



Analyse der Leistungsfähigkeit von FlexiBird
Ein Erkennungssystem für Bewirtschaftung rund um
Windenergieanlagen

Prof. Dr. Stefan Geißelsöder, Fynn Madrian, Robin Korn
stefan.geisselsoeder@hs-ansbach.de

12. Juni 2025

Kurzzusammenfassung:

Das System FlexiBird ist ein teilautomatisiertes Erkennungssystem für Bewirtschaftung rund um Windenergieanlagen, das fest installierte Kamerasysteme nutzt. Das Bildmaterial wird vor Ort automatisch mit Hilfe von KI-Algorithmen analysiert. Potenziell abschaltungsrelevante Bewirtschaftungen werden an die Betreiber der Windkraftanlagen gemeldet, um eine genehmigungskonforme Abschaltung der Windkraftanlagen zur Sicherstellung des Artenschutzes zu ermöglichen. Über alle Tests hinweg hat das System eine mittlere Erkennungsrate von 99.995% (für Bewirtschaftungen länger als 6 Minuten, Berechnung über Einzelaufnahmen). In der Summe der drei dedizierten Tests wurde jedes Bewirtschaftungsereignis mit einer Dauer ab 6 Minuten erkannt.

Im Einzelnen wurden zur Ermittlung der Erkennungsrate für Bewirtschaftungsereignisse vier verschiedene Auswertungen auf vier unterschiedlichen Datensets durchgeführt. Die Analyse von 10751 Bildern von 22 Kameras hat für einzelne Bilder eine Erkennungsrate von 96.3% und eine Falsch-Positiv-Rate von 0.55% ergeben. Für Bewirtschaftungsereignisse einer Dauer von über 6 Minuten entspricht dies, unter Annahme statistischer Unabhängigkeit der Bildfolge, einer Erkennungsgenauigkeit von 99.995%. Das System hat in einem längeren analysierten Zeitraum eine Verfügbarkeit von 99.5%. Die Lokalisation in einer manuell ausgewerteten Stichprobe von 137 Bildern war bei allen detektierten Landmaschinen im Sinne einer feldstücksbezogenen Abschaltung korrekt. Zwei Landmaschinen hatten eine etwas ungenaue Lokalisation. In einer zusätzlichen unabhängigen Auswertung von 62 individuell beobachteten Bewirtschaftungsereignissen wurde jedes einzelne betrachtete Bewirtschaftungsereignis korrekt erkannt, was einer Erkennungsrate von 100% entspricht. Im einem weiteren Datenset wurde zu einer anderen Jahreszeit ausgewertet und wieder die gleiche generelle Erkennungsleistung festgestellt, wobei ein sehr kurzes Ereignis nicht gemeldet wurde. Eine zusätzliche Analyse mit Bildern von Kameras, deren Inbetriebnahme erst nach dem Training des KI-Systems stattfand, wertet die Übertragbarkeit auf neue Windparks aus. Auch dabei wurde für 21 Bewirtschaftungsereignisse eine Erkennungsrate von 100% festgestellt.

Die Konsistenz der Erkennungsleistung über alle Tests hinweg spricht für die Generalisierbarkeit der Ergebnisse. Die Auswertungen beinhalten überwachte Entfernungen von bis zu 300 Metern.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 4 |
| 1.1 | Beschreibung des Einsatzzwecks | 4 |
| 1.2 | Beschreibung des Systems FlexiBird | 5 |
| 2 | Überprüfungsziele und Datenbasis | 7 |
| 2.1 | Aufgabenstellung | 7 |
| 2.2 | Datenquelle und -auswahl | 7 |
| 2.3 | Datenverfügbarkeit | 7 |
| 3 | Statistische Auswertung auf Ebene individueller Bilder | 7 |
| 3.1 | Genauigkeit der Einzelbildererkennung | 8 |
| 3.2 | Genauigkeit der Lokalisation | 10 |
| 3.3 | Detektion pro Zeitintervall | 13 |
| 4 | Statistische Auswertung pro Bewirtschaftungsereignis | 13 |
| 4.1 | Unterschied zur Auswertung von Einzelbildern | 13 |
| 4.2 | Genauigkeit der Bewirtschaftungserkennung | 13 |
| 5 | Stabilität beim Einsatz in neuen Windparks | 16 |
| 6 | Stabilität zu verschiedenen Jahreszeiten | 17 |
| 7 | Weitere Herausforderungen | 18 |
| 7.1 | Entfernung | 18 |
| 7.2 | Nachtbetrieb | 19 |
| 8 | Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse | 20 |

1 Einleitung

1.1 Beschreibung des Einsatzzwecks

Gezielte Abschaltungen von Windenergieanlagen (WEA) haben verschiedene ökologische, rechtliche und wirtschaftliche Gründe. Ein Hauptmotiv ist der Schutz von Vögeln, die durch Kollisionen mit den Rotorblättern gefährdet sind. Besonders in Gebieten mit hohem Vogelaufkommen, wie Brutgebieten, Jagdgebieten oder Zugrouten, kann das Risiko von Kollisionen erhöht sein. Gezielte Anlagenstopps helfen, dieses Risiko zu minimieren, indem die Rotoren bei Gefahrensituationen automatisch gestoppt oder gebremst werden. Auf diese Weise wird das Risiko von Vogeltötungen reduziert und gefährdete Tierarten werden geschützt. Es gibt im Wesentlichen drei Möglichkeiten, Anlagenstopps umzusetzen:

1. Dauerhafte Abschaltung der Anlagen in den relevanten Zeiträumen (z.B. tagsüber von März bis August)
2. Gezielte Abschaltungen bei landwirtschaftlichen Aktivitäten auf Feldern rund um die WEA
3. Vogelerkennungssysteme zur Abschaltung der Anlagen wenn Vögel in den Nahbereich der WEA gelangen



Abbildung 1: Die Systeme schützen insbesondere jagende Greifvögel. Symbolbild von [1]

Neben dem ökologischen Aspekt spielt auch der rechtliche Rahmen eine entscheidende Rolle. Das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) sowie entsprechende Landesvorgaben verlangen, dass bei Windkraftprojekten potenziell erhöhte Tötungsrisiken für Vögel erkannt und minimiert werden. Passende zeitliche oder gezielte Abschaltungen stellen eine effektive Maßnahme dar, um diesen Anforderungen gerecht zu werden und so rechtliche Unsicherheiten beim Betrieb von WEA zu vermeiden. Darüber hinaus sind sie oft eine Voraussetzung für den Erhalt von Genehmigungen, da sie eine proaktive Lösung zur Reduzierung der Gefahren für die Tierwelt bieten.

Ein großer Vorteil der gezielten Abschaltung bei Bewirtschaftungsereignissen ist die Möglichkeit, die Effizienz der WEA zu maximieren. Unnötige oder unnötig lange Abschaltungen der Windräder, die aufgrund von Vogelsichtungen oder aufgrund dauerhafter Auflagen erforderlich sein könnten, werden durch präzise Stopps vermieden. So wird die Energieproduktion nicht über längere Zeiträume eingeschränkt, was sowohl ökologisch als auch wirtschaftlich von Vorteil ist. Die technologischen Fortschritte in der Bewirtschaftungserkennung machen den Einsatz der Bewirtschaftungsabschaltung zunehmend effizienter und zuverlässiger, was sie für Betreiber attraktiver macht.

Sehr wichtig für Betreiber ist dabei die Rechtssicherheit. Durch den Einsatz einer automatisierten Bewirtschaftungserkennung können die Betreiber nachweisen, dass sie alle erforderlichen Maßnahmen getroffen haben, um die Auswirkungen ihrer Anlagen auf die Vogelwelt zu minimieren. Dies verringert die Gefahr späterer Haftungsansprüche und von Konflikten bezüglich Naturschutzauflagen beispielsweise bei Kontrollen durch Behörden. Der Nachweis der Wirksamkeit der Systeme wird durch unabhängige Tests ermöglicht, die die Genauigkeit der Erkennung verifizieren können und so Genehmigungsprozesse erleichtern.

Insgesamt trägt ein Bewirtschaftungserkennungssystem zusammen mit der Bewirtschaftungsabschaltung dazu bei, die klimafreundliche Energieerzeugung auszubauen, ohne Vögel in ihrem natürlichen Lebensraum zu gefährden und erfüllt dabei sowohl ökologische, ökonomische als auch rechtliche Anforderungen. Eine detailliertere Erklärung verschiedener Zusammenhänge sowie der Anforderungen an entsprechende Systeme findet sich beispielsweise in [2].

1.2 Beschreibung des Systems FlexiBird

Das System FlexiBird wurde von der Fleximaus GmbH entwickelt, um den Schutz von Greifvögeln in Windparks wirkungsvoll, automatisiert und gesetzeskonform umzusetzen. Eine der Hauptmotivationen hinter dem System ist §45b des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG), der seit Februar 2023 vorschreibt, dass Windenergieanlagen (WEA) bei bestimmten landwirtschaftlichen Ereignissen gestoppt oder in ihrer Leistung reduziert werden müssen, um Vögel vor der Gefahr durch Rotorblätter zu schützen. Insbesondere nach landwirtschaftlichen Maßnahmen wie Mahd, Pflügen oder Ernten suchen Greifvögel in der Nähe der bearbeiteten Felder nach Nahrung. Dadurch steigt das Risiko von Kollisionen nach einer solchen Bewirtschaftung kurzzeitig.

Das System überwacht landwirtschaftlich genutzte Flächen rund um Windenergieanlagen mit hochauflösenden Kameras, die in der Regel in 80 - 120 Metern Höhe am Turm montiert werden. Die aufgenommenen Bilder werden direkt vor Ort durch eine KI-gestützte Software analysiert. Die Zielsetzung ist dabei die automatisierte Erkennung von Traktoren und die Zuordnung zur jeweiligen Bewirtschaftungsmaßnahme in einem Umkreis von bis zu 500 Metern (Erkennung) bzw. 300 Metern (Zuordnung) [3]. Diese Erkennung erlaubt bei genehmigungsrelevanten Bewirtschaftungen eine zeitnahe Reaktion und die betroffenen Windräder können gestoppt werden.

Ein besonderes Merkmal des FlexiBird-Systems ist der hohe Datenschutzstandard. Es werden ausschließlich Fotos und keine Videos erstellt, öffentliche Bereiche werden verpixelt oder geschwärzt, und eine Identifizierung von Personen oder Fahrzeugen ist nicht möglich. Die Datenverarbeitung erfolgt lokal und ressourcenschonend ohne Notwendigkeit einer Cloudanbindung. Nur abstrahierte Informationen werden an zentrale Server in Deutschland übertragen. Die Erkennung der Landmaschinen erfolgt durch ein Neuronales

Netz. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für das Ergebnis einer solchen Erkennung.



Abbildung 2: Sicht von FlexiBird um ein Windrad. Bereiche, die aufgrund zu großer Entfernung oder aus Datenschutzgründen nicht überwacht werden sollen, werden automatisch unkenntlich gemacht. Ereignisse in diesen Bereichen werden bereits vor Ort vom Computersystem ignoriert. In diesem Beispiel wurde die bewirtschaftende Landmaschine korrekt erkannt und lokalisiert. Die Lokalisation wird durch das grüne Rechteck angezeigt. Abschaltungsrelevante Ergebnisse werden an ein zentrales Webportal weitergegeben.

Der Betrieb des Systems kann in verschiedenen Automatisierungsgraden erfolgen: vom manuellen Modus, bei dem die technische Betriebsführung (TBF) nach Meldung durch FlexiBird die Abschaltung veranlasst, über teilautonome Prozesse mit vorheriger Sichtprüfung, bis hin zum vollständig autonomen Betrieb mit automatischer Abschaltung durch die sogenannte „Greenbox“, eine Kommunikationsschnittstelle zwischen System und Windenergieanlage. Optional kann dieser autonome Betrieb zusätzlich überwacht werden, sodass Fehlalarme erkannt und gestoppte Anlagen gegebenenfalls wieder in Betrieb genommen werden können. Dabei wird die benötigte Dokumentation erstellt.

Die Systemfunktionalität wird kontinuierlich überwacht. Bei Ausfällen einzelner Komponenten, wie Kameras oder der Software, erfolgt eine automatische Benachrichtigung an die Fleximaus GmbH, damit zeitnah Maßnahmen ergriffen werden. Ein weiterer Baustein ist das Kundenportal my.fleximaus.de, über das Betreiber und Betriebsführer Zugriff auf Ereignisdokumentationen, Bilder und Protokolle erhalten und Entscheidungen zur Abschaltung nachvollziehbar treffen können.

FlexiBird ist unabhängig vom Hersteller der Windenergieanlage einsetzbar und stellt sicher, dass die behördlich geforderten Schutzmaßnahmen für Vögel automatisch und effizient eingehalten werden können. Die Fleximaus GmbH plant weitere Entwicklungen wie die verbesserte Erkennung nächtlicher Aktivitäten. Weiterführende Informationen finden sich unter [3] und [4].

2 Überprüfungsziele und Datenbasis

2.1 Aufgabenstellung

Um die tatsächlich erreichte Leistungsfähigkeit des Systems FlexiBird unter realen Bedingungen zu überprüfen, wurden Bildaufnahmen und Bewirtschaftungen von Windparks ausgewertet, die bereits mit dem System ausgestattet sind. Dabei sind die zentralen Fragen, wie sicher das System Bewirtschaftungen erkennt, wie genau das System die Bewirtschaftungen lokalisiert, wie viele Fehlalarme im Betrieb auftreten und wie stabil die Leistungsfähigkeit bei unterschiedlichen Bedingungen ist. Diese Aspekte werden in den folgenden Kapiteln beschrieben und ausgewertet. Die trivialste Strategie zur Auswertung der Leistungsfähigkeit der Bewirtschaftungserkennung wäre eine manuelle Strichliste vor Ort. Da es so aber ungebührlich lange dauern würde, die benötigte Datenmenge zu sammeln, die für eine verlässliche Analyse benötigt werden würde, werden hier mehrere andere Strategien verfolgt.

2.2 Datenquelle und -auswahl

In Kooperation mit den Betreibern der Windparks, der Firma Fleximaus und dem Team, welches das System FlexiBird zuletzt weiterentwickelt hat, wurden, unter Beachtung der DSGVO, Bildaufnahmen und Bewirtschaftungsinformationen von verschiedenen Windparks übermittelt. Aus dem Zeitraum zwischen dem 26. August 2024 und dem 1. September 2024 wurden insgesamt 10751 Bilder von 22 Kameras ausgewertet. Der bekannte und beabsichtigte Bias bei der Datenselektion ist, dass immer Zeitbereiche rund um Bewirtschaftungsereignisse ausgewählt wurden, um eine möglichst große Anzahl an relevanten Ereignissen auswerten zu können. Die ausgewerteten Zeitbereiche ohne Bewirtschaftung liegen meist vor oder nach den Bewirtschaftungen. Es wurde auf eine in etwa ausgewogene Verteilung der Bilder geachtet, sodass nicht alle verfügbaren Zeiträume ohne aktive Bewirtschaftung inkludiert wurden.

2.3 Datenverfügbarkeit

Laut technischer Beschreibung soll das System alle 2 Minuten ein Bild pro Kamera auswerten. Übereinstimmend mit dieser Erwartung ist der kürzeste beobachtete Abstand zwischen zwei Folgebildern 1 Minute und 59 Sekunden. Nahezu alle aufeinanderfolgenden Bilder haben einen zeitlichen Abstand kleiner 2 Minuten und 2 Sekunden. Der längste Abstand zwischen Folgebildern betrug 6 Minuten und 1 Sekunde, wobei hier eine temporäre Störung der Netzwerkverbindung, beispielsweise durch einen Routerneustart des angebundenen Windparks, als Ursache angenommen werden kann. Die Anzahl der tatsächlich erhaltenen Bilder entspricht einer Verfügbarkeit von 99.5%.

3 Statistische Auswertung auf Ebene individueller Bilder

Die folgenden Ergebnisse beziehen sich auf die einzelne Auswertung der Gesamtmenge von 10751 gespeicherten und manuell überprüften Bilder. Tabelle 1 zeigt die Aufteilung der Bilder. Fahrzeuge können hier Traktoren, Autos oder ähnliche Fahrzeuge sein. Eine statistische Unabhängigkeit von Folgebildern kann nicht immer angenommen werden.

Tabelle 1: Aufteilung der ausgewerteten Bilder.

| | |
|--|-------|
| Bilder insgesamt | 10751 |
| Bilder mit Fahrzeug | 6419 |
| Davon Traktoren | 4288 |
| Traktor außerhalb des überwachten Bereichs | 3612 |
| Traktor auf relevanten Feldern | 676 |
| Bilder ohne Fahrzeug | 4332 |

3.1 Genauigkeit der Einzelbilderkennung

Bei der Bewirtschaftungserkennung wird unterschieden, ob auf einem Kamerabild zu einem gegebenen Zeitpunkt eine Bewirtschaftung durch eine Landmaschine erkennbar ist oder nicht. Weiterhin wird ausgewertet, ob die Landmaschinen sich momentan auf einem für die Abschaltung einer bestimmten Windanlage relevanten Feldstück befinden oder einem zu weit entfernten Feldstück bzw. einem nicht zu überwachenden Weg. Diese Art der Auswertung stellt den tatsächlich auftretenden Anwendungsfall aus Sicht des KI-Systems dar. Abschaltungen sollen nur ausgelöst werden können, wenn die Landmaschine auf den relevanten Feldstücken erkannt wird. In Tabelle 2 ist die Aufteilung der Bilder dargestellt, die analysiert wurden. Dabei stellen die Zeilen dar, ob eine Bewirtschaftung tatsächlich auf dem Bild und im relevanten Bereich stattfindet oder nicht. Die Spalten unterscheiden, ob eine solche Bewirtschaftungssituation erkannt wurde oder nicht. Die 24 falsch erkannten Bilder setzen sich zusammen aus 10 Bildern, auf denen ein Auto als Landmaschine erkannt wurde und 14 Bildern, auf denen eine Landmaschine ohne erkennbaren Auslöser erkannt wurde.

Tabelle 2: Erkennungsergebnisse auf Bilddaten.

| | Bewirtschaftung erkannt | Kein Ereignis erkannt |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Bewirtschaftung vorhanden | 651 | 25 |
| Kein Ereignis | 24 | 4308 |

Zu erkennen ist, dass das System auf den untersuchten Daten eine Genauigkeit von 99% erreicht. Die Genauigkeit ist in diesem Kontext berechnet als

$$\begin{aligned}
 \text{Genauigkeit} &= \frac{\text{Anzahl der richtig erkannten Bilder}}{\text{Gesamtanzahl der Bilder}} \\
 &= \frac{651 + 4308}{651 + 25 + 24 + 4308} \approx 99.02\%
 \end{aligned} \tag{1}$$

Besonders relevante Kennzahlen für eine solche Erkennungsaufgabe sind die Sensitivität und die Spezifität. Die Sensitivität, auch True Positive Rate, beschreibt, wie viele der tatsächlich stattfindenden Bewirtschaftungen auch erkannt werden. Sie ist in diesem

Kontext berechnet als

$$\begin{aligned} \text{Sensitivität} &= \frac{\text{Anzahl der richtig erkannten Bewirtschaftungen}}{\text{Gesamtanzahl der Bilder mit Bewirtschaftung}} \\ &= \frac{651}{651 + 25} \approx 96.3\% \end{aligned} \tag{2}$$

Die Spezifität, auch True Negative Rate, beschreibt, wie viele der Bilder, auf denen keine Bewirtschaftung stattfindet, richtig zugeordnet werden. Sie ist in diesem Kontext berechnet als

$$\begin{aligned} \text{Spezifität} &= \frac{\text{Anzahl der richtig erkannten Bilder ohne Bewirtschaftung}}{\text{Gesamtanzahl der Bilder ohne Bewirtschaftung}} \\ &= \frac{4308}{24 + 4308} \approx 99.45\% \end{aligned} \tag{3}$$

Eine weitere wichtige Kennzahl ist die sogenannte False Positive Rate. Diese beschreibt, wie viele der Bilder, die keine Bewirtschaftung zeigen, fälschlicherweise als Bewirtschaftung erkannt werden. Sie ist definiert als $1.0 - \text{Spezifität}$, würde hier berechnet als $\frac{24}{24+4308}$ und beträgt demnach $\approx 0.55\%$.

Zusätzlich zu den oben genannten Kennzahlen ist die sogenannte Reinheit der erkannten Bewirtschaftungen von Bedeutung. Die Reinheit beschreibt, wie viele der vermeintlich erkannten Bewirtschaftungen auch tatsächlich stattfindende Bewirtschaftungen zeigen. Diese Größe ist aber abhängig davon, wie viele Bilder mit und ohne Bewirtschaftung ausgewertet werden. Um diese Rechnung durchzuführen wird der Anteil der Bilder mit Bewirtschaftung während der Saison abgeschätzt durch 25 Stunden Bewirtschaftung pro Monat im Sichtbereich einer Kamera. Dementsprechend wären 25 von 720 Stunden je Monat Bewirtschaftungen und 695 Stunden ohne Bewirtschaftung. Nichtbewirtschaftung wäre dementsprechend ca. 27.8 mal wahrscheinlicher als eine Bewirtschaftung. Die Zahlen in Tabelle 2 würden sich entsprechend verändern zu Tabelle 3.

Tabelle 3: Hochgerechnete Erkennungsergebnisse.

| | Bewirtschaftung erkannt | Kein Ereignis erkannt |
|------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Bewirtschaftung findet statt | 651 | 25 |
| Kein Ereignis | 104 | 18689 |

Unter diesen Annahmen berechnet sich die Reinheit als

$$\begin{aligned} \text{Reinheit} &= \frac{\text{Anzahl der richtig erkannten Bewirtschaftungen}}{\text{Anzahl als Bewirtschaftung erkannten Bilder}} \\ &= \frac{651}{651 + 104} \approx 86.23\% \end{aligned} \tag{4}$$

Das bedeutet, dass in diesem theoretischen Szenario 86.23% der Bilder, die im System als potenziell bewirtschaftet erkannt werden, auch tatsächlich eine relevante Bewirtschaftung zeigen. Die False Positive Rate bleibt weiterhin bei den real beobachteten 0.55%.

3.2 Genauigkeit der Lokalisation

Die Bewirtschaftungslokalisation beschreibt, wie genau die Bewirtschaftungen auf dem Bild lokalisiert werden. Eine hohe Lokalisationsgenauigkeit ist notwendig, damit keine Fehlabschaltungen provoziert werden, wenn Landmaschinen auf einem Weg oder einem weit entfernten oder nicht zu überwachendem Feld erkannt werden, aber der Ort der Erkennung in ein relevantes Feldstück hinein reicht. Es ist wichtig zu betonen, dass eine Fehllokalisierung nicht automatisch zu einer Fehldetektion führt. Ein Beispiel für eine unproblematische Fehllokalisierung wäre eine Landmaschine, die auf einem Feld erkannt wird, aber die Bounding Box, also die Rechteckumrandung der Landmaschine, ist zu groß und reicht bis auf ein anderes Feld oder einen Weg.

Die quantitative Auswertung dieser Eigenschaft auf Einzelbildern wird dadurch erschwert, dass keine sogenannte *Ground Truth*, also eine pixelgenaue Annotation der Landmaschinen vorliegt. Für das diskutierte Einsatzszenario wird die Lokalisation aber nicht pixelgenau, sondern im korrekten Bereich bzw. Feldstück benötigt. Aus diesem Grund wird hier eine manuelle Kontrolle von 137 Bildern durchgeführt, die aus der Auswertung von Kapitel 6 stammen. Einzeln berücksichtigt werden dabei die Bilder, auf denen eine Bewirtschaftung erkannt wurde und die visuell klar von vorherigen Bildern unterscheidbar sind. Die Beurteilung der Lokalisationsgenauigkeit erfolgt dann durch einen menschlichen Beobachter, der die Bilder auf die Lokalisationsgenauigkeit hin bewertet. Das Kriterium bezieht sich auf die Bounding Boxen, also die KI-generierten Rechtecke, die die Landmaschinen einrahmen sollen, ohne signifikant darüber hinauszuragen. Die Bounding Boxen der detektierten Landmaschinen können quasi exakt, zu klein, zu groß oder falsch sein. Klein wäre unproblematisch, da eine Abschaltung immer dem richtigen Feld zugeordnet werden kann. Groß könnte zu Fehlauflösungen führen, wenn die Bounding Box eine Landmaschine umrahmt, die sich nicht auf einem relevanten Feldstück befindet, aber bis dort hineinragend erkannt wird. Falsch würde hier bedeuten, dass keine Landmaschine zu sehen ist oder die gefundene Bounding Box eine zu sehende Landmaschine nicht umrahmt. Eine potenziell nicht detektierte zweite Landmaschine zählt hingegen nicht als Lokalisationsfehler. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Zusätzlich zu den Ergebnissen in Tabelle

Tabelle 4: Lokalisationsgenauigkeit der Bewirtschaftungserkennung.

| Einordnung | Anzahl Bilder |
|---------------------------------|---------------|
| Summe | 137 |
| Exakt | 135 |
| Klein | 0 |
| Groß | 2 |
| Falsch | 0 |
| Anteil exakter Lokalisationen | 98.54% |
| Anteil korrekter Lokalisationen | 100% |

4 kann festgestellt werden, dass die zu großen Bounding Boxen in keinem Bild Auswirkung auf die Zuordnung hatten und daher 100% der beurteilten Lokalisationen korrekt im Sinne der Abschaltungsrelevanz sind.



Abbildung 3: Gleiche Bewirtschaftung wie in Abbildung 2. Das Fahrzeug ist auch unter erschwerten Bedingungen korrekt lokalisiert.



Abbildung 4: Eine zu große Bounding Box um die Landmaschine.



Abbildung 5: Zoom auf den Traktor mit zu großer Bounding Box. Die gepressten und gestapelten Ballen in Abbildung 4 werden von der KI vermutlich als Teil eines möglichen Anhängers gesehen.



Abbildung 6: Traktor im gleichen Szenario korrekt erkannt und lokalisiert. Die Ballen sind nicht auf einem Anhänger und werden mit Entfernung zum Traktor nicht falsch erkannt.

3.3 Detektion pro Zeitintervall

Die Auswertung in Kapitel 3 bezieht sich auf die Auswertung der Bilddaten in Windparks. In realen Anwendungen sind aber nicht nur einzelne Bilder relevant, sondern auch die Zeitintervalle, in denen eine Bewirtschaftung stattfindet. Für die Abschaltung einer Windkraftanlage ist es vor allem wichtig, dass eine Bewirtschaftung innerhalb eines realistischen Zeitintervalls erkannt wird. Dieses Zeitintervall wird für diese Auswertung mit 6 Minuten angenommen. Das bedeutet, dass eine Bewirtschaftung innerhalb von 6 ± 2 Minuten, oder drei aufeinander folgenden Bildern, erkannt werden muss. Unter der Annahme, dass die Bewirtschaftungserkennung auf den Bildern statistisch unabhängig voneinander ist, kann die Wahrscheinlichkeit, dass eine Bewirtschaftung innerhalb eines Zeitintervalls erkannt wird, aus der Wahrscheinlichkeit, dass eine Bewirtschaftung auf einem Bild erkannt wird, abgeleitet werden. Die Wahrscheinlichkeit einer solchen Erkennung auf einem Einzelbild war durch die Sensitivität in Kapitel 3 zu 96.3% bestimmt worden. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Bewirtschaftung innerhalb eines Zeitintervalls erkannt wird, berechnet sich entsprechend Gleichung 5.

$$\begin{aligned} \text{Wahrscheinlichkeit 6 Min.} &= 1 - (1 - \text{Sensitivität})^n = 1 - (1 - 0.963)^3 \\ &= 1 - 0.037^3 \approx 99.9949\% \end{aligned} \quad (5)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Bewirtschaftung innerhalb von sechs Minuten erkannt wird, berechnet sich über die Wahrscheinlichkeit des Nicht-Erkennens pro Bild. Mit den getroffenen Annahmen ist dementsprechend die Wahrscheinlichkeit, dass eine Bewirtschaftung auf drei aufeinander folgenden Bildern nicht erkannt wird, ca. $p = 0.00005065$. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Bewirtschaftung innerhalb von sechs Minuten erkannt wird, wird durch diese Auswertung also auf 99.9949% abgeschätzt.

4 Statistische Auswertung pro Bewirtschaftungsereignis

4.1 Unterschied zur Auswertung von Einzelbildern

Die Auswertung in Kapitel 3 beurteilt die Leistungsfähigkeit des Systems FlexiBird auf Basis von Einzelbildern. Da die Bewirtschaftungen aber in der Regel über mehrere Bilder hinweg zu sehen sind, ist es ebenfalls sinnvoll, die Auswertung auch auf die Anzahl der erfolgten Bewirtschaftungen selbst zu beziehen. Diese Art der Auswertung entspricht der Wahrnehmung eines Beobachters vor Ort, der Strichlisten führt, welche tatsächlich stattfindende Bewirtschaftung erkannt wird und welche nicht erkannt wird. Dieser Auswertung liegen Bilder zugrunde, die zwischen dem 26. August 2024 und dem 1. September 2024 aufgenommen wurden. In diesem Zeitraum wurden 62 Bewirtschaftungsereignisse verteilt über 601 relevante Bilder im Blickfeld von 16 Kameras beobachtet.

Jedes Bewirtschaