
Windstart	27.06.2022 12:35
Abschaltungsbauer	20.09.01

Windbedingungen	
Kamera	1
Rotor	7 U/min
Windgeschw.	4,102 m/s
Gewichtszurichtung	267,4°
Temperatur	20,81 °C
Luftdruck	999,6 hPa
Niederschlag	0 mm
Feuchtigkeit	81 %

At the bottom of the page, there is a 'Letzte Notiz' section.

Abbildung 12: Darstellung eines einzelnen Flugereignis in der Webplattform  
Quelle: Eigene Darstellung

In einer Mehrtagesansicht können einzelne Flugzeiträume, gegliedert nach Tag und Uhrzeit aufgerufen werden. Im vorliegenden Beispiel herrschte an den drei dargestellten Tagen regelmäßiger Flugbetrieb mit geringen Unterbrechungszeiträumen. Bei einer manuellen (und künftig ggf. automatischen) Klassifikation von Flugobjekten kann dabei die Anwesenheit einzelner Vogelgattungen dargestellt und ausgewählt werden. Eine Darstellung und Auswertung ist auch in Wochen und Monaten möglich.

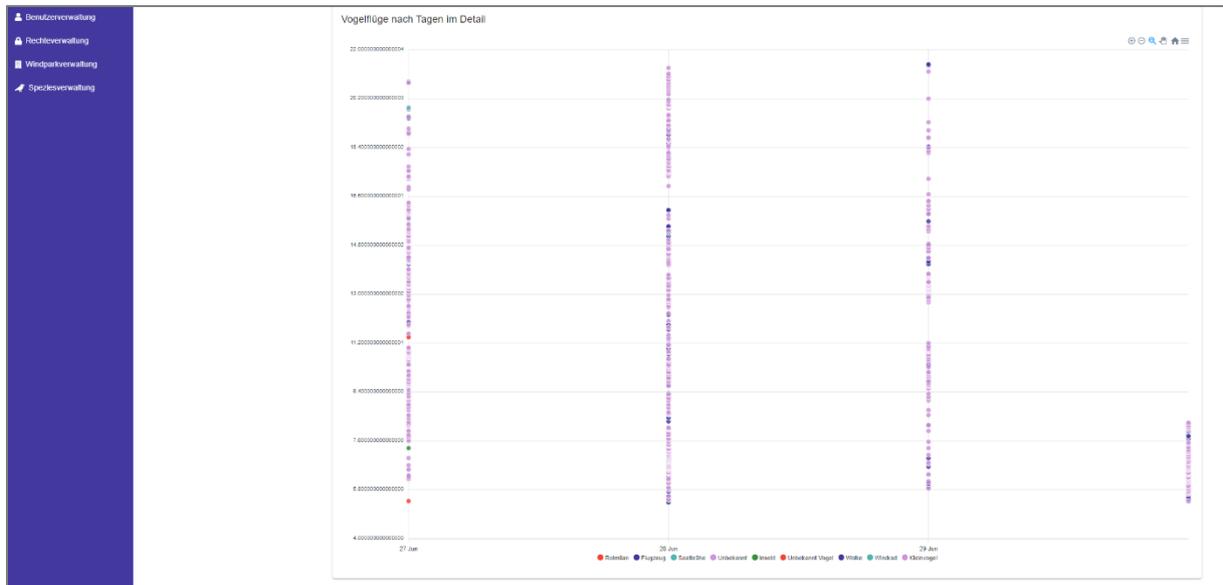


Abbildung 13: Darstellung von Flugereignissen an drei Tagen auf der Webplattform  
Quelle: Eigene Darstellung

Flugereignisse größerer Zeiträume lassen sich darüber hinaus grafisch auswerten. Im vorliegenden Bild ist die Grafik eines Tageszeitraumes (Balkendiagramm) sowie in den Kreisdiagrammen die Aufteilung nach Vogelgattungen dargestellt. Künftig sollen sich diese Auswertungen auch noch mit Metadaten wie Wetterereignissen kombinieren lassen. Die Grafiken sind exportierbar.

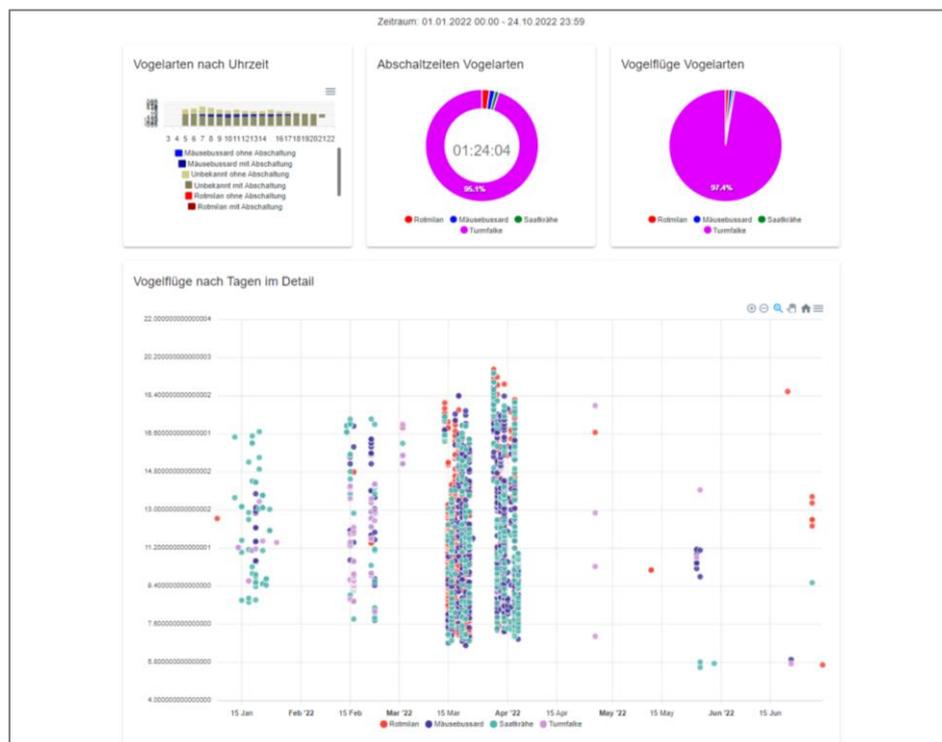


Abbildung 14: Auswertungen über definierbare Zeiträume  
Quelle: Eigene Darstellung

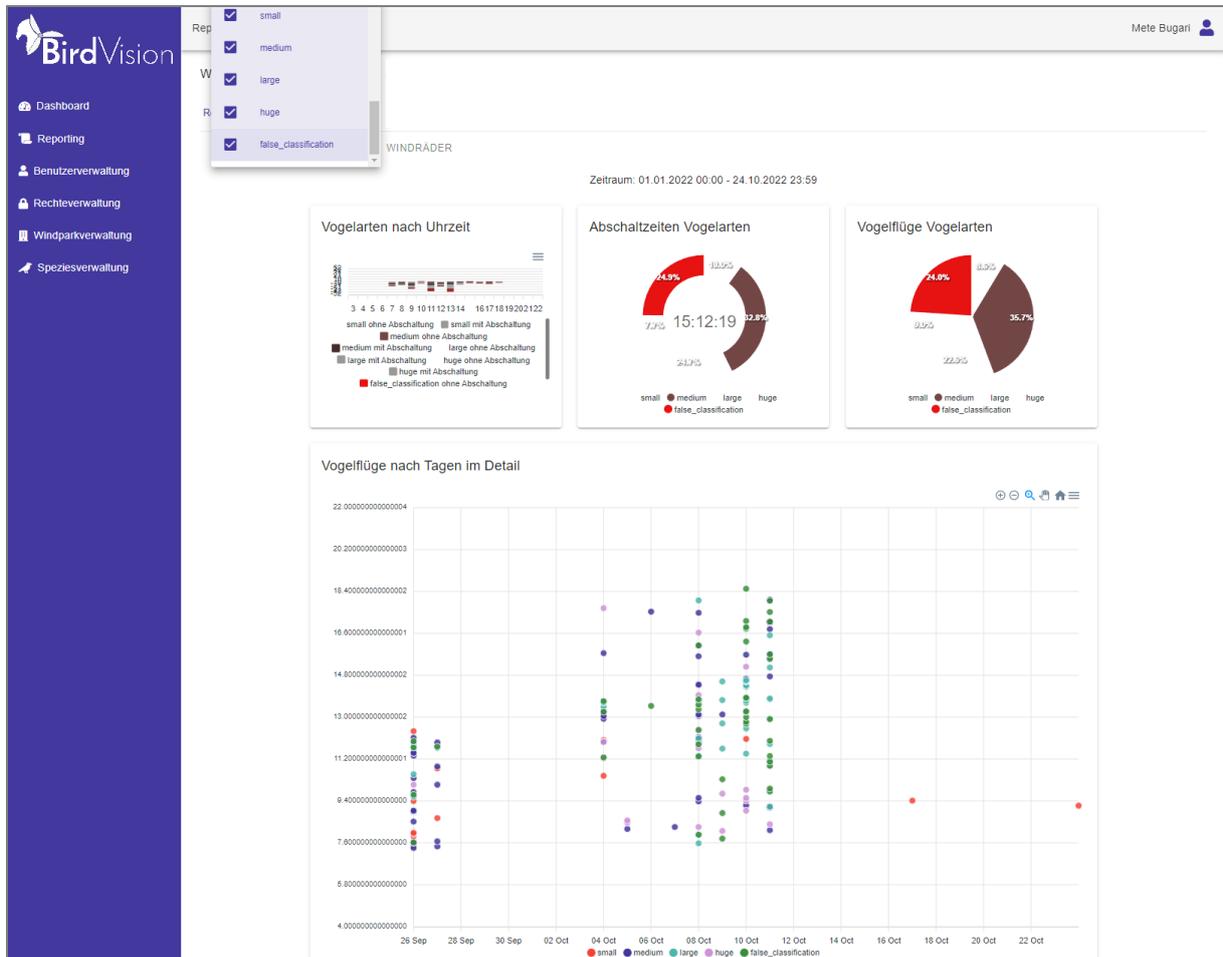
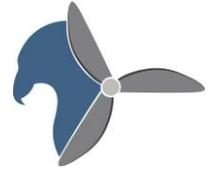


Abbildung 15: Änderung der Daten, die für ein Diagramm verwendet werden  
Quelle: Eigene Darstellung

FARBE	BIRDVISION ID	DEUTSCHE BEZEICHNUNG	ENGLISCHE BEZEICHNUNG	LATEINISCHE BEZEICHNUNG	PROTECTION-LEVEL	
■	1	Rotmilan	Red Kite	Milvus milvus	3	Edit Delete
■	2	Mäusebussard	Common buzzard	Buteo buteo	1	Edit Delete
■	3	Flugzeug	Plane	aeroplanum	100	Edit Delete
■	4	Saatkrähe	Rook	Corvus frugilegus	5	Edit Delete
■	5	Turmfalke	Kestrel	Falco tinnunculus	5	Edit Delete
■	6	Unbekannt	Unknown	anonymos	1000	Edit Delete

Abbildung 16: Speziesverwaltung auf der Webplattform  
Quelle: Eigene Darstellung

Neben einzelnen Windenergieanlagen sind im Dashboard einzelne Windparks des jeweiligen Betreibers oder Gutachters darstellbar. Dabei werden die einzelnen mit BirdVision® ausgestatteten



Windenergieanlagen dargestellt. Mit einem Ampelsymbol wird der Betriebsstatus der Windenergieanlage visualisiert. Aktive Abschaltungen durch BirdVision® sind ebenfalls erkennbar.

In einer darunter liegenden Grafik werden Ertragsverluste durch BirdVision® bedingte Anlagenabschaltungen sowie von BirdVision® gegenüber einer pauschalen Abschaltung ermittelt. Windparkbetreiber können dann auf einem Blick die Wirksamkeit von BirdVision® nachvollziehen.

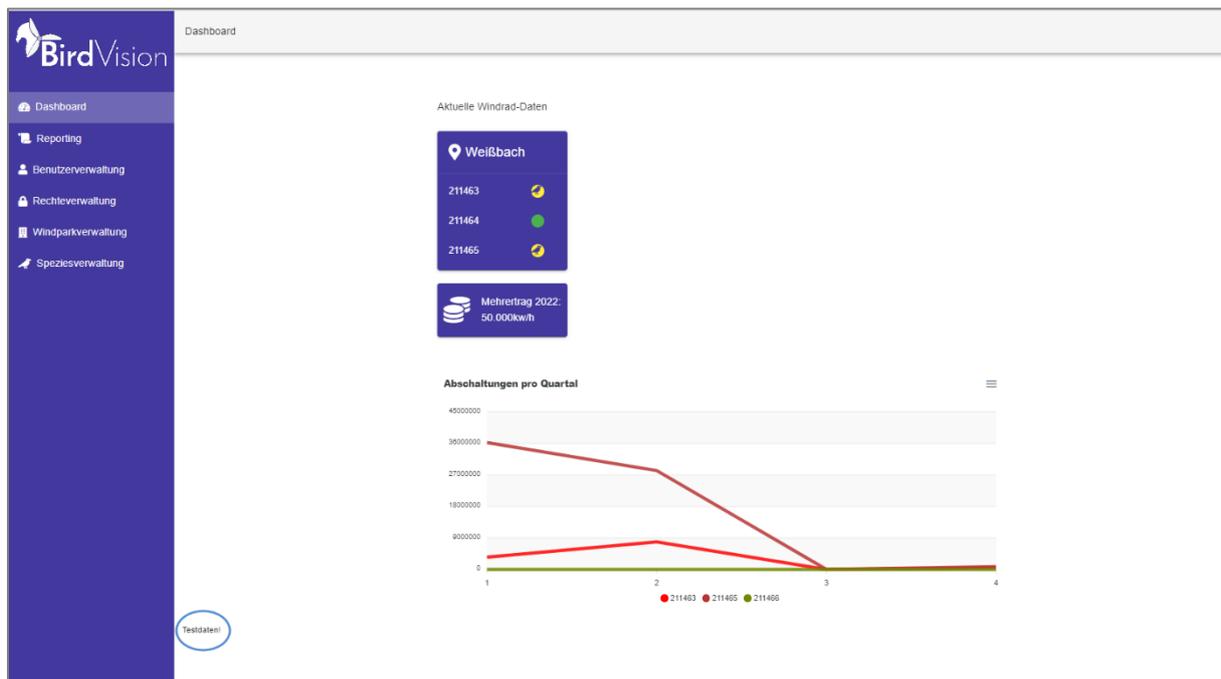


Abbildung 17: Übersicht eines Windparks mit künftiger Darstellung von Ertragsverlusten  
Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Bearbeitung des Arbeitspaketes 1 musste das Hauptentwicklungsziel, die Klassifikation deutschlandweit vorkommender Arten, aufgrund der hohen technischen Komplexität und der Systemauslegung von BirdVision® aufgegeben werden. Der notwendige Arbeitsaufwand hätte die Möglichkeiten in der geförderten Weiterentwicklung weit überstiegen, stellt hingegen zum gegenwärtigen Zeitpunkt eines in der Praxis nicht im Entwicklungsverhältnis stehenden Nutzens gegenüber. Die theoretischen Grundlagen für eine künftige Entwicklung im Gebiet der Klassifikation sind jedoch geschaffen worden.

Hingegen konnte im Arbeitspaket 1 erfreulicherweise eine Datenbank mit Webplattform aufgebaut werden, welche eine arbeitsgerechte und einfach handhabbare Aufbereitung der von BirdVision® generierten Daten ermöglicht. Damit ist eine Nutzung für Gutachter, Behörden und Betreiber praxisorientiert möglich. Zudem besteht die Möglichkeit, nach Abschluss der geförderten Weiterentwicklung die Datenbank und Webplattform auch durch die angeschaffte Serverhardware weiter auszubauen.



## II.1.2 Arbeitspaket 2 - Rechtzeitige Erfassung schnell fliegender windkraftempfindlicher Vogelarten

Die Basisversion von BirdVision® wurde auf die vergleichsweise langsam fliegende windkraftempfindliche Vogelart Rotmilan sowie auf Windenergieanlagen mit einer geringen Abschaltdauer (Vestas 3 MW Plattform) entwickelt. Gemäß Gutachterbüro konnten dabei in der Praxis Zeiten bis zur Senkung des Tötungsrisikos unter die Signifikanzschwelle (Austrudeln des Rotors) von 20 bis 25 Sekunden ab Stoppbefehl nachgewiesen werden. Entsprechend war eine Erfassungsbereichweite / Abschaltbereichweite von 200 m um die Windenergieanlage für zielgerichtete Anlagenabschaltungen ausreichend. Die technische Entwicklung und Optimierung der Basisversion von BirdVision® hat sich dabei an einer vergleichsweise kostengünstigen Kamera- und Verarbeitungshardware orientiert.

Nunmehr soll jedoch BirdVision® sowohl für

- Windenergieanlagen entwickelt werden, welche längere Abschaltzeiten als der oben erwähnte Anlagentyp aufweist,
- als auch viel mehr für schneller fliegende windkraftempfindliche Vogelarten als den Rotmilan (Adlerartige, Falkenartige, Storchartige)

entwickelt werden. Zusätzlich wird in Branchendiskussionen und Veröffentlichungen (bswp. KNE) eine Erfassungsbereichweite von 500 m für den Rotmilan diskutiert.

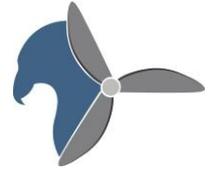
Innerhalb des Arbeitspaketes 2 der geförderten Weiterentwicklung von BirdVision® sollen daher Konzepte erarbeitet und getestet werden, um schnell fliegende windkraftempfindliche Vogelarten rechtzeitig zu erfassen.

- **Konzept I:** Optimierung der Kamerahardware

In diesem Konzept soll die Brennweite der Kameraobjektive erhöht werden, damit diese „weiter sehen“ können bzw. kleinere Bildausschnitte ausgeben, die genauer untersucht werden können.

- **Konzept 2:** Optimierung der Untersuchungsgenauigkeit der Software (durch erhöhte Grafikverarbeitung)

In diesem Konzept soll die Software überarbeitet werden, damit eine Untersuchungsgenauigkeit erzielt werden kann.



### Konzept I: Optimierung der Kamerahardware

Das Deep-Learning - Netzwerk von BirdVision® untersucht Einzelbilder des Kamerasystems nach vogelähnlichen Objekten.

Aus der Praxis werden dabei vogelähnliche Objekte mit einer Größe im Bereich von 6 bis 7 Pixel regelmäßig erkannt.

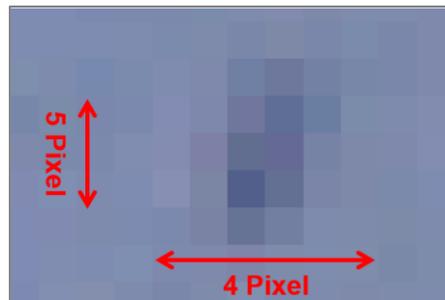


Abbildung 18: Beispiel für ein von BirdVision® erkanntes Vogelobjekt mit einer Größe von 5 Px x 4 Px  
Quelle: Eigene Darstellung

Die minimale Erkennungsgröße der Objekte, die Auflösung des Kamerabildes sowie der Öffnungswinkel des Objektivs bestimmen dabei die Reichweite des Systems.

Die Erhöhung der Kameraauflösung bedingt eine genauere Untersuchung des Kamerabildes um die minimale Erkennungsgröße beizubehalten. Hierfür ist eine höhere Bildverarbeitungsleistung erforderlich.

Daher soll im Konzept der Öffnungswinkel des Kameraobjektives beeinflusst werden. Die nachfolgende schematische Darstellung veranschaulicht dies:

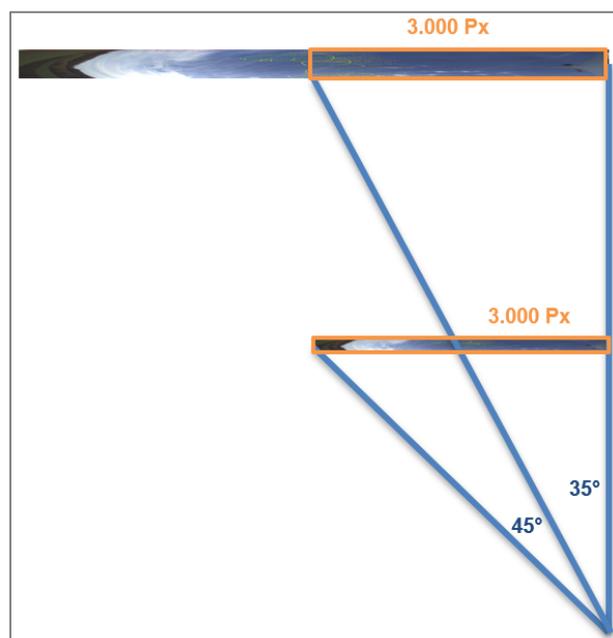


Abbildung 19: Beispiel für die Reichweite eines Kamerasystems mit verändertem Objektivöffnungswinkel  
Quelle: Eigene Darstellung



In dem hier dargestellten Beispiel mit einer Auflösung von 3.000 Px in der Breite verdoppelt sich die Erfassungsreichweite durch die Veränderung des Objektivöffnungswinkels von 45 Grad auf 35 Grad, da mit gleicher Pixelzahl der Bildausschnitt in der Breite halbiert wird. Derselbe Bildausschnitt wird dabei doppelt so weit entfernt dargestellt.

Der Öffnungswinkel des Objektivs wird von der **Brennweite** des Objektivs bestimmt.

Nachteilig wirkt sich jedoch aus, dass der Bildausschnitt bei der Veränderung des Öffnungswinkels deutlich verkleinert wird.

Zur „optischen Reichweitenerhöhung“ soll innerhalb der geförderten Weiterentwicklung von BirdVision® dieser Effekt der Erhöhung der Brennweite und damit der Reduzierung des Objektivöffnungswinkels getestet werden. Ebenfalls soll dabei betrachtet werden, wie sich eine Erhöhung der Kameraanzahl auf die Leistung / Anpassung des Gesamtsystems auswirken wird.

Die Basisversion von BirdVision® verwendet dabei ein 3,5 mm Objektiv mit insgesamt 6 Kameras. Diese können die 360° Halbkugel um die Windenergieanlage vollständig abdecken. Tab. 1 zeigt, dass eine Erhöhung der Brennweite zwar deutlich die theoretische Reichweite des Kamerasystems vergrößert, jedoch erhöht sich auch stark die Kameraanzahl um die horizontale Rundumsicht um die Windenergieanlage abzudecken.

Bei einer Erhöhung der Brennweite reduziert sich jedoch nicht nur der horizontale Öffnungswinkel, sondern auch der vertikale Öffnungswinkel.

Demzufolge sind zusätzliche Kameras für die Abdeckung der 360° Halbkugel notwendig, wenn eine Reichweitenerhöhung erzielt werden soll. Dies wirkt sich stark auf die Netzwerktechnik, die Verarbeitungshardware und die Montage aus. Damit erhöhen sich in jedem Fall die Systemkosten zur Erfassung von schnell fliegenden windkraftempfindlichen Vogelarten deutlich.

Innerhalb der geförderten Weiterentwicklung sollen dabei die Brennweiten 6,0 mm, 8,0 mm und 10,0 mm im Windpark Weißbach getestet werden. Hierzu wurde eine Kameraanordnung bestehend aus drei identischen Kameras mit den vorher beschriebenen drei unterschiedlichen Brennweiten auf einen gemeinsamen Punkt (benachbarte Windenergieanlage) ausgerichtet, um daraus direkte Ergebnisse abzuleiten.



Abbildung 20: Kamerahardware Reichweitentests  
Quelle: Eigene Darstellung

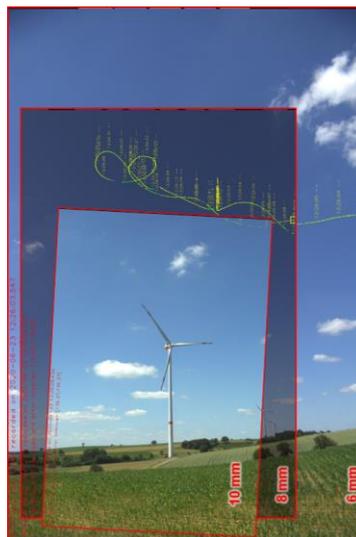


Abbildung 21: Blickfeld dreier Brennweiten  
Quelle: Eigene Darstellung

Nach den ersten Monitorings des Testsystems konnten beeindruckende Ergebnisse erzielt werden. So war es bereits mit einer 6 mm Brennweite möglich, Mäusebussarde in einer Entfernung von 400 bis 500 m zu erfassen (seither bis ca. 300 m). Eine Brennweite von 8 mm brachte erneut einen Reichweitengewinn in den Bereich von ca. 600 m für den Mäusebussard. Besonders beeindruckend war das 10 mm Objektiv. Für den Mäusebussard ergaben sich Ergebnisse von ca. 800 m. Aufgrund der kleineren Größe des Mäusebussards gegenüber dem Rotmilan, waren für diesen sogar noch größere Reichweiten möglich. Beeindruckend wird dies anhand der Länge des Mäusebussardsteigfluges in der folgenden Gegenüberstellung gezeigt.

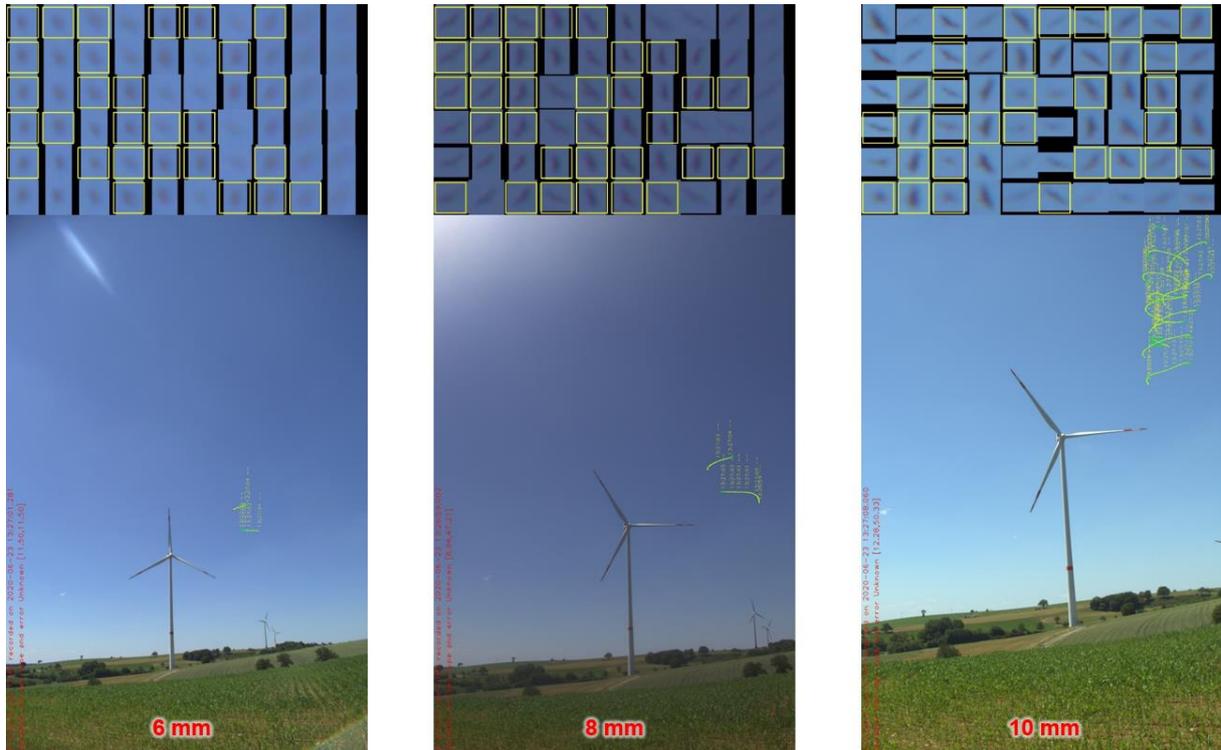
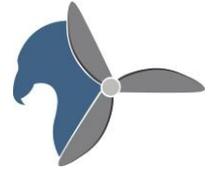


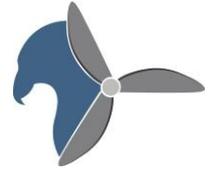
Abbildung 22: Gegenüberstellung eines Mäusebussardfluges mit drei unterschiedlichen Brennweiten  
Quelle: Eigene Darstellung

Jedoch wird bei diesen beeindruckenden Ergebnissen bereits ersichtlich, dass das Blickfeld mit steigender Brennweite deutlich abnimmt. Aufgrund dieser positiven Entwicklung der Tests wurde daraufhin beschlossen, das Arbeitspaket 2 auszuweiten und ein neues Praxissystem mit erhöhter Reichweite auszulegen. Dabei wurden folgende Ziele definiert:

- Höhere Reichweite des Systems bis mindestens 500 m für den Rotmilan
- Gleichbleibende Anzahl von Kameras, um Systemkosten in Grenzen zu halten
- Öffnungswinkel in der Vertikalen kann reduziert werden, da eine Überwachung des Rotorbereiches bei einem Abschaltbetrieb nur zu Dokumentationszwecken erforderlich ist (eine Abschaltung wäre erst bei einer Erfassung des Vogels im Rotorbereich nicht mehr rechtzeitig möglich)

Daraufhin wurden mehrere Objektive und Industriekameras ausgewählt und beschafft. In unterschiedlichen Kombinationen wurden diese zahlreichen Tests unterworfen. Relevant waren dabei unter anderem folgende Eigenschaften (einzelner Komponenten oder in Kombination):

- Realer Öffnungswinkel
- Pixelgröße
- Bildrate
- Shutter
- Verzeichnung



- Chromatische Aberration
- Handhabung
- Preis

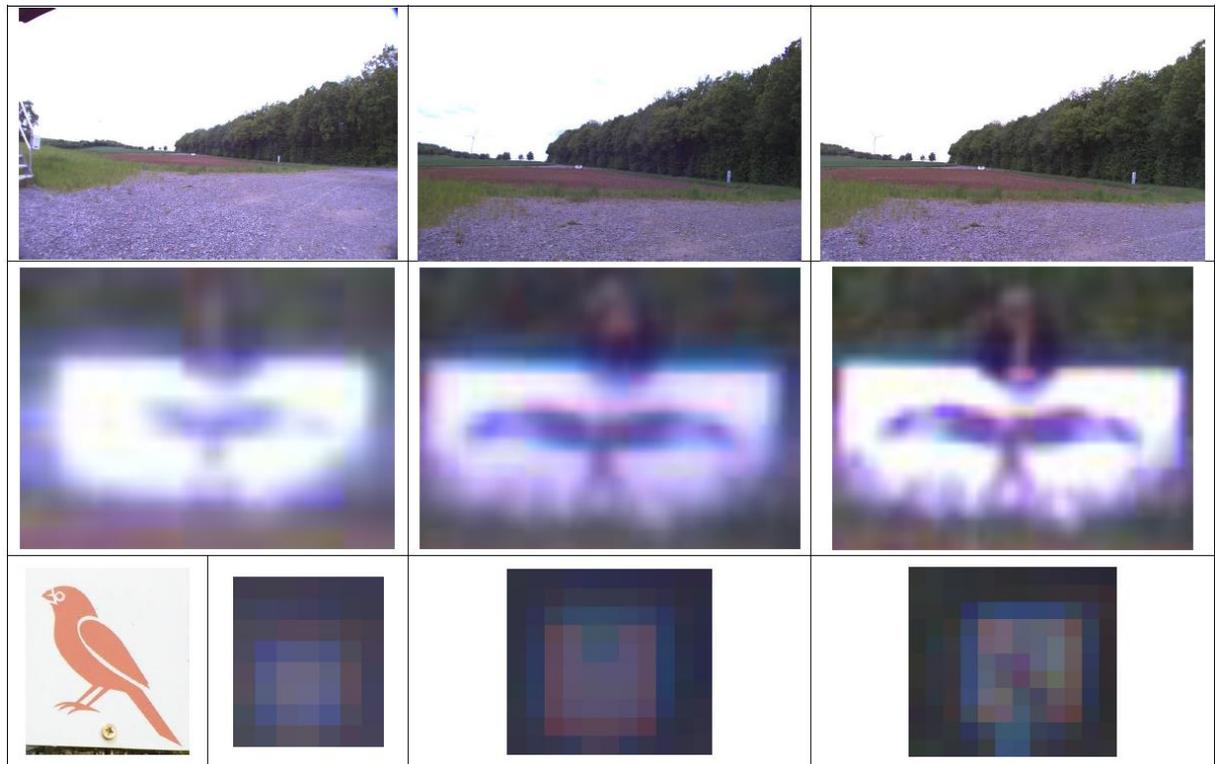


Tabelle 1: Beispielhafter Objektivvergleich mit Darstellung eines Rotmilans  
Quelle: Eigene Darstellung

Nach Abschluss aller Tests wurden die Ergebnisse festgehalten. Die stattgefundene Entwicklung der Kameragenerationen wird beispielhaft dargestellt:



Abbildung 23: Entwicklung der Kameragenerationen  
Quelle: Eigene Darstellung

Nach Auswahl der Kamera- und Objektivhardware wurde ein vollständiges Kamerasetup, bestehend aus sechs Stereokamerasystemen für den Windpark Weißbach, WEA III, projektiert, bestellt, montiert, kalibriert und errichtet. Dieses ist seit Februar 2022 im vollständigen Einsatz.

Daraufhin wurden im Frühjahr 2022 interne Tests mit der Systemfähigkeit durchgeführt. Es zeigte sich, dass sämtliche definierte Anforderungen erfüllt wurden. Beeindruckend ist, dass eine Reichweite von 500 m bis 600 m, einzelne Detektionen sogar darüber hinaus, für den Rotmilan erzielt werden konnten. Ebenfalls ergeben sich gute Überlappungsbereiche zwischen den Kameras, so dass ohne Lücken der 360° Bereich abgedeckt werden kann.



Abbildung 24: Erfasster Rotmilan in einer Entfernung von ca. 500 m, ab dem roten Track innerhalb der 250 m Schutzzone  
Quelle: Eigene Darstellung

Es lässt sich im Ergebnis festhalten, dass sich mit Verfolgung des Konzeptes zur Optimierung der Kamerahardware eine deutliche Reichweitenerhöhung ergeben hat. Damit ist es sowohl möglich, schnell fliegende windkraftempfindliche Vogelarten, wie beispielsweise falkenartige Vögel oder Adler, rechtzeitig zu erfassen. Gleichzeitig wurde die Reichweite für Großvögel wie beispielsweise den Rotmilan deutlich erhöht, um Branchenanforderungen gerecht zu werden. Die Entwicklung in Arbeitspaket 2 in Ergänzung mit der Erweiterung zur Auslegung eines vollständigen Systems war damit ein voller Erfolg.

### **Konzept II: Optimierung der Untersuchungsgenauigkeit der Software**

Ein Deep-Learning-Netzwerk, wie es in BirdVision® zur Erfassung von vogelähnlichen Objekten eingesetzt wird, wird in der softwareseitigen Entwicklung hinsichtlich Untersuchungstiefe und Untersuchungsgeschwindigkeit auf die vorhandene Bildverarbeitungshardware optimiert. Eine Anpassung erfolgt u.a. im Bereich der Bildkomprimierung, da hier ein großer Verbesserungsspielraum gesehen wird.

Generell gilt die Annahme, dass durch eine Bildkomprimierung Informationen verloren gehen können. Dies bedeutet, dass kleine vogelähnliche Objekte bei einer Bildkomprimierung verloren gehen können und die minimale Erkennungsgröße stark beeinträchtigt ist bzw. dahingehend optimiert werden muss, dass Störeinflüsse wie beispielsweise Insekten nicht ebenfalls zu übermäßigen Detektionen führen.

Durch die im vorangegangenen Kapitel beschriebene Optimierung der Hardwaretechnik können ebenfalls softwareseitige Anpassungen vorgenommen werden um schnell fliegende windkraftempfindliche Vogelarten rechtzeitig zu erfassen.



Der entsprechende Bildverarbeitungsserver mit leistungsstarken Grafikkarten wurde im Zuge der geförderten Weiterentwicklung beschafft und getestet. Ziel war es, zu prüfen in wie weit Leistungssteigerungen für BirdVision® auf einer neueren, aber auch kostenintensiveren Verarbeitungshardware gegenüber der BirdVision® Basisversion möglich war. In diesem Zuge wurde auch an der bereits erwähnten Softwareanpassung für den Komprimierungsprozess gearbeitet. Die Hardwareverbesserung ermöglichte in diesem Bereich eine deutliche Weiterentwicklung.

Im Arbeitspaket 2 konnten zwei Optimierungen der Reichweite mit zwei unterschiedlichen Konzepten (Hardwareoptimierung und Softwareoptimierung) durchgeführt werden. In der Praxis zeigt sich dies dadurch, dass Rotmilane regelmäßige in eine Reichweite von 500 m bis hin zu Einzelflügen sogar bis in 800 m Reichweite erfolgreich detektiert werden können. Dieses Ergebnis ist nur durch die Kombination beider Optimierungsvarianten möglich. Ebenfalls wurde die Erfassungsquote in Entfernungen gesteigert.

Während der Brutperiode 2022 wurde ein Gutachterbüro mit einem Monitoring des Systems beauftragt. In 12 Monitoringterminen wurden die Ergebnisse der geförderten Weiterentwicklung von BirdVision® mit dem realen Vogelflugbetrieb im Windpark Weißbach, schwerpunktmäßig an der WEA 3, verglichen.

Daraus ergaben sich folgende Ergebnisse (vgl. Tkacz und Mehrgott, 2022)<sup>3</sup>:

- „Durch das Kamerasystem der neuen Generation ist nun die Vogelerkennung in einem Radius bis zu ca. 500 m um die WEA möglich.“
- „Die Erfassungsrate von Flugbewegungen relevanter Großvögel im 200 m Radius um die WEA 3 betrug bei 12 Monitoringterminen im Zeitraum April – August 2022 insgesamt 100 %.“
- „In 89 % dieser Fälle wurde die WEA 3 bei Flugbewegungen im 200 m-Radius um die WEA automatisch durch das System abgeschaltet.“ Die Ergebnisse der einzelnen Termine sind im folgenden Diagramm dargestellt:

---

<sup>3</sup> Nicht öffentliche Quelle, liegt auf Anfrage bei der Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH vor.

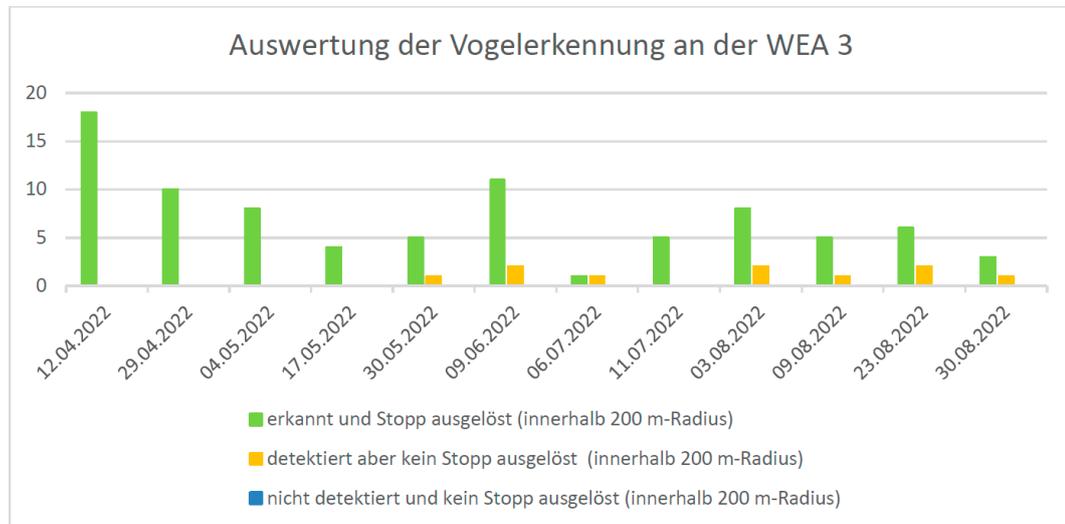


Abbildung 25: Gutachterliche Auswertung Vogelerkennung  
Quelle: Tkacz und Mehrgott, 2022, S. 13

- Ebenfalls wurde die Anzahl der Fehldetektionen und falschen Anlagenabschaltungen deutlich reduziert. Dies ist im Wesentlichen durch Parameteroptimierung im 3-D-Tracking erfolgt. Ab dem Monitoring im Juli durch die Gutachter wurden nur noch 8 fehlerhafte Abschaltungen in 18 h Monitoring nachgewiesen. Dies bedeutet, dass lediglich noch alle 2,25 Stunden eine Fehlabschaltung erfolgt. Die Ergebnisse werden hier zur besseren inhaltlichen Verbindung aus Arbeitspaket 3 bereits vorweggenommen.

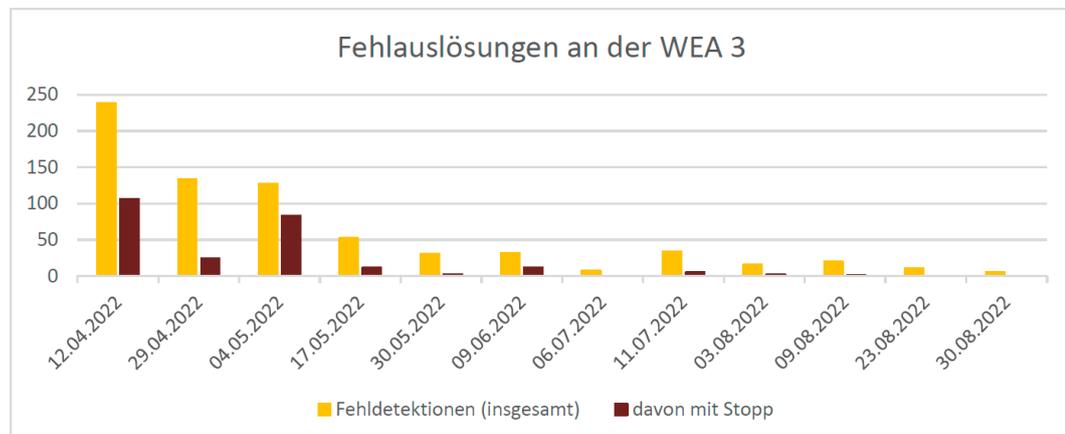


Abbildung 26: Fehlauslöser des Systems  
Quelle: Tkacz und Mehrgott, 2022, S. 15

- „Insgesamt wurden darüber hinaus durch das Kamerasystem 24 Flugbewegungen detektiert, die durch die Kartierer vor Ort nicht aufgenommen wurden [...]“. Dies entspricht zwei Flüge je Monitoring über 3 Stunden, welche vom Biologen nicht erfasst wurden. Bei insgesamt 258 Flugbewegungen, die in den 12 Monitoringterminen insgesamt erfasst wurden, entspricht dieser Rate rund 10 %.



### II.1.3 Arbeitspaket 3 - Weitergehende Reduktion von Fehlauflösungen zur Schonung der Anlagentechnologie und zur Ertragsoptimierung

Die Basisversion von BirdVision® arbeitet lediglich im 2-D-Bereich. Ein Deep-Learning-Netzwerk erkennt vogelähnliche Objekte und klassifiziert diese als Vogel oder als Nicht-Vogel. Mittels eines Trackings im 2-D-Raum (x- und y-Koordinaten) wird das vogelähnliche Objekt verfolgt und anhand dessen Bewegung auf Plausibilität überprüft. Vereinfacht gesagt handelt es sich dabei um einen Filter, dessen genaue Kalibrierung wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Ein zu starker Filter erkennt unter Umständen zu wenige Vögel, ein zu schwacher Filter kann sehr häufig zu Fehlauflösungen führen.

Dieses vereinfachte System zu Beginn der geförderten Weiterentwicklung führte noch zu sehr häufigen Fehlauflösungen. Anlagenabschaltungen konnte das System zum damaligen Zeitpunkt noch nicht durchführen, so dass nicht ermittelt werden kann, wie häufig eine jeweilige Windenergieanlage richtig oder falsch abgeschaltet wurde.

Nichts desto trotz, bedeutet jede Fehlauflösung / Fehldetektion, dass der abschaltungsrelevante Datensatz größer wird und damit unnötige Anlagenabschaltungen erfolgen würden. Dies würde zu unnötigen Ertragsverlusten aber auch zu einem erhöhten Verschleiß der jeweiligen Windenergieanlage führen.

Zu Beginn der geförderten Weiterentwicklung ergab sich beispielsweise an zwei repräsentativen Sommertagen im August 2019 folgendes Systemverhalten.

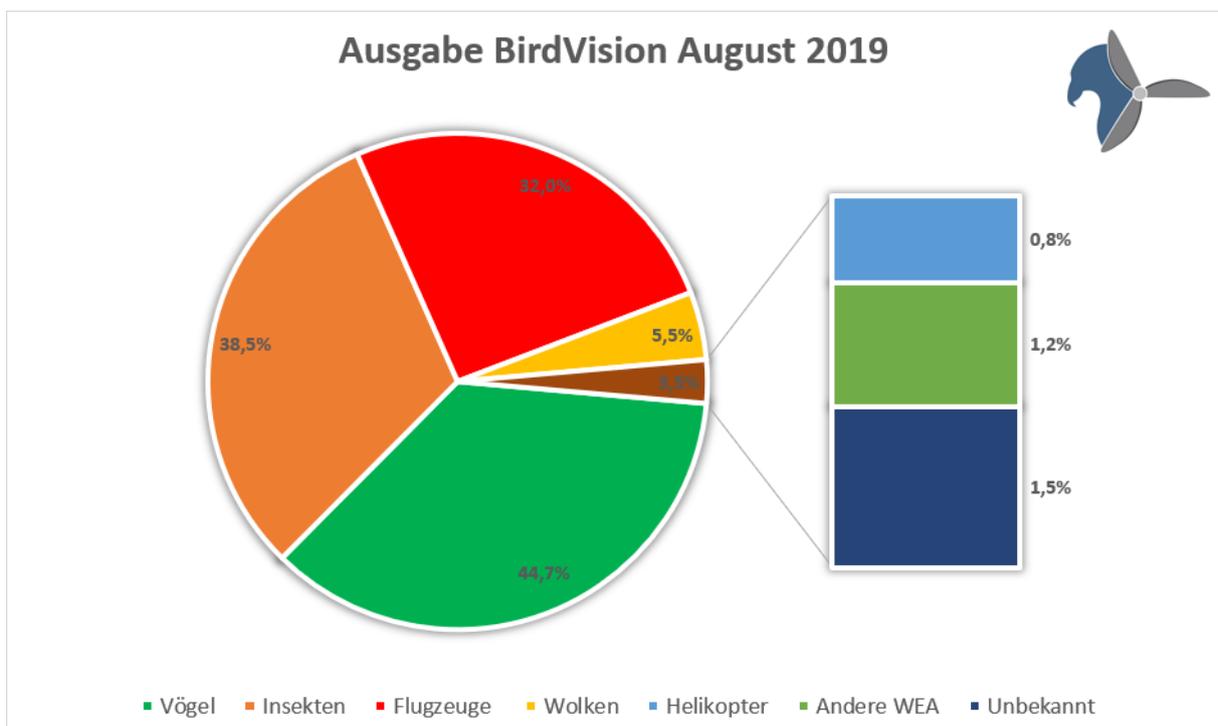


Abbildung 27: Aufnahmeverhalten der Basisversion von BirdVision® im August 2019  
Quelle: Eigene Darstellung



Die Auswertung zeigt, dass etwas weniger als die Hälfte des von BirdVision® als Vogel klassifiziertes und aufgenommenes Datenmaterial tatsächlich einen Vogel darstellt. Hingegen bestehen sehr häufig Fehlaufnahmen insbesondere in Form von Insekten oder Flugzeugen. Kleinere Fehlauslöser bestehen in Wolkenfragmenten, die optisch Vögeln ähneln, in Helikoptern oder in Form von Verschattungen und Rotorbewegungen an anderen Windenergieanlagen.

Das hohe Fehlaufnahmeverhalten zeigt, dass in diesem Bereich großer Handlungsbedarf liegt. Daher war ein Schwerpunkt der geförderten Weiterentwicklung die Reduktion von Fehlauslösern, deren Entwicklung in diesem Kapitel skizziert wird.

Herausfordernd für die Bildverarbeitungstechnologie der Basisversion von BirdVision® bzw. dessen Deep-Learning-Netzwerk ist es, sehr kleiner Objekte zielsicher als Vogel zu detektieren. Dabei ergibt sich die Suchgröße des Objektes aus der notwendigen detektierbaren Entfernung. Zum damaligen Zeitpunkt lag die Erfassungsreichweite von BirdVision® im Bereich von 300 m bis 400 m. Dadurch ergaben sich bei der damaligen Kameraanordnung und -konfiguration folgende Objektgröße zur Detektion:

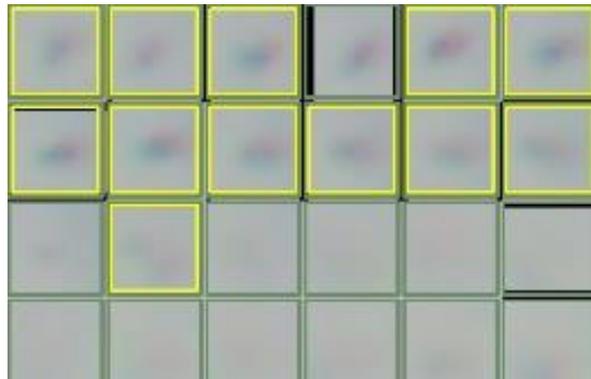


Abbildung 28: Mäusebussard in einer Entfernung von ca. bis 200 m  
Quelle: Eigene Darstellung

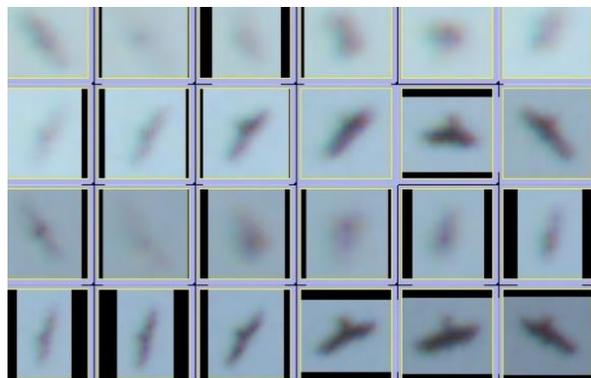
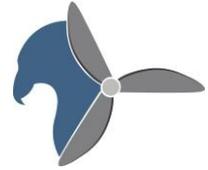


Abbildung 29: Rotmilan in einer Entfernung von ca. 100, 300 m bis 400 m  
Quelle: Eigene Darstellung



Vögel sind in dieser Entfernung für das System nur als sehr kleine „Pixelhaufen“ erkennbar. Erst bei einer geringeren Entfernung des Vogels zum BirdVision®-System treten diese stärker als „Vogel“ hervor.

Demgegenüber grenzen sich die Hauptstöreinflüsse Insekten und Flugzeuge wie folgt ab:

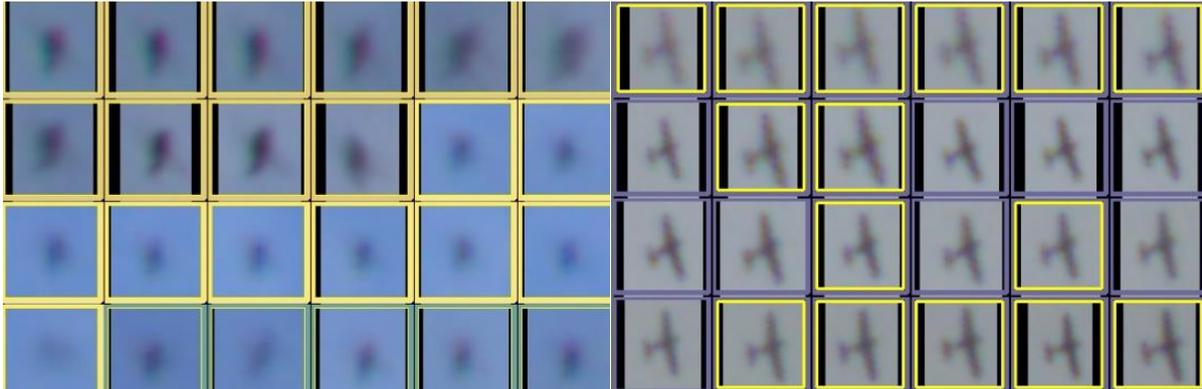


Abbildung 30: Von BirdVision® detektiertes Insekt (links) und von BirdVision® detektiertes Flugzeug (rechts)  
Quelle: Eigenes Bildmaterial

Für den Betrachter und damit sicherlich auch für das Deep-Learning-Netzwerk von BirdVision® ergeben sich nur geringfügige bis gar keine optischen Unterschiede zwischen Vogel in unterschiedlicher Entfernung und entsprechender Störeinflüsse. Über eine reine Erkennung und Filterung vogelähnlicher Objekte mittels des Deep-Learning-Netzwerkes entstehen daher zu häufig Störeinflüsse, welche einzig mit dieser Technologie nicht filterbar sind.

Neben der reinen Erkennung wird ein vogelähnliches Objekt auch mittels Tracking verfolgt und anhand sprunghafter Veränderungen als Vogel ausgeschlossen. Im Rahmen der geförderten Weiterentwicklung wurde zuerst dieser Lösungsansatz verfolgt. Allerdings entstehen dennoch häufige Ereignisse, bei welchen sich relativ zur Kamera betrachtet Insekten und Flugzeuge vergleichbar wie Vögel bewegen. Fehlauflösungen bleiben daher weiterhin bestehen.

Für den Ausschluss von Flugzeugen aus Fehlauflöser wurde daher beispielsweise ein weiterer Algorithmus entworfen, welcher die lineare Flugbewegung von Flugzeugen erkennen soll. Hierzu im Einzelnen:



Abbildung 31: Aufnahme eines Verkehrsflugzeuges in großer Höhe  
Quelle: Eigene Darstellung

Verkehrsflugzeuge in großer Höhe fliegen im Regelfall ausschließlich linear über die Kamera eines BirdVision®-System. Kleinflugzeuge können im Gegenzug kleinere Kurven oder Kreisflüge fliegen.



Abbildung 32: Aufnahme eines Turmfalken  
Quelle: Eigene Darstellung

Im Gegenzug verhalten sich Vögel sehr häufig nicht linear. Ihre Flugbahnen sind von Kurven, Rüttelflügen, Sturzflügen und unterschiedlichen Fluggeschwindigkeiten geprägt. Diese Differenzierung im 2-D-Raum sollte durch die Ermittlung eines Krümmungswertes der Flugbahn des Objektes



implementiert werden. Der KI-Spezialist hat hierfür den Algorithmus zur Verfügung gestellt. Die Parameterbestimmung und Auswertung erfolgte im Hause der Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH.

Dabei wurde versucht, ein ideales Verhältnis von möglichst vielen Flugzeugen auszufiltern und im Gegenzug möglichst viele Vögel weiterhin zu detektieren. Gleichzeitig muss die Entscheidung der Krümmung der Flugbahn bereits nach wenigen Sekunden erfolgen, da sonst ggf. das Vogelobjekt bereits im Kollisionsbereich der Windenergieanlage geflogen ist. Insbesondere der Faktor einer schnellen Entscheidung läuft einer exakten Separierung in der Praxis entgegen, da beispielsweise Turmfalken kleinräumig sehr lineare Bewegungen, ähnlich derer von Flugzeugen, machen.

Nachfolgende Grafik soll die Schwierigkeit verdeutlichen:

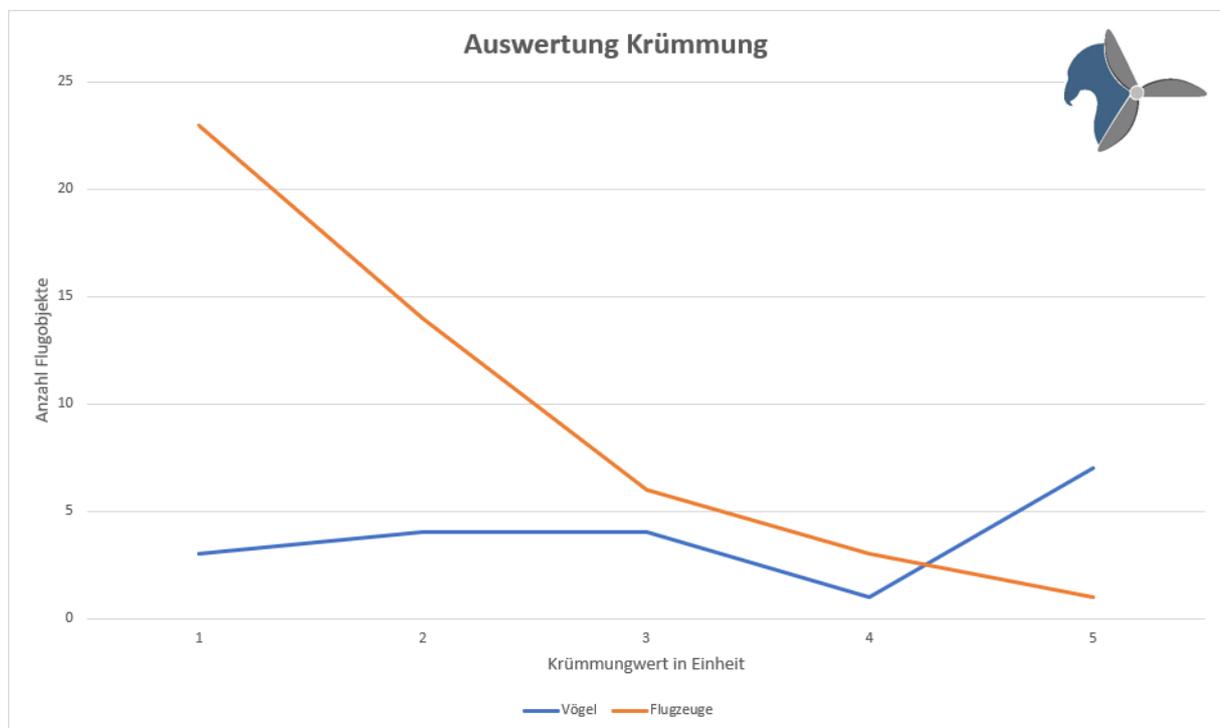


Abbildung 33: Auswertung Messwert Krümmung  
Quelle: Eigene Darstellung

In der Grafik ist die Anzahl von Flugobjekten an einem Tag mit einem sehr niedrigen Krümmungswert dargestellt. Die orangene Linie bezieht sich dabei auf Flugzeuge, die blaue Linie auf Vögel. Bei Flugzeugen ist zu beobachten, dass besonders viele Flugzeuge einen sehr kleinen Krümmungswert aufweisen. Flugzeuge mit größeren Krümmungswerten kommen hingegen sehr selten vor. Demnach kann festgehalten werden: Je größer der Krümmungswert gesetzt wird, desto mehr Flugzeuge werden ausgefiltert.

An diesem Tag sind jedoch auch einige Vogelaufnahmen entstanden, die ähnlich kleine Krümmungswerte wie Flugzeuge aufweisen. Bei einer Ausfilterung von Flugzeugen wären diese Vogelflüge nicht vom System als solche erkannt worden.



In der Folge bedeutet dies: Je größer der Krümmungswert als Separationswert eingestellt wird, desto mehr Flugzeuge werden ausgefiltert, jedoch auch deutlich mehr Vögel.

Für ein verlässliches System, das zu einem sehr hohen Wert erfolgreich Vögel detektiert und eine sehr geringe Fehlauflösequote aufweist, ist diese Art der Ausfilterung von Störeinflüssen einzig im 2-D-Raum geeignet. Zusätzlich wird es aufgrund eines Parameterdilemmas nie zu den besten Ergebnissen führen.

Parallel zur geförderten Weiterentwicklung von BirdVision® wurde auch, außerhalb der Förderung, ein Stereoansatz entwickelt. Zwei Kameras in einer Entfernung von rund 1,0 m teilen sich dabei den Erfassungsbereich und sind in diesem zueinander kalibriert. Aufgrund der unterschiedlichen Darstellung des gleichen Objektes in beiden Erfassungsbereichen der Kameras kann dabei die Entfernung des Objektes hinreichend genau gemessen werden. Damit ergibt sich für jedes Objekt eine 3-D-Position (x, y und z).

Mit Hinzunahme des Entfernungsparameters ergeben sich völlig neue Möglichkeiten Fehlauflösungen auszufiltern. Dies betrifft insbesondere die zu nahen Objekte (Insekten), die zu weit entfernten Objekte (Flugzeuge) oder auch unplausible Aufnahmen und Fehlmessungen mit schnell veränderlichen Entfernungsparametern.

Der Software-Spezialist hat daher das bereits in der Basisversion entwickelte 2-D-Tracking (x und y) um eine dritte Dimension z erweitert. Zusätzlich wurden in BirdVision® mehrere Filterkriterien in Abhängigkeit der Entfernung des Objektes zur Kamera ergänzt.

Die beiden Trackingalgorithmen können wie in der folgenden Grafik beschrieben werden:

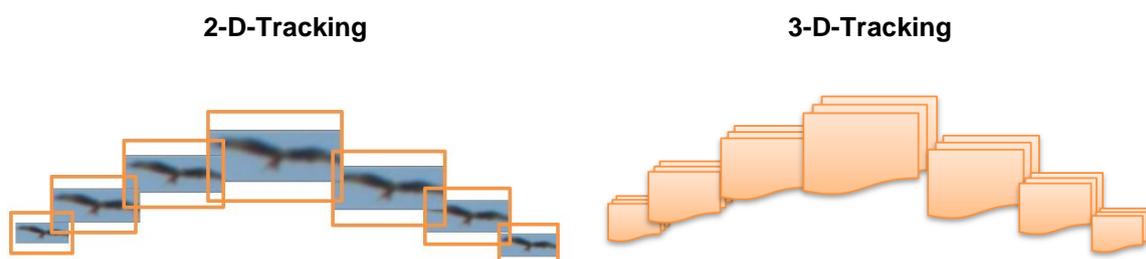


Abbildung 34: Trackingalgorithmen im Vergleich  
Quelle: Eigene Darstellung

Im 2-D-Tracking wird die Lage einzelner Detektion mit einem x- und y-Wert versehen. Dieses (vereinfacht dargestellte Prinzip) wurde nun um eine Dritte-Koordinate, den z-Wert (Entfernungswertung), im Raum erweitert. Wenn ein Objekt in der Entfernungsmessung von Bild zu Bild, Detektion zu Detektion eng beieinander liegt, handelt es sich um eine valide Flugbewegung eines Vogelobjektes. Wenn sich die Entfernung des Objektes zu schnell und zu stark ändert, kann es sich



dabei nicht um ein sinnvolles Vogelflugobjekt handeln. Dieses wird daher aussortiert und nicht weiterverfolgt.

Mit diesem 3-D-Trackingansatz, als auch mit der Ausfilterung von zu nahen und zu fernen Objekten hat sich die Anzahl von Fehlauflösungen deutlich reduziert. Gleichzeitig ist die Basisversion von BirdVision® zum aktuellen Entwicklungszeitpunkt in der Lage Anlagenabschaltungen durchzuführen. Im Arbeitspaket 2 wurde die Reichweite für die schnellfliegende Vögel auf bis zu 500 m erhöht und der Abschaltradius auf 200m angepasst. Dadurch werden wesentlich mehr Flugobjekte aufgenommen, die aber zu keiner Anlagenabschaltung geführt haben. Nachfolgend eine Verteilung dieser aufgeschlüsselt nach Flugobjekt im Juni:

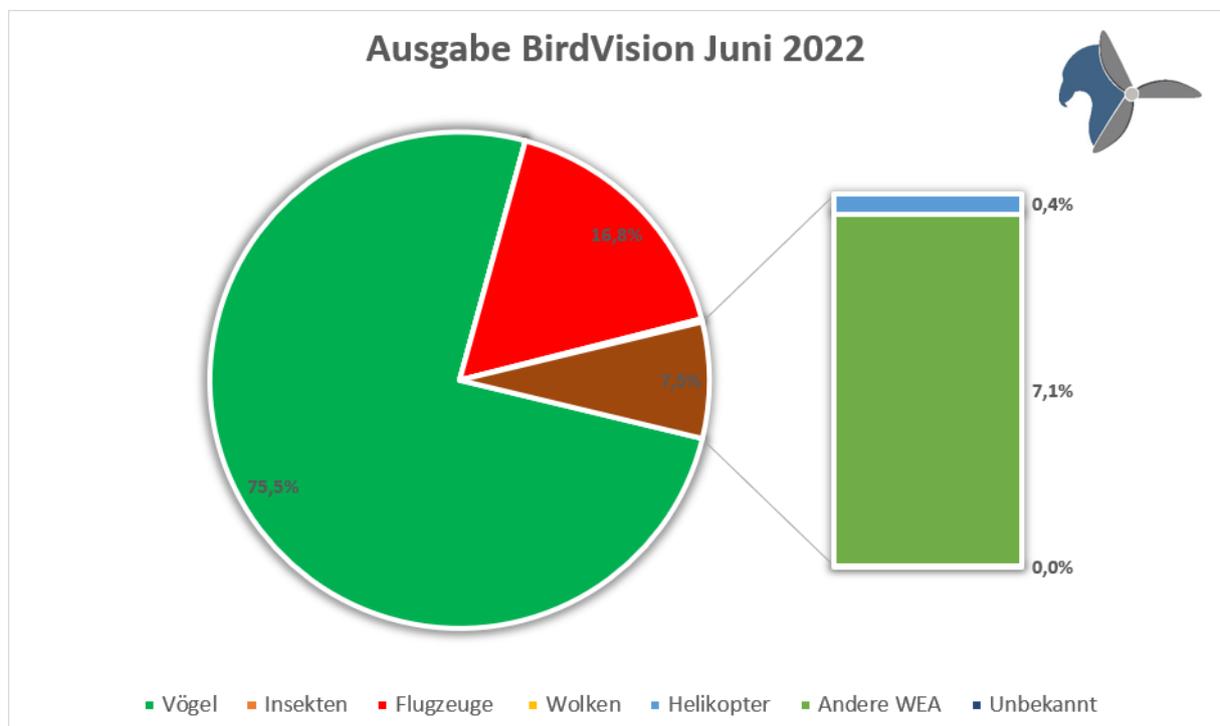


Abbildung 35: Ausgabe der BirdVision® Version im Juni 2022  
Quelle: Eigene Darstellung

Den überwiegenden Anteil des von BirdVision® nun ausgegebenen und damit detektierten Datenmaterials im Bereich von rund 500 m um die Windenergieanlage stellen Vögel dar. Gegenüber August 2019 hat sich der Vogelanteil an den Gesamtaufnahmen nahezu verdoppelt. Damit hat insgesamt der Anteil an Fehlauflösungen deutlich abgenommen.

Dieser fehlerbehaftete Anteil besteht nun überwiegend aus Flugzeugen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass der Stereoansatz bei weit entfernten Objekten nicht immer zu plausiblen Entfernungsmessungen führt. Die tatsächlichen Gründe für dieses Ergebnis sind zum derzeitigen Zeitpunkt noch unbekannt und konnten nicht sinnvoll nachvollzogen werden.



Ein weiterer Anteil an Fehlauflösungen stellen Detektionen auf andere Windenergieanlagen im Windpark bzw. deren Farbspiel an den Rotorblättern dar. Weitere Fehlauflösungen bestehen erfreulicherweise nur noch in sehr kleinem Umfang. Besonders erfolgreich war das 3-D-Tracking beim Ausschluss von Insekten. Hier sind unplausible, schnell veränderliche Entfernungen besonders häufig, so dass der Filter des 3-D-Trackings diese besonders gut aussortieren kann.

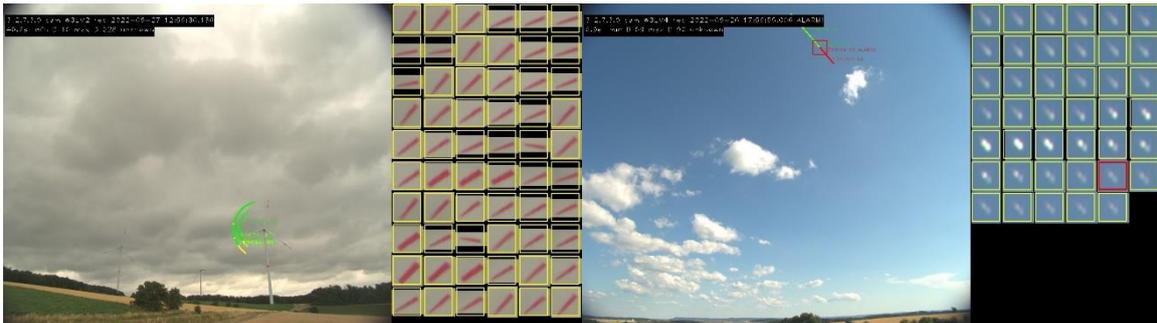


Abbildung 36: Fehlauflösung andere Windenergieanlage (links) und Fehlauflösung Flugzeug (rechts)  
Quelle: Eigenes Bildmaterial

Da Flugzeuge und Reflexionen von anderen Windenergieanlagen im Regelfall sehr weit vom BirdVision®-System entfernt auftreten, zeigt sich noch ein deutlicheres Bild, wenn nur noch Alarmer mit Anlagenabschaltung bei einem Abschaltradius von 200 m bis 250 m betrachtet werden:

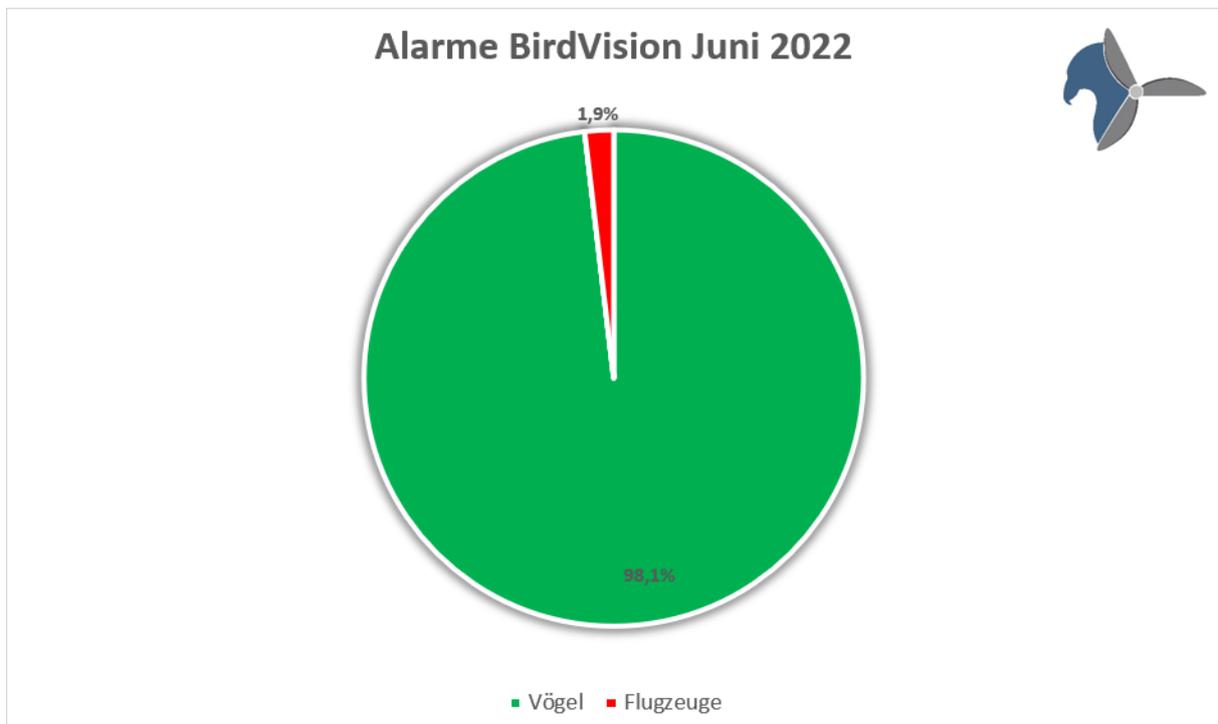


Abbildung 37: Alarmer mit simulierter Abschaltung der BirdVision® Version im Juni 2022  
Quelle: Eigene Darstellung



Erfreulicherweise sind 98 % der Alarme auf Vogelflüge erfolgt. Lediglich ein kleiner Restanteil mit Alarm entfällt auf Flugzeuge.

Alles in allem zeigt der Stereoansatz in Verbindung mit dem 3-D-Tracking ein sehr erfolgreiches Ergebnis zur Reduktion von Fehlalarmen und damit zur Ertragsoptimierung und Schonung der Anlagentechnologie. Diese Verbesserung ergibt sich aufgrund von nur noch sehr gering vorhandenen Anlagenabschaltungen auf Nicht-Vogel-Objekte. Die niedrige Fehlalarmquote von einer Fehlalarmabschaltung in 2,25 Stunden wurde bereits im Arbeitspaket 2 im Rahmen des Monitorings des Kamerasystems der geförderten Weiterentwicklung ermittelt und dargestellt. Das Arbeitspaket war diesbezüglich ein voller Erfolg.

Jedoch ergibt sich insbesondere mit der in Arbeitspaket 2 der geförderten Weiterentwicklung eine deutlich vergrößerte Reichweite von rund 500 m bei Großvögeln und eine weitere Herausforderung mit Fehlalarmen und -abschaltungen auf kleine Vögel wie beispielsweise die Feldlerche oder Tauben. Im Nahbereich von rund 100 m um die Windenergieanlage und damit im abschaltrelevanten Bereich erkennt BirdVision® nun diese kleinen Vogelarten deutlich besser und löst sehr häufig einen Alarm aus. Die Herausforderung wird anhand einer Auswertung im Juni 2022 in nachfolgender Grafik verdeutlicht:

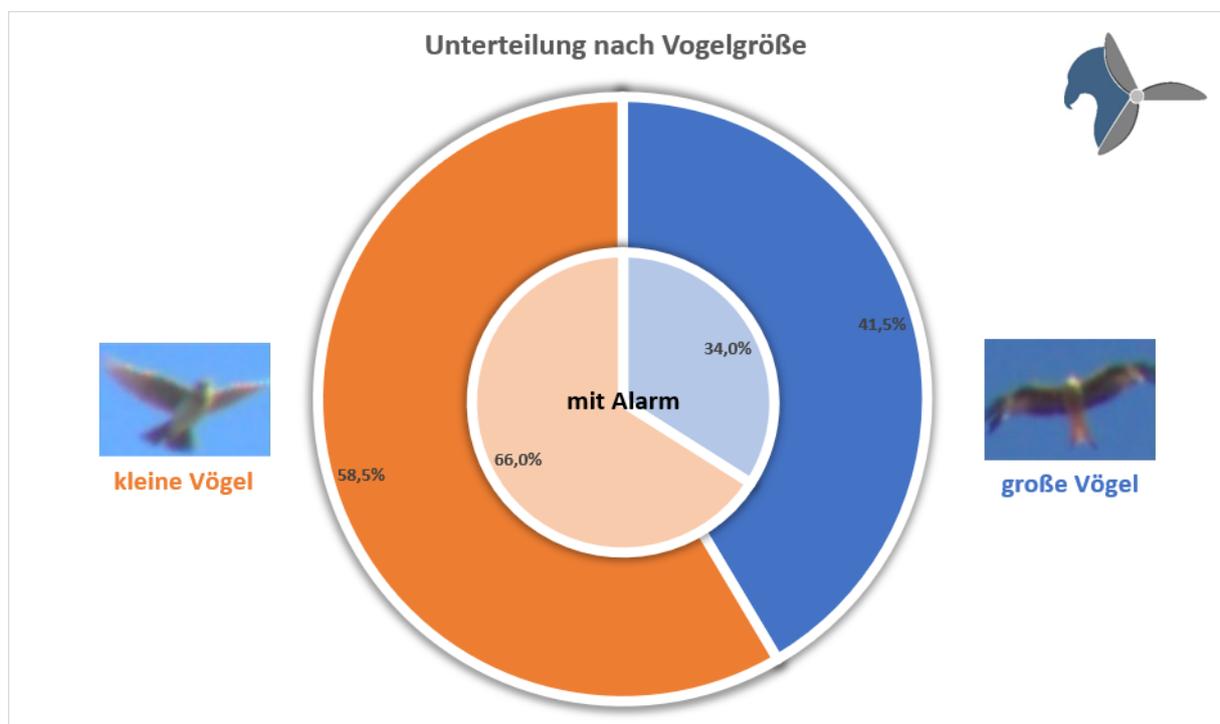


Abbildung 38: Unterteilung der Aufnahmen und Alarme im Juni 2022 nach Vogelgröße  
Quelle: Eigene Darstellung

Demnach sind ca. 60 % der von BirdVision® detektierten Vögel den „kleinen Vögeln“ zuzuordnen. Hierzu zählen ausnahmslos nicht windkraftempfindliche Vogelarten wie Feldlerchen, Tauben und



Elstern. Nur 40 % der von BirdVision® detektierten Vögel sind Großvögel, welche häufig windkraftempfindlich sind (Rotmilan, Schwarzmilan, aber auch Falken, Rabenkrähen und Bussarde). Betrachtet man die Vogeldetektionen, die aufgrund ihrer Nähe und Flughöhe Anlagenabschaltungen auslösen sollten (Alarm), verschiebt sich der Schwerpunkt sogar zu zwei Drittel auf die kleinen Vögel. Damit wären nur ein Drittel der Abschaltungen der Windenergieanlage für schützenswerte Großvögel bzw. Vögel, die überhaupt erst im Rotorbereich vorkommen.

Daher soll ebenfalls in der geförderten Weiterentwicklung ein Algorithmus entwickelt werden, der zwischen großen, mittelgroßen und kleinen Vögeln unterscheiden kann.

Hierfür ist die Ermittlung der Flügelspannweite des jeweiligen Objektes erforderlich, um den Messwert in eine jeweilige Spanne unterschiedlicher Vogelgattungen einzusortieren. Zur Ermittlung der Flügelspannweite soll auf den bestehenden Stereoeffekt zur Berechnung der Entfernung des Objektes zur Windenergieanlage zurückgegriffen werden.

Es wurden unterschiedliche Ideen entwickelt, wie die Flügelspannweite bemessen werden kann. Diese wurden in mehreren Testphasen ausführlich geprüft und angepasst. Der entwickelte Messalgorithmus klassifiziert die unterschiedlich vorkommenden Vogelarten in folgende Größen:

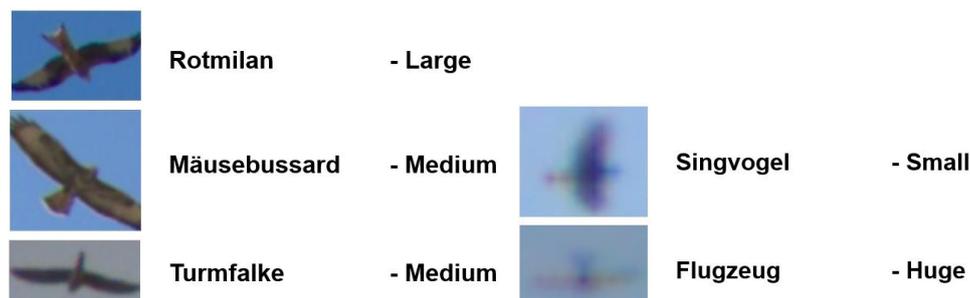


Abbildung 39: Klassifikationsklassen von BirdVision® nach Spannweite  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Genauigkeit der Größenklassifikation wurde in einer internen Auswertung wie folgt bestimmt:

		IST			
		small	medium	large	unkown
SOLL	small	10	0	0	10
	medium	0	51	0	31
	large	0	6	4	5

Tabelle 2: Größenklassifikation an zwei Tagen im September 2022  
Quelle: Eigene Darstellung

Auch wenn die Stichprobe im Herbst sehr gering war, zeigt sich, dass die Größenklassifikation überwiegend erfolgreich die Vogelgröße eingeordnet hat. Lediglich einige große Vögel wurden nur als mittelgroß klassifiziert. Zum Zeitpunkt der Auswertung wurde noch eine größere Menge an Vögeln in



die Kategorie „unkown“ (unbestimmt) eingeordnet. Dies lag zum einen daran, dass es zu diesem Zeitpunkt noch keine Kategorie „huge“ für Flugzeuge gab. Außerdem können in einzelnen Fällen unscharfe, weit entfernte Vogelobjekte sowie kurze Sequenzen nicht aussagekräftig klassifiziert werden und wurden daher als „unkown“ ausgegeben.

Mittels der Größenklassifizierung wurde das Arbeitspaket 2 – Reduktion von Fehlalarmen erfolgreich abgeschlossen und liefert beeindruckende Ergebnisse für eine künftige zielgerichtete und möglichst fehlerfreie Anlagenabschaltung sowie einen Monitoringbetrieb durch BirdVision®.



## II.1.4 Arbeitspaket 4 - Ausgabe eines Flugbildes mit Geokoordinaten und freistehendes Monitoring- und Schutzsystem

### Ausgabe eines Flugbildes mit Geokoordinaten

Die Basisversion von BirdVision® betrachtete das Vogelvorkommen an einer Windenergieanlage bislang nur auf der jeweiligen Kamera, wovon insgesamt sechs Stereokamerapaare zur Abdeckung des 360 Grad Bereichs dienen. Daher erfolgte eine Abschaltung bislang nur kamerabezogen, ebenso wie die Aufbereitung und Darstellung der Flugdaten. Dabei kann es zu Schnittmengenverlusten im Überlappbereich mehrerer Kameras kommen. Zudem fehlt für den Betrachter ein einzelner Blick über das gesamte Flugereignis im Umfeld der Windenergieanlage. Vielmehr müssen perspektivisch im Augenblick mehrere Bilder „im Kopf“ kombiniert werden. Daher soll innerhalb der geförderten Weiterentwicklung ein kameraübergreifendes Bild, sowie eine kameraübergreifende Entscheidung für Anlagenabschaltungen, entwickelt werden.

Mit Verknüpfung des Stereobetriebes kann nach einer weiteren Entwicklung der Software die Flugbewegung des Vogels mit x, y und z-Werten von Geokoordinaten im Raum angegeben werden. Damit wären umfangreiche Auswertungen des Flugverhaltens von Vogelarten im Umfeld von Windenergieanlagen möglich. Ziel könnte beispielsweise sein, die tatsächliche Gefährdung von Vogelarten an Windenergieanlagen in der Praxis in großem Stil zu ermitteln oder beispielsweise ein Meideverhalten nachzuweisen. Durch die Ausgabe von Geokoordinaten ist dies für eine große Anzahl an Flügen in einzelnen Karten nachvollziehbar. Die Geokoordinaten sollen hierbei für eine Bearbeitung in geografischen Informationssystemen aufbereitet sowie selbst in von BirdVision® generierten Karten dargestellt werden.

Hierfür wurden die Stereodaten in ein weltbezogenes System überführt. Die Daten können später auf einer Landkarte oder sogar in einem 3D-Model visualisiert werden. Um die Funktionsfähigkeit des Modells zu prüfen wurde ein Drohnenflug aufgenommen und ausgewertet. Die Drohne ist dabei in einem Kreis mit gleichbleibender Höhe um die Anlage geflogen.

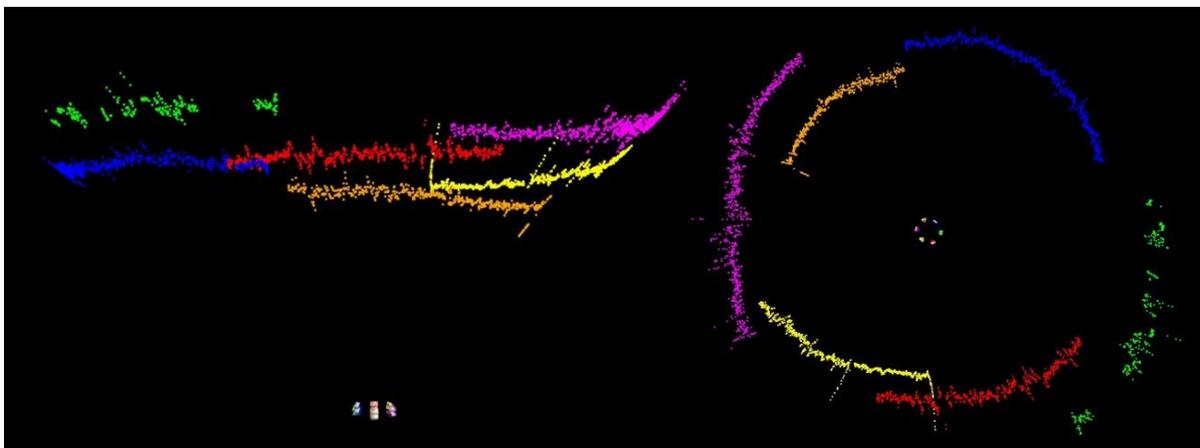


Abbildung 40 Auswertung Drohnenflug  
Quelle: Eigene Darstellung

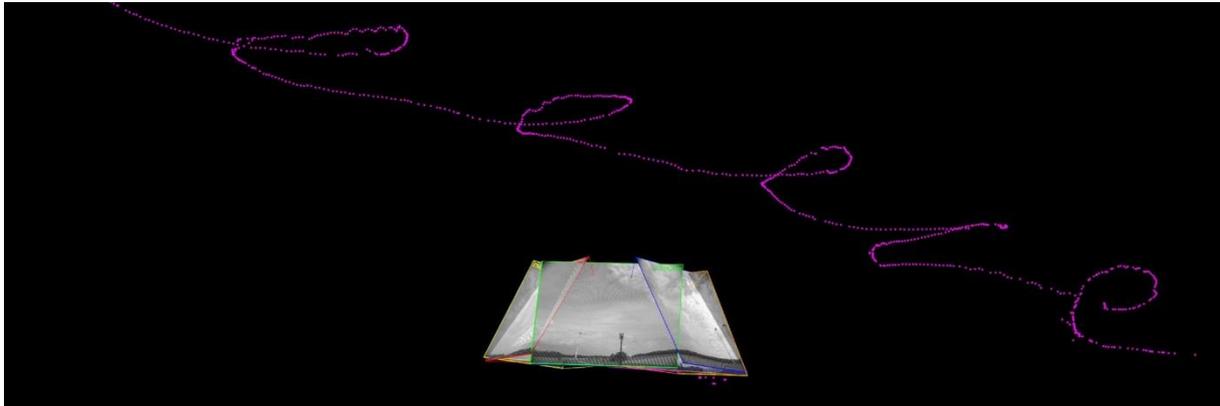
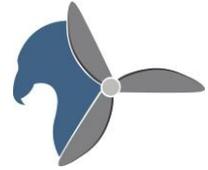


Abbildung 41: Darstellung eines kameraübergreifenden Kreisfluges eines Vogels im 3D-Raum  
Quelle: Eigene Darstellung

Die nun gewonnenen Daten werden visualisiert. Es werden auf die Luftbilder der Anlage die entstandenen Flugkurven eingezeichnet und es wird ein Diagramm erstellt, welches den Höhenverlauf des Fluges im Bezug zur Zeit darstellt.

Die entwickelte Technologie der kameraübergreifenden Betrachtungsweise der Vogelflüge wird im letzten Schritt auch auf die Ausgabe der Flugbilder übertragen. Als finale Ausgabe wird ein Panoramabild erzeugt, welches einen Rundumblick um die Anlage zum Zeitpunkt des Fluges zeigt.

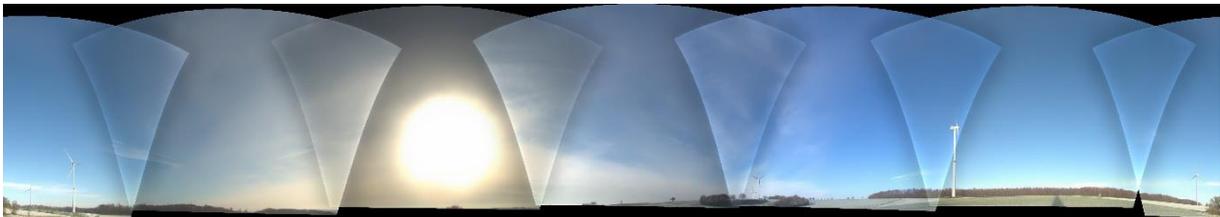


Abbildung 42: Kameraübergreifendes Bild zum aktuellen Entwicklungsstand  
Quelle: Eigene Darstellung

Innerhalb der geförderten Weiterentwicklung von BirdVision® konnte eine kameraübergreifende Betrachtungsweise des Vogelflugverhalten an Windenergieanlagen entwickelt werden. Hierzu erfolgte eine kameraübergreifende, automatisierte Kalibrierung. Die Ergebnisse von BirdVision® werden nun kameraübergreifend in einem Panoramabild ausgegeben. Zudem können einzelne Flüge im 3-D-Raum ausgegeben und weiterverarbeitet werden. Ebenfalls erfolgt nun eine Abschaltung der Windenergieanlage kameraübergreifend ohne den Verlust von Schnittmengen im Überlappbereich. Daher war dieser Teilaspekt im Arbeitspaket 4 ein voller Erfolg.

### **Freistehendes Monitoring- und Schutzsystem**

Die Basisversion von BirdVision® ist auf eine feste Montage am Fuß einer Windenergieanlage ausgelegt. Damit ist eine Abschaltung der Windenergieanlage beim Anflug kollisionsgefährdeter Vogelarten sowie ein Betriebsmonitoring möglich.



Im Vorfeld einer Windparkplanung ist es jedoch erforderlich, umfangreiche artenschutzfachliche Untersuchungen der Bestandssituation durchzuführen. Dies führt zu einem hohen personellen Arbeitsaufwand als auch zu regelmäßigen Diskussionen zur Qualität der Untersuchungen. Hilfreich wäre hier eine automatische und genaue Erfassung der Bestandssituation durch ein BirdVision®-System, welches mobil und unabhängig vom Standort eingesetzt werden kann. Ebenfalls ließe sich damit ohne größeren Montageaufwand ein Monitoring in bestehenden Windparks für kürzere Zeiträume, beispielsweise bei der nachträglichen Ansiedlung windkraftempfindlicher Vogelarten durchführen. Zusätzlich würde ein Vogeldetektionssystem als mobile Lösung für weitere Forschungs- und Monitoringanwendungsfelder, unabhängig von der Windenergie, zur Verfügung stehen. Derartige Anfragen, beispielsweise für Hochspannungsfreileitungen, sind bereits eingegangen. Daher soll im Arbeitspaket 4 eine mobile und autarke Version von BirdVision® in Form eines Anhängers entwickelt werden.

Hierfür wurden folgende Eigenschaften definiert:

- Autarke, möglichst ökologische Energieversorgung ohne hohen Versorgungsaufwand
- Mobile Datenversorgung
- Anhänger mit normalem PKW fahrbar
- Möglichst kurze Rüstzeiten
- Vollständige Ausstattung im Anhänger verstaubar
- Schutz der Systeme vor Vibration und Schock während des Transportes

Als Fahrzeugbasis wurde ein Tandemanhänger mit Kofferaufbau ausgewählt. Dieser verfügt über genügend umbauten Raum für die Aufnahme der Energieversorgung, des Bildverarbeitungsservers, eines Mastes mit Kamerakopf, einen Arbeitsplatz sowie weiteren Hilfsmaterialien. Ebenfalls ist der Stauraum für den Transport des Kamerakopfes ausreichend. Der Tandemanhänger wurde in mehrere Baugruppen unterteilt und abgetrennte Innenbereiche für die Energieversorgung, den Server und Ausrüstungsgegenstände geschaffen.

Da das freistehende Monitoringsystem nicht ohne einen entsprechenden Hochleistungsbildverarbeitungsserver einsatzfähig wäre, wurde für den Anhänger ein Server angeschafft und verbaut.

Bei der autarken Energieversorgung konnte zu Beginn der geförderten Weiterentwicklung nur begrenzt auf am Markt verfügbare Inselsysteme zurückgegriffen werden. Anforderungserfüllende Komplettsysteme waren nicht auszumachen. Daher wurde die Energieversorgung selbst projiziert, eingekauft, montiert und in Betrieb genommen.

Da das freistehende Monitoringsystem überwiegend im Sommer und tagsüber eingesetzt wird, kann auf Solarenergie zurückgegriffen werden. Daher wurde ein mobiles Solarsystem mit sechs Photovoltaikmodulen entworfen, welches im Transportzustand an die Seiten des Kastenaufbaus des



Anhängers geklappt werden können. Das Solarsystem versorgt über einen zentralen Wechselrichter den Fahrzeugaufbau. Ebenfalls kann bei einem Überschuss ein Batteriesystem aus Blei-Säure-Batterien beladen und über den Solarwechselrichter entladen werden.

Für sonnenschwächere Phasen wird die Energieversorgung zusätzlich mit einem Gasgenerator ergänzt. Gas ist über längere Zeiträume wirtschaftlicher, verfügt über eine längere Laufzeit und ist einfacher auszutauschen. Wasserstoff hat in dem derzeit frühen Technologiestand keine Serienreife für den Anwendungsfall von BirdVision®.

Gesteuert wird das Energieversorgungssystem und der Energiefluss über eine Siemens Logo Steuerung.

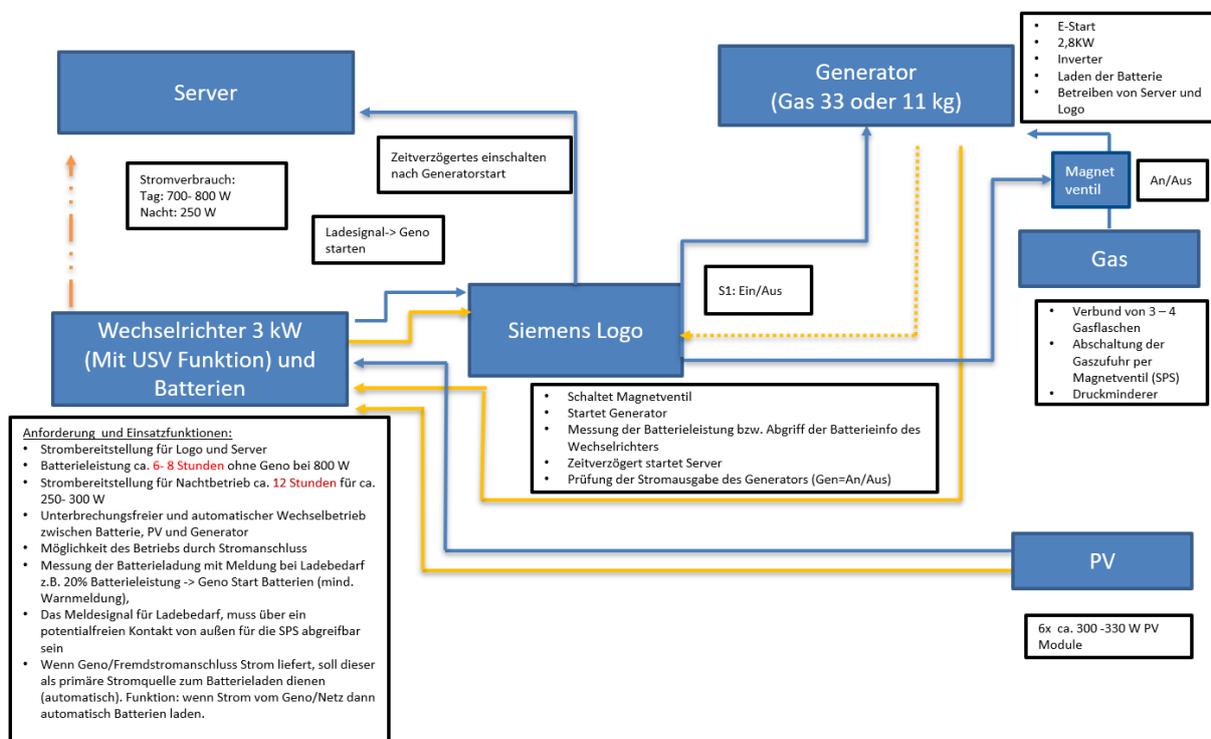


Abbildung 43: Schemaplan Energieversorgung  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Datenversorgung erfolgt über ein LTE-Router, welcher direkt mit einem Switch im BirdVision®-System verbunden ist. Zur Empfangsverstärkung befindet sich auf dem Dach eine LTE-Antenne sowie eine zusätzliche LTE-Richtfunkantenne die bei schlechten Empfangsverhältnissen ausgerichtet werden kann.

Im Zuge der Entwicklung des freistehenden Monitoringsystems wurde ein eigenes Schutzgehäuse und Kamerastereomontagesystem entwickelt und von einem regionalen Metallverarbeiter produziert. Die innerhalb des Arbeitspaketes 4 dahingehend durchgeführte Entwicklung kann darüber hinaus aufgrund der nun vorhandenen Flexibilität künftig als Standardkamerasysteme von BirdVision® kostensparend verwendet werden.

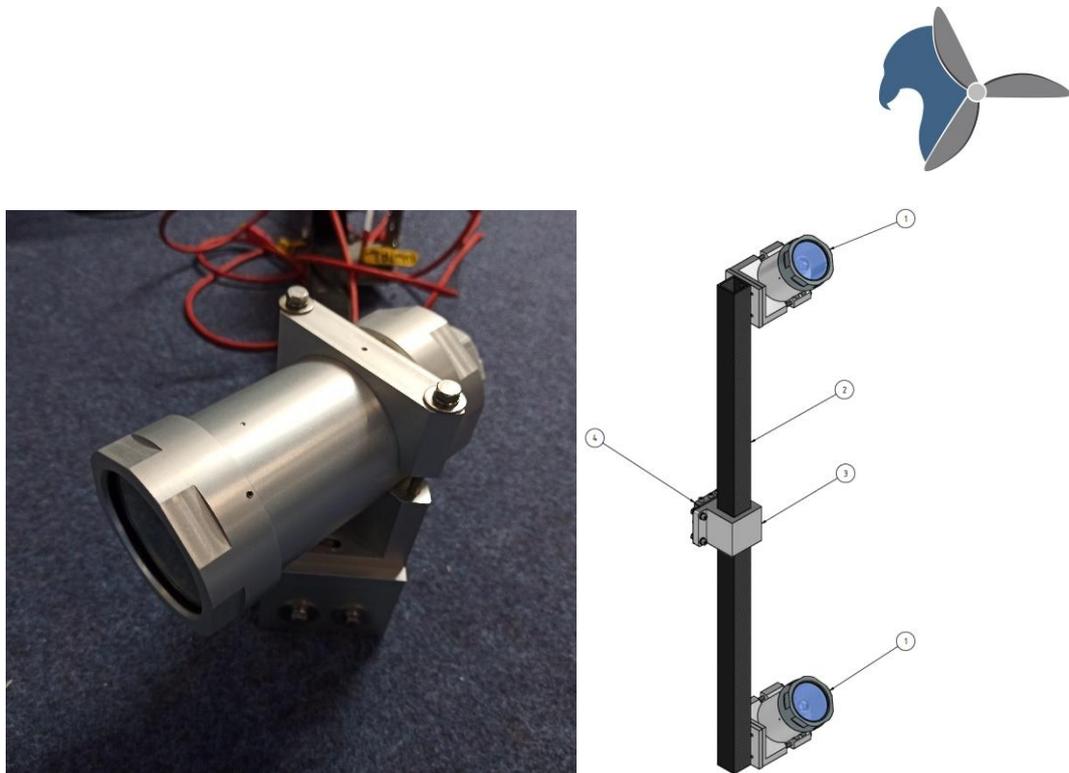


Abbildung 44: Einzelnes Kameraschutzgehäuse (links) und Konstruktionszeichnung Stereokonfiguration (rechts)  
Quelle: Eigene Darstellung

Das Kameraschutzgehäuse besteht aus mehreren gefrästen Aluminiumbauteilen. Hauptbestandteil ist ein Aluminiumrohr mit beidseitigen Schraubgewinden. Kamera und Objektiv werden mittels „Mountingbauteil“ im Inneren des Rohrs befestigt. Einseitig wird ein Glas mit umläufigen Wasserdichtungen zum Abschluss eingebaut. Am Kabelausgang befindet sich eine Kabelverschraubung, durch welche die Verkabelung aus dem Gehäuse wasserdicht ausgeführt wird. Das Kameraschutzgehäuse wird von einer Winkelverstelleinheit gehalten, mit welcher ein variabler vertikaler Winkel der Kamera zur Windenergieanlage / Stereokonfiguration eingestellt werden kann.

In der Stereokonfiguration werden zwei Kameraschutzgehäuse auf ein Vierkantrrohr aus Carbon im Abstand von rund 1,0 m montiert. Carbon verfügt über eine geringe Wärmeausdehnung bei einem sehr niedrigen Gewicht. Gleichzeitig ist dieses Material aber sehr kostenintensiv. Mittig wird die Stereokonfiguration mittels Schnellbefestigung („Schwalbenschwanz“) an der Mastkonstruktion des freistehenden Monitoringsystems befestigt. Bei der Montage direkt an einer Windenergieanlage, wird die Stereokonfiguration starr am Turm der Windenergieanlage mittels Magneten (Stahlrohrturm) oder Verklebung (Betonturm) befestigt.

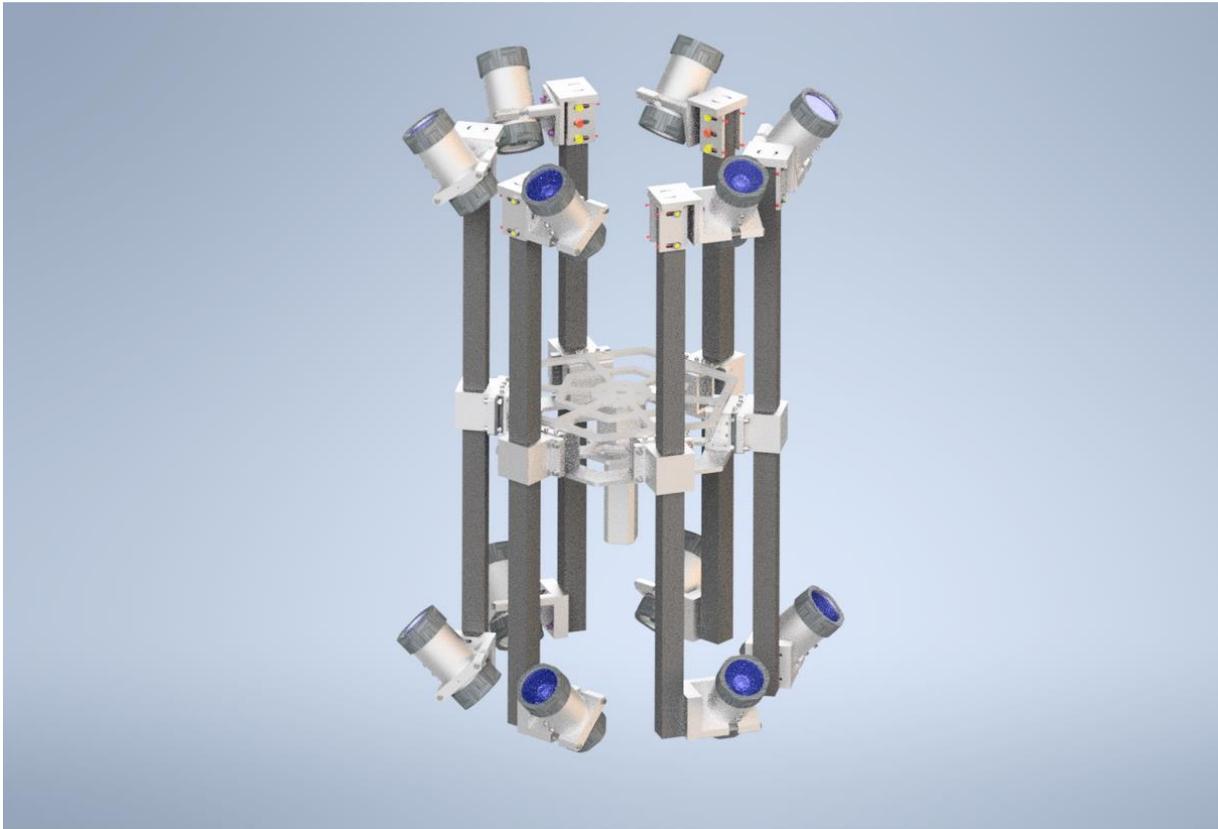


Abbildung 45: Stereokamerasystem freistehendes Monitoringsystem  
Quelle: Eigene Darstellung

Das Stereokamerasystem wiederum wird mit einem kurbelbaren Teleskopmast bis in eine Höhe von 10 m gehoben und auf dieser Position fixiert. Neben der statischen Belastung des Teleskopmastes auf den Fahrzeugaufbau war insbesondere die Kabelführung eine Herausforderung. Hierfür wurde ein kostenintensives Kettensystem als Sonderanfertigung erworben, welches am Mastfuß befestigt ist. Bei einem Hub des Mastes gleitet das Kettensystem mit Kabeln parallel zur Auszugshöhe des Mastes mit und verharrt in der jeweiligen Position. Beim Zusammenbau faltet sich das Kettensystem in seinen Verstauration.

Zu Beginn der Entwicklung wurde ein Stereokamerasystem aus der Basisversion von BirdVision® eingesetzt. Während des Winters 2021 / 2022 wurde das im Arbeitspaket 2 der geförderten Weiterentwicklung entwickelte Kamerasystem mit einer Reichweite von rund 500 m nachgerüstet.

Im Winter 2021 / 2022 hat sich im Dauerbetrieb eine statische Schwachstelle gezeigt. Der Mastkopf kreist mit größeren Ausschlägen um die eigene Achse. Die Bewegung ließ sich bis in das Fahrwerk des Anhängers rückverfolgen. Die seitlichen Standfüße verfügten sowohl über eine zu geringe Lastaufnahme noch haben sie das Fahrwerk des Anhängers vollständig angehoben. Daher wurde ein deutlich leistungsfähigeres Standfußsystem nachentwickelt, welche das Fahrwerk vollständig anhebt und somit keine Schwingungen im Mastkopf mehr ermöglicht.

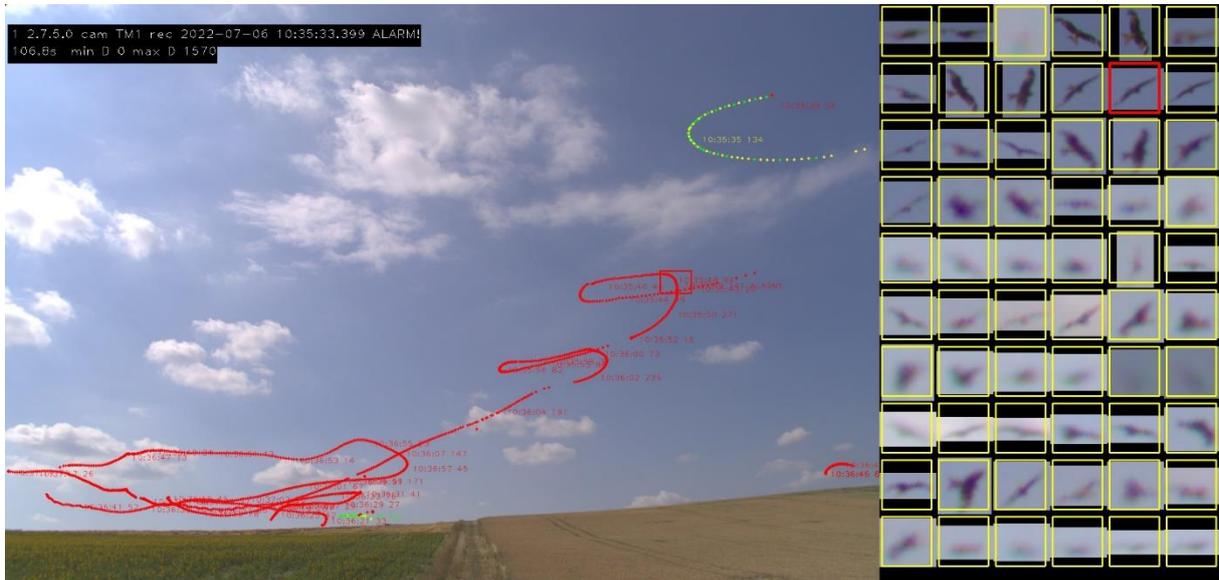


Abbildung 46: Aufnahme eines Rotmilans durch das freistehende Monitoringssystem am Standort Erweiterung Windpark Dörrenzimmern  
Quelle: Eigene Darstellung

Durch die Entwicklung des freistehenden Monitoring- und Schutzsystem steht der Prototyp einer autarken „Vogeldetektionseinheit“ zur Verfügung. Auch wenn nach Abschluss der geförderten Weiterentwicklung ein noch großes Optimierungspotenzial bei diesem komplexen System besteht, kann auf diesen Erfahrungen aufgebaut werden und Einsatzfälle projiziert werden. Auf Anregung der ansässigen unteren Naturschutzbehörde wurde bereits ein Erprobungseinsatz zur Ergänzung der manuellen, menschlichen Aufnahme der artenschutzfachlichen Bestandssituation bei einem Windenergieprojekt der Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH durchgeführt.

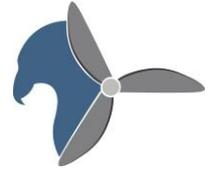


Abbildung 47: Freistehendes Monitoringsystem im fahrbereiten Zustand  
Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 48: Freistehendes Monitoringsystem im aufgebauten Betriebszustand  
Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 49: Freistehendes Monitoringsystem Innenansicht I  
Quelle: Eigene Darstellung

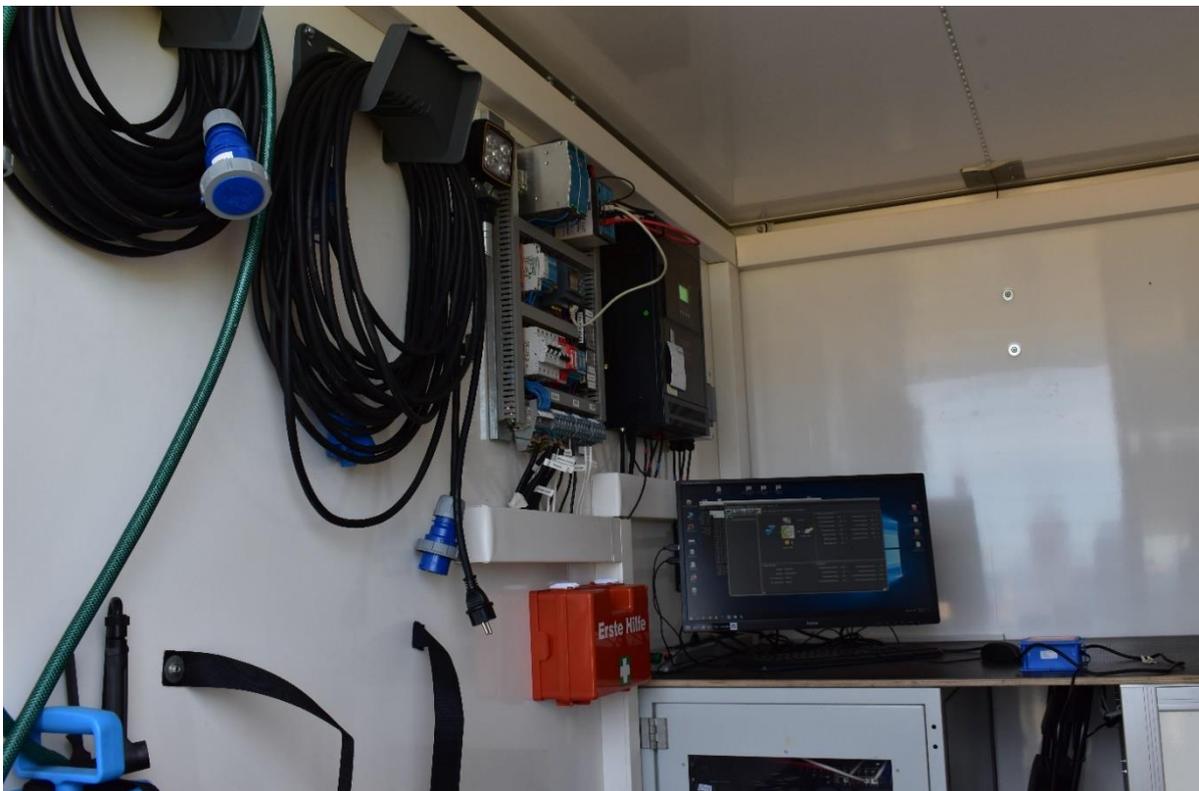


Abbildung 50: Freistehendes Monitoringsystem Innenansicht II  
Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 51: Freistehendes Monitoringsystem unabhängige Energieversorgung mit Generator  
Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 52: Freistehendes Monitoringsystem unabhängige Energieversorgung Gasvorrat  
Quelle: Eigene Darstellung



## II.1.5 Arbeitspaket 5 - Detektion von nächtlichen fliegenden Tieren wie Zugvögel und Fledermäuse

Neben tagfliegenden Tieren besteht auch für nächtlich fliegende Tiere ein Kollisionsrisiko an Windenergieanlagen. Dies ist zum gegenwärtigen Stand insbesondere bei Fledermäusen bekannt. In der Vergangenheit wurden hier bereits Studien durchgeführt, um das Kollisionsrisiko zu ermitteln und Vermeidungsmaßnahmen (Fledermausabschaltalgorithmus) zu entwerfen. Dabei wurde der Schwerpunkt insbesondere auf akustische Detektoren gelegt (akustisches Fledermausgondelmonitoring). Bildgebende Verfahren wurden dabei bislang nur in kleinen Versuchsstadien angewandt.

Die Basisversion von BirdVision® wird bislang nur tagsüber bei Lichteinstrahlung eingesetzt. Der Hochleistungsbildverarbeitungsserver könnte jedoch rund um die Uhr genutzt werden und der Leerlauf der teuren Bildverarbeitungshardware vermieden werden. Gleichzeitig können die in der Basisversion von BirdVision® entwickelten Bildverarbeitungstechnologien für die Nachtzeit adaptiert werden. Daher sollen in der geförderten Weiterentwicklung Grundlagen für die bildgebende Detektion von nächtlich fliegenden Tieren entwickelt und deren Einsatzmöglichkeiten bestimmt werden.

Für die bildgebende Darstellung von wärmeabstrahlenden Tieren bei Dunkelheit kommen insbesondere Wärmebildkameras in Frage. Hierfür hat ein Dienstleister eine Marktsondierung des Wärmebildmarktes durchgeführt. Relevant waren neben preislichen Argumenten auch Schnittstellen zur seither bei BirdVision® verwendeten Bildverarbeitungshardware.

Im Frühjahr 2020 wurden erste Feldversuche mit einer Wärmebildkamera mit einem Sensor von 640 x 480 Px im Windpark Weißbach manuell durchgeführt. Dabei konnten erste wesentliche Erkenntnisse zu den Eigenschaften der Technologie ermittelt werden.

Neben Tests der Sichtbarkeit von erwärmten Objekten wurden in einer Nacht erfolgreich Aufnahmen von fliegenden Tieren gewonnen.

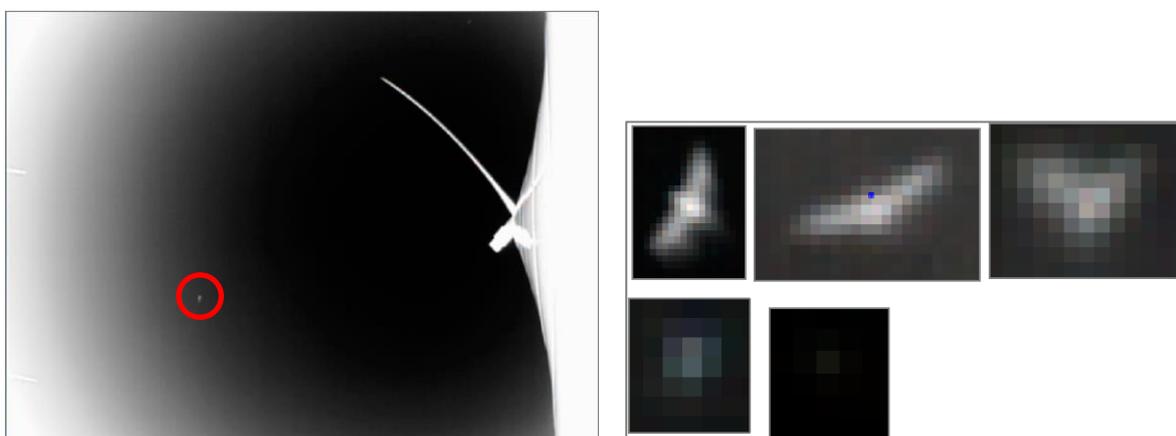


Abbildung 53: Manuelle Aufnahme einer Fledermaus an einer Windenergieanlage  
Quelle: Eigene Darstellung



Erfreulicherweise haben sich Fledermäuse direkt sehr deutlich in der Wärmebildkamera abgezeichnet. Es ist ein klarer Kontrast des wärmeabstrahlenden Tieres gegenüber dem Hintergrund (hier wolkenloser Himmel) erkennbar. Je nach Entfernung des Tieres zur Kamera lassen sich analog zu tagfliegenden Tieren Körper und Flügel erkennen. Eine Sichtbarkeit im Wärmebild ist bei einer Größe von rund 2 bis 3 Px Breite gegeben.

Allerdings zeigte sich auch, dass mit der Wärmebildkamera auch manuelle Aufnahmen von Flugzeugen und Insekten gewonnen wurden. Bei einer kleineren Darstellung des Objektes sind für den menschlichen Betrachter kaum Unterschiede zu Fledermäusen zu erkennen. Daher werden auch Fehlalarme bei der Entwicklung einer BirdVision® Software für nächtlich fliegende Tiere eine Rolle spielen.

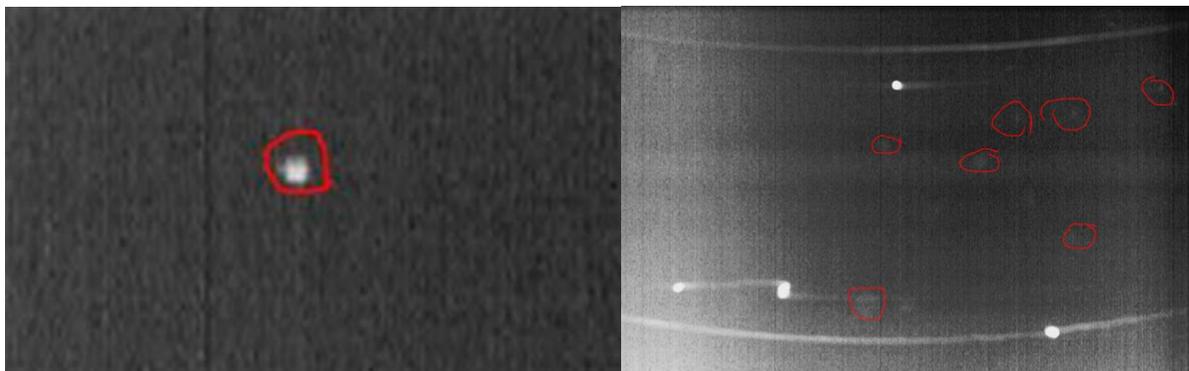


Abbildung 54: links Flugzeug, rechts zahlreiche Insekten (rote Markierung)  
Quelle: Eigene Darstellung

Bei den manuellen Aufnahmen wurde tagsüber zu Testzwecken ein Schwenk mit der Wärmebildkamera auf die Sonne durchgeführt. Leider hat sich danach sofort gezeigt, dass sich die Sonne im Sensor „eingebraunt“ hat und diese Fehler nicht mehr verschwunden sind.

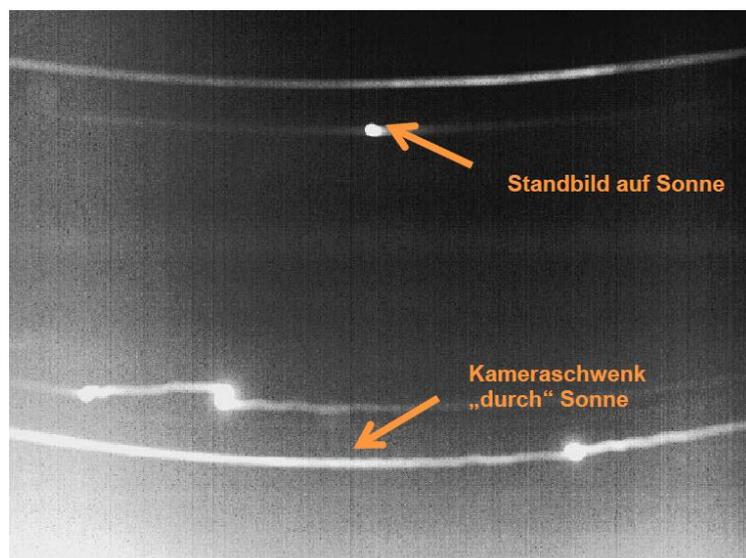


Abbildung 55: Schäden durch direkte Sonneneinstrahlung auf dem Sensor  
Quelle: Eigene Darstellung



Ein Einsatz am Tag scheidet damit aus. Im Nachgang haben Gespräche und Recherchen mit einem Dienstleister ergeben, dass Wärmebildsensoren aus zwei Materialien hergestellt werden können. Zum einen ist dies amorphes Silizium (aSi) und Vanadium-Oxid (VOx). aSi ist dabei sehr empfindlich gegenüber direkter Sonneneinstrahlung, VOx ist deutlich unempfindlicher. Zudem gibt es die Möglichkeit durch einen manuell ansteuerbaren Shutter (Blende) den Sensor tagsüber komplett zu schließen, um Sonneneinstrahlung zu vermeiden.

Die Tests haben gezeigt, dass Aufnahmen von nächtlich fliegenden Tieren mittels Wärmebildkamera möglich sind, es jedoch mit ähnlichen Störeinflüssen wie bei der Detektion von tagfliegenden Vögeln zu rechnen ist.

Nach Tests der Hardware wurde die mögliche Reichweite von Wärmebildkameras in Abhängigkeit von unterschiedlichen Objekten ermittelt. Dies erfolgte zum einen rechnerisch, zum anderen durch Versuche. Für Versuche wurde aus Metall eine „lebensgroße“ Fledermaus gefertigt und darauf die Reichweite im Feld getestet.



Abbildung 56: „Testfledermaus“ im Abstand von 15 m  
Quelle: Eigene Darstellung

Die kleinste zu detektierende Fledermaus (Zwergfledermaus) weist eine Flügelspannweite von 140 mm auf. Diese ist sicher mit einer Pixelgröße von 3 Px bildverarbeitungstechnisch zu detektieren. Je nach Auswahl des Objektivs ergeben sich daraus folgende Erfassungsreichweiten und Öffnungswinkel des Objektivs:



Brennweite	Reichweite Zwergfledermaus	Sichtfeld x	Sichtfeld y
7,5 mm	19,0 m	30,1 m (90,8°)	21,6 m (65,1°)
25 mm	71,0 m	29,6 m (24,2°)	22,5 m (18,4°)
35 mm	101,0 m	29,8 m (16,9°)	22,7 m (12,9°)
50 mm	139,0 m	29,8 m (12,3°)	22,7 m (9,3°)

Tabelle 3: Reichweitenermittlung Wärmebildkamera für unterschiedliche Objektive  
Quelle: Eigene Darstellung

In der obenstehenden Tabelle ergibt sich, dass die Reichweite zur Detektion einer Zwergfledermaus je Brennweite steigt. Je nach Objektivkonfiguration wäre eine Reichweite bis zu 139 m rechnerisch möglich. Jedoch verkleinert sich in Abhängigkeit der Brennweite auch sehr stark das Sichtfeld. Bei einer Reichweite von 139 m, läge der Öffnungswinkel nur bei 12,3° x 9,3°. Die Berechnung ergab, dass eine Detektion von Fledermäusen beispielsweise vom Boden aus mit einer Abdeckung des vollständigen Rotorbereiches bis zu einer Gesamthöhe von 200 m aufgrund der deutlich geringeren Reichweite nicht möglich ist. Ebenfalls würde bei diesem Szenario nur ein Bruchteil des Rotors mit einem Durchmesser von 126 m abgedeckt werden. Eine Montage der Wärmebildkameras, wie beim BirdVision®-System am Turmfuß, ist daher nicht möglich.

In Folge dessen, wurde die Idee entwickelt, die Wärmebildkameras auf dem Maschinenhaus der Windenergieanlage zu montieren und von dieser Stelle aus den Rotorbereich zu überwachen. Mit einer Brennweite von 25 mm und einer damit verbundenen Reichweite von 71,0 m wäre der Bereich bis zur Rotorspitze (63,0 m) überwachbar. Allerdings wäre auch hier der Öffnungswinkel mit 24,2° x 18,4° relativ klein. Mit einer einzelnen Kamera ließe sich so nicht der vollständige Rotorbereich, sondern nur ein Ausschnitt überwachen.

Dennoch sollten in der geförderten Weiterentwicklung Tests mit unterschiedlichen Brennweiten auf dem Maschinenhaus durchgeführt werden. Insgesamt wurden so fünf Wärmebildkameras mit unterschiedlichen Objektiven beschafft, Gehäuse und Gläser (aufgrund der Durchlässigkeit von Wärmestrahlung sind diese aus Germanium) sowie eine Befestigung und Montagemöglichkeit auf dem Maschinenhaus projektiert. Ebenfalls wurde eine Glasfaserverbindung vom Maschinenhaus zum Bildverarbeitungsserver im Turmfuß verlegt.

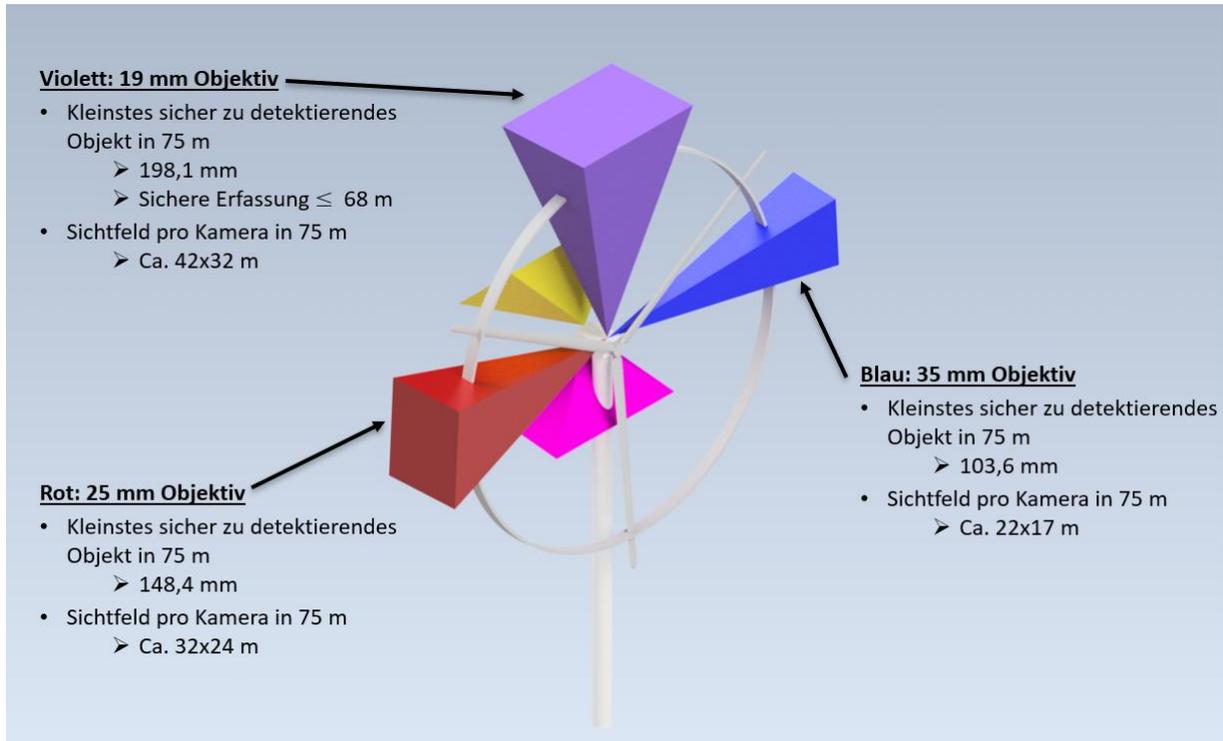
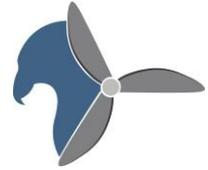


Abbildung 57: Montageskizze von fünf Wärmebildkamarasystemen auf dem Maschinenhaus  
Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 58: IR-Kameraanordnung auf dem Maschinenhaus im Windpark Weißbach  
Quelle: Eigene Darstellung

Die reichweitenstarken Kameras mit hoher Brennweite wurden dabei auf den Rotorbereich ausgerichtet. Zwei Kameras mit einer Brennweite von 7,5 mm und damit einer kurzen Reichweite wurden in Richtung Boden und Kühler der Windenergieanlage ausgerichtet.



Die Montageskizze zeigt bereits, dass nur mit einer sehr hohen Anzahl von Kameras der vollständige Rotorbereich überwacht werden kann. Im vorliegenden Fall kann daher bereits nur ein Teilbereich / Ausschnitt überwacht werden.

Aufgrund der Erfahrungen und Entwicklung der Tagversion von BirdVision® sollte ebenfalls auf eine softwareseitige Kombination eines Deep-Learning-Netzwerkes mit Tracking gesetzt werden. Hierzu war es zuallererst notwendig, einen ausreichend großen Datenschatz an Fledermausaufnahmen und Störeinflüssen zu generieren. Zur Sammlung des Datenmaterials wurde zuallererst eine sehr einfache Bewegungstrackingsoftware entwickelt. Dabei werden bewegte Bildpunkte (Fledermausflug oder ähnlich) detektiert und eine automatische Aufnahme gestartet. Aufgrund einer fehlenden Unterscheidung von Fledermäusen und Nicht-Fledermäusen entsteht dabei eine hohe Fehlauflösequote. Daher wurden die Aufnahmen vom Personal der Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH täglich gesichtet und manuell klassifiziert.

Für die Entwicklung eines Kamerasystems für nächtlich fliegende Tiere wurde für den Einsatz an einer waldnahen Windenergieanlage ein eigener Hochleistungsbildverarbeitungsserver samt Grafikkarten angeschafft.

### **Verbesserung des Datentrainings**

Nach der Datengewinnung und der Sichtung der Fledermausaufnahmen wurden diese entsprechend klassifiziert. Hierfür ist ein eigens dafür bereitgestelltes Programm notwendig. Die ersten manuellen Aufnahmen, die im Sommer 2020 gewonnen werden konnten, wurden mithilfe einer durch einen Dienstleister bereitgestellten Software (Tagger) verarbeitet.

Aufgrund von Schwachstellen und vielen manuell notwendigen Schritten wurde der Tagging-Prozess optimiert und insbesondere zeitlich beschleunigt. So wurden die gewonnenen Daten bereits voruntersucht und es fiel lediglich eine manuelle Nachbearbeitung an.

Im TagBat sind im Idealfall die Fledermäuse im Bild bereits mit einem farblich hervorgehobenen Rahmen markiert. Hier kann das ausgewählte Objekt mittels einer dafür zugewiesenen Taste auf der Tastatur als Fledermaus klassifiziert werden



Abbildung 59: Tagging Programm "TagBat", hier zum Taggen von Fledermäusen  
Quelle: Eigene Darstellung

Überdeckt der Rahmen die Fledermaus nicht vollständig oder ist der Rahmen an einer anderen Stelle, kann dieser manuell mit der Maus verschoben, beziehungsweise angepasst werden. In jedem Fall muss sich die Fledermaus komplett im Rahmen befinden und darf auch nicht angeschnitten sein. Weiter kann mit der rechten Maustaste der Rahmen entfernt werden, falls es Fehlmarkierungen gibt. Auch Bilder ohne Fledermaus oder einzelnen Fehlauflösungen müssen ignoriert und somit gelöscht werden.

Besonders wichtig ist, dass auf Bildern auf denen mehrere Fledermäuse sichtbar/erkennbar sind, auch diese markiert werden müssen. Idealerweise sollten nur die Bilder getaggt werden, die über eine gute Qualität verfügen. So ist gewährleistet, dass das Netzwerk besser und schneller lernt und die Fledermäuse vom System später auch erkannt werden. Sollten in einem Bild mehrere Fledermäuse sein, beispielsweise eine sehr gut erkennbare und zwei Fledermäuse von schlechter Qualität, so müssen alle Objekte einen Rahmen erhalten, im Zweifelsfall sollte das Bild aber entfernt werden. In der folgenden Abbildung wird ersichtlich, wie eine Markierung der zu taggenden Spezies aussehen soll.



Abbildung 60: Markierung von zwei Vögeln in TagBird  
Quelle: Eigene Darstellung

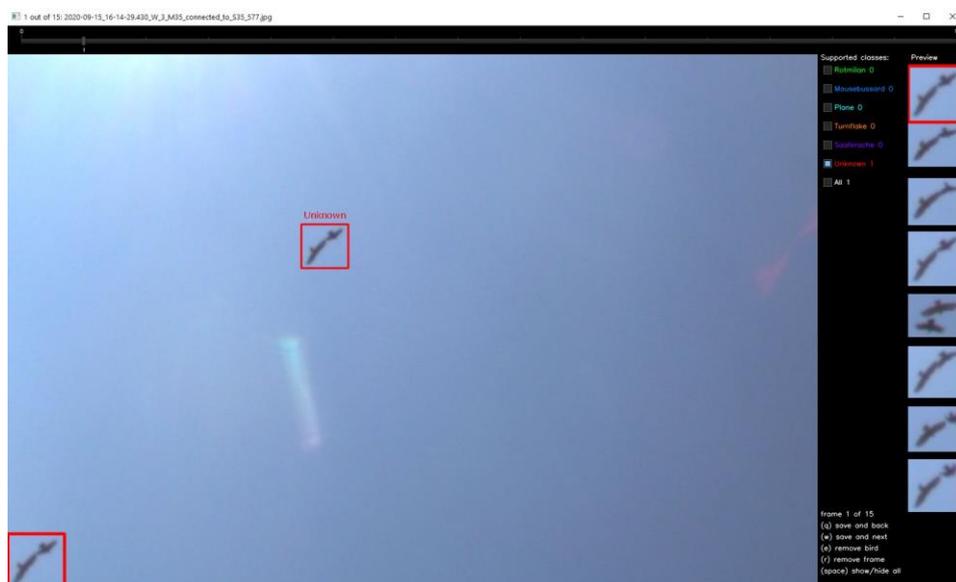


Abbildung 61: Falsche Markierung von zwei Vögeln in TagBird  
Quelle: Eigene Darstellung

Um die benannte Qualität von Fledermausaufnahmen zu verdeutlichen, folgt eine Abbildung eines Fledermausfluges. Die Fledermaus fliegt hier aus einer weiteren Entfernung in Richtung Turm der Windenergieanlage. Rechts im Bild werden kleine Beispielbilder dieser Fledermaus angezeigt. Die Fledermaus verfügt in einer weiteren Entfernung über eine schlechtere Qualität, erkennbar in der obersten Zeile der Bilder. Als gute Qualität können hier die unteren beiden Reihen Fledermausbilder eingestuft werden.

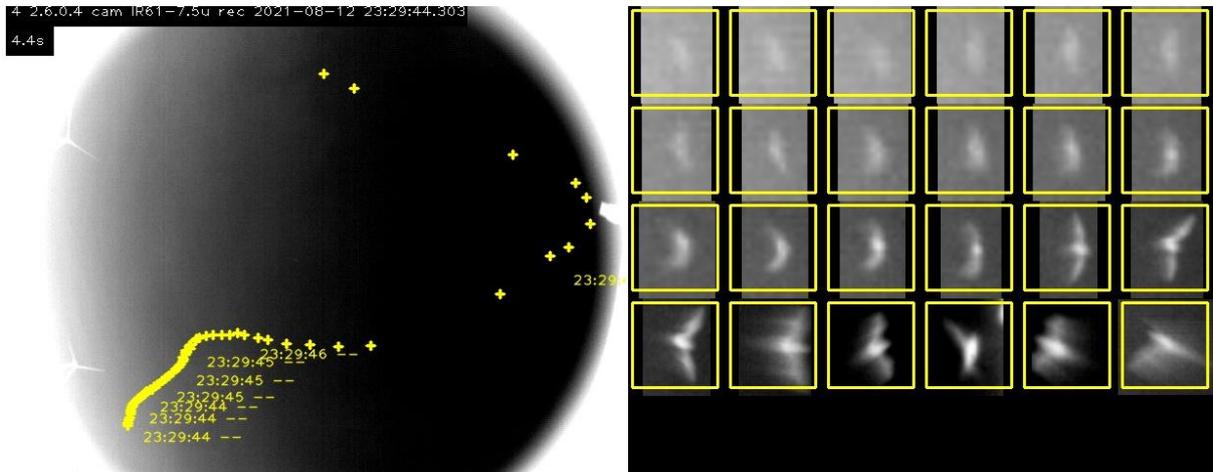


Abbildung 62: Verschiedene Qualitäten von Fledermausaufnahmen  
Quelle: Eigene Darstellung

Die mithilfe der Tagging-Software generierten Daten wurden verwendet, um daraufhin ein Deep-Learning-Netzwerk zu „trainieren“. Ebenfalls wurden manuell aufgenommene Videos von Fledermäusen als Grundlage genutzt, ein Bewegungstracking zu entwickeln und einzustellen. Nach Ende des Programmierprozesses stand eine erste nutzbare Software, welche auf das System aufgespielt und getestet wurde. Dabei konnten bereits sehr sehenswerte Aufnahmen von Fledermäusen aber auch noch von Fehlauflösungen generiert werden:



Abbildung 63: Fledermausaufnahme gegen bewölkten Hintergrund (links) und oberhalb des Kühlers (rechts)  
Quelle: Eigene Darstellung



Abbildung 64: Fledermausaufnahme gegen den Boden (links) und Fehlauflöser an der Rotorblattspitze (rechts)  
Quelle: Eigene Darstellung

Zusätzlich wurde eine Kamera als Referenzkamera am Turmfuß installiert. Während der Fledermausperiode 2021 wurden mit dieser ersten Softwareversion Erfahrungen gesammelt und diese bei größeren Abweichungen nachjustiert. Ende des Jahres lag damit eine gut nutzbare Softwareversion vor.

Aufbauend auf die gesammelten Erfahrungen aus dem Sommer 2021 und den damit einhergehenden Tests bezüglich der verschiedenen bereits beschriebenen Kameraausrichtungen, sowie der bisherigen Entwicklung, sollte das Kamerasystem über einen kompletten Monat geprüft und untersucht werden. Um Referenzwerte zu den Aufnahmen des Kamerasystems zu schaffen, wurde im Frühjahr 2022 das Gondelmonitoringsystem Batcorder in der Windenergieanlage eingebaut, auf deren Gondel auch die IR-Kameras installiert sind. Allerdings ist eine Vergleichbarkeit der beiden Systeme nur bedingt gegeben, da der Ort, an dem die Kameras angebracht sind von dem Ort wo der Batcorder installiert ist etwas weiter entfernt ist. Für den Vergleich der beiden Detektionssysteme wurde der Monat August 2022 gewählt, da es sich um einen der Hauptflugmonate der Fledermäuse handelt.



Abbildung 65: Installierte Kameras auf der Gondel der Windenergieanlage  
Quelle: Eigene Darstellung



Verwendet wurden die Aufnahmedaten der auf der Gondel installierten Kameras. Die Kamera, die am Turm in wenigen Metern Höhe in Richtung Rotorbereich installiert ist, wurde für diese Untersuchung nicht betrachtet, da sie für den Vergleich mit dem Gondelmonitoring irrelevant ist. Mittels einer Sichtung des Video- und Bildmaterials wurden in der Folge alle Fehlauflösungen herausgefiltert. Allerdings war bereits im Sommer 2021 erkennbar, dass die unten am Turm montierte Kamera im selben Zeitraum deutlich mehr Fledermäuse aufnimmt, als die Kameras, die auf der Gondel der Windenergieanlage angebracht sind. Außerdem waren bei der Häufigkeit der Aufnahmen unten am Turm Unterschiede zu beobachten. In den Nächten waren teilweise unterschiedlich hohe Fledermausaktivitäten zu verzeichnen. Da an der Ausrichtung der Rotorblätter erkennbar ist, wie der Wind steht, könnte ein Zusammenhang zwischen Flugaktivität der Fledermäuse und dem Windschatten, der durch den Turm gegeben ist, vorliegen. Befindet sich die Kamera nachts im Windschatten des Turmes, ist es möglich, dass dann vermehrt Fledermäuse fliegen. Anders zeigt sich dies, wenn die Kamera sich nicht im Windschatten befindet.

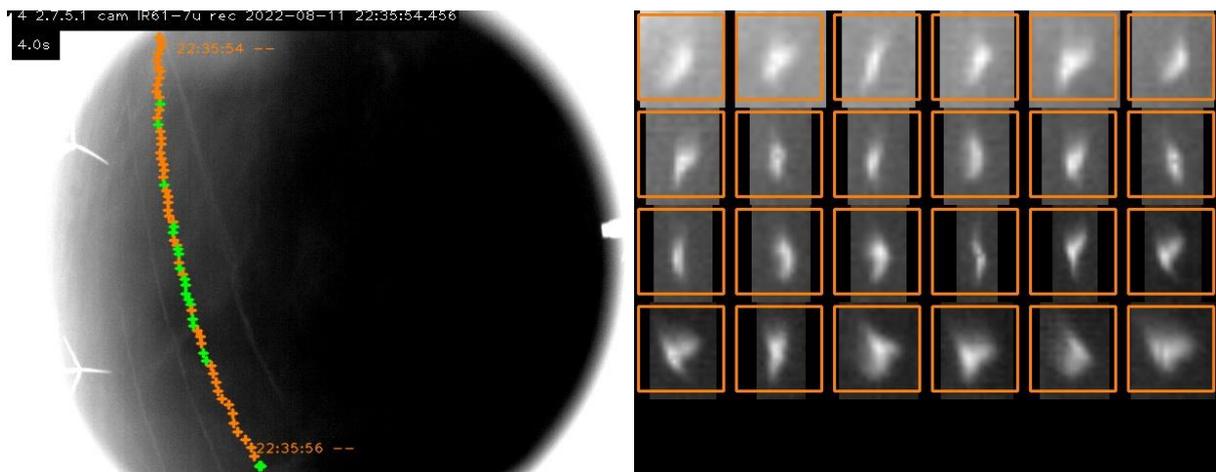
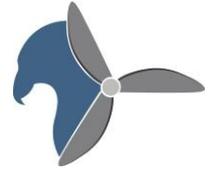


Abbildung 66: IR-Kamera unten im Windschatten des Turmes der Windenergieanlage  
Quelle: Eigene Darstellung

Im Arbeitspaket 5 wurde erfolgreich eine Technologie entwickelt, die eine bildgebende Detektion von nächtlich fliegenden Tieren an Windenergieanlagen ermöglicht. Ein Schwerpunkt wurde dabei auf Fledermäuse gelegt. Aufgrund der wirtschaftlich am Markt verfügbaren Technologien ergibt sich nur eine geringe Erfassungsreichweite bei kleinen Öffnungswinkeln. Daher ist nur eine Montage des Kamerasystems auf dem Maschinenhaus möglich, um den Rotorbereich zu überwachen. Zur Kostenreduktion können sinnvollerweise auch nur Ausschnittsbereiche des Rotors betrachtet werden. Eine Abschaltung in Echtzeit erscheint daher nicht umsetzbar.

Jedoch bietet die Technologie umfangreiche Möglichkeiten zur (noch deutlich zu geringen) Grundlagenforschung zum Verhalten nächtlich fliegender Tiere an Windenergieanlagen. Bestehende Abschaltalgorithmen könnten in der Praxis überprüft und optimiert werden. Hierfür könnte beispielsweise eine definierte Anzahl Windenergieanlagen in Deutschland mit einem Wärmebildkamerasystem ausgestattet und sowohl mit als auch ohne Abschaltalgorithmus überwacht



werden sowie Schlagopfer bestimmt werden. Auch bietet die Technologie die Möglichkeit, beispielsweise akustische Fledermausvergrämungssysteme zu beurteilen. Wir schlagen daher vor, Forschungsprojekte in diesem Bereich zu initiieren.



## II.1.6 Arbeitspaket 6 - Prozessoptimierung der Verarbeitungshardware

Im Arbeitspaket 6 sollen neuartige Bildverarbeitungstechnologien und Bildverarbeitungshardware für den Einsatz in BirdVision® geprüft und getestet werden. Hierfür wurden mehrere Technologien ausgewählt, deren Funktionsweise und Anwendungsfähigkeit bzw. abgeschlossener Implementierung in BirdVision® werden im Folgenden dargestellt.

### **Synchronisierte Bildaufnahme**

Damit man eine sinnvolle Entfernungsmessung von den Flugobjekten bestimmen kann, müssen die Bilder der Messung exakt zeitgleich aufgenommen werden. Wenn auch nur ein paar Millisekunden zwischen den Bildern vergehen würden, so würde der Vogel an einer anderen Position im zweiten Bild abgebildet werden und die Entfernung würde nicht mehr stimmen.

Für die Bestimmung der dreidimensionalen Position ist es jedoch zwangsläufig notwendig, dass alle Setups gleichzeitig die Bilder aufnehmen. Beim externen Trigger gibt es einen zentralen Taktgeber, der an alle Kameras ein elektrisches Signal sendet und dadurch die Bildaufnahme aller Kameras startet. Als Taktgeber wurde ein kleiner Mikrocontroller verwendet, der von innerhalb der Anlage ein Signal an alle Kameras sendet.

### **Rolling- vs. Global-Shutter**

Wie bereits im Arbeitspaket 2 erwähnt wurde der Sensortyp von einem Rolling-Shutter zu einem Global-Shutter gewechselt. Der Global-Shutter belichtet alle Sensorzellen gleichzeitig, während der Rolling-Shutter die Zeilen der Sensorzellen zu unterschiedlichen Zeiten belichtet. Durch diesen Versatz ist es möglich die ersten Sensorzellen bereits während der Bildaufnahme auszulesen.

Allerdings verursacht dieser zeitliche Versatz den sog. Rolling-Shutter-Effekt. Er lässt bewegte Objekte in Richtung derer Bewegung verzerrt wirken. Am besten erkennt man diesen Effekt an Bildern wie in den nachfolgenden Abbildungen:



Abbildung 67: Rolling-Shutter-Effekt an Rotoren

Quelle: Pblog Gassets unter <https://pblogassets.s3.amazonaws.com/uploads/2015/04/Rolling-Shutter-Featured-Image.jpg>  
(letzter Zugriff am 27.10.2022)

In den Anfängen der digitalen Bildverarbeitung wurde diese Technologie entwickelt, da dadurch eine höhere Bildrate erreicht werden konnte. Heute ist dies jedoch nicht mehr notwendig, da die verarbeitende Elektronik hinter dem Sensor so schnell geworden ist, dass das Nadelöhr zur Datenübertragung wechselt. Diese Technik ist immer noch am weitesten verbreitet, entwickelt sich aber wieder zurück zum Global-Shutter.

Der zeitliche Versatz der Zeilen macht sich auch in den Stereomessungen bemerkbar. Gerade bei direkt auf die Anlage zufliegende Objekte zeigte sich dieser Effekt, da hier die vertikale Änderung im Bild am höchsten ist. Durch den Wechsel zu dem anderen Sensortyp hat sich die Anzahl der Fehlmessungen deutlich reduziert.

### **Weitere noch nicht ausgereifte Optimierungen**

Wie bereits im Abschnitt über die Shutter-Typen ist das Nadelöhr inzwischen die Übertragung zwischen Kamera und Rechenmaschine. Bei der Auswahl des neuen Kameramodells wurde sich insbesondere mit diesem Sachverhalt auseinandergesetzt.

Es gibt besondere USB-Kabel, die einen integrierten Medienwandler zu LWL besitzen. Damit ist es möglich das USB-Signal, das normalerweise nur wenige Zentimeter weit reicht auf mehrere hundert Meter zu verlängern. Die Datenbreite bei USB ist inzwischen wesentlich höher als bei Ethernet. Allerdings gilt LWL sehr empfindlich was Bewegungen und Biegeradien angeht. Bei Stahltürmen, die keine Kabeldurchführung von innen nach außen haben ist die Verwendung von LWL Kabeln nicht möglich, da die Kabel hier durch die Türe geführt werden müssen und damit Bewegung ausgesetzt sind.



Eine andere Möglichkeit das Problem mit der Bandbreite zwischen Kamera und Rechner in den Griff zu bekommen ist die verschickte Datenmenge selbst zu reduzieren.

Ein Kamerahersteller bietet eine integrierte Komprimierung der Daten auf Seiten der Kamera an, die später am Rechner wieder entpackt werden. Es entsteht somit ein Trade-Off zwischen Rechenleistung und Datenmenge. Die zusätzliche Last am Rechner könnte dazu führen, dass BirdVision zusätzlich einen Priorisierungsalgorithmus benötigt, der bei Lastspitzen entscheidet, welche Aufgaben wichtiger sind. Bei diesem Kamerahersteller sind zudem die Lieferzeiten und Preise der Kameras wesentlich höher.

Diese möglichen Optimierungen sind aber entweder nicht realisierbar oder im Vergleich zu anderen Maßnahmen weniger effektiv. Daher wurde beschlossen diese vorerst nicht weiter zu verfolgen.

Im Arbeitspaket 6 wurden neuartige Technologien und Entwicklung der Bildverarbeitung für die geförderte Weiterentwicklung von BirdVision® aufgegriffen und an BirdVision® teilweise umgesetzt. Damit lassen sich bessere Verarbeitungs- und Übertragungsleistungen realisieren. Weitere neuartige Technologien wurden bewertet. Diese sind teilweise jedoch entweder noch nicht ausreichend marktreif verfügbar oder aufgrund mehrerer Faktoren aktuell für BirdVision® nicht anwendbar.



## Quellenverzeichnis

**Aumüller R,** Hill K, Hill R (2013). *Offshore-Windenergieanlagen: Mögliche Auswirkungen auf den Vogelzug*. Der Falke 60: S. 62-65.

**Behr, O.,** Brinkmann, R., Niermann, I., Korner-Nievergelt, F. (2011). *Akustische Erfassung der Fledermausaktivität an Windenergieanlagen*. In: Behr, O., Brinkmann, R., Niermann, I. und Reich, M. (Hrsg.): Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. Umwelt und Raum Bd. 4, 1. Auflage, Cuvillier Verlag, Göttingen.

**Behr, O.,** Brinkmann, R., Korner-Nievergelt, F., Nagy, M., Niermann, I., Reich, M., Simon, R. (Hrsg.) (2015). *Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. (RENEBAT II). - Umwelt und Raum Bd. 7*, Institut für Umweltplanung, Hannover.

**Behr, O.,** Brinkmann, R., Hochradel, K., Mages, J., Korner-Nievergelt, F., Reinhard, H., Simon, R., Stiller, F., Weber, N., Nagy, M., (2018). *Bestimmung des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen in der Planungspraxis - Endbericht des Forschungsvorhabens gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 0327638E)*.

**KNE** (2018): *Synopse der technischen Ansätze zur Vermeidung von potenziellen Auswirkungen auf Vögel und Fledermäuse durch die Windenergienutzung*, unter: <https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/2018/02/KNE-Synopse-Technische-Vermeidungsmaßnahmen-02-2018.pdf> (letzter Zugriff: 19.01.2023).

**KNE** (2022). *Individuen- und Populationsschutz beim Ausbau der Windenergie an Land – Eine Einführung in die Thematik*, unter: [https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/KNE\\_Individuen-und\\_Populationsschutz\\_beim\\_Ausbau\\_der\\_Windenergie.pdf](https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/KNE_Individuen-und_Populationsschutz_beim_Ausbau_der_Windenergie.pdf) (letzter Zugriff: 19.01.2023).

**Stark, H.** (2018, 14. Februar). *Studien zu technischen Systemen aus einer schweizerischen Perspektive*. Schweizerische Vogelwarte Sempach, unter: [https://www.klimaschutz-hannover.de/typo3temp/secure\\_downloads/2516/0/5cf13b15efbe479d66c11464d3a8f1fe11dcc68e/180214\\_6\\_Herbert\\_Stark\\_Studien\\_zu\\_technischen\\_Systemen\\_schweizerische\\_Perspektive.pdf](https://www.klimaschutz-hannover.de/typo3temp/secure_downloads/2516/0/5cf13b15efbe479d66c11464d3a8f1fe11dcc68e/180214_6_Herbert_Stark_Studien_zu_technischen_Systemen_schweizerische_Perspektive.pdf) (letzter Zugriff: 19.01.2023).

**Tkacz, A. und Mehrgott, H.** (2022). *Auswertung des Monitorings für eine kamerabasierte Abschaltung von Windenergieanlagen mit BirdVision® im Jahr 2022*.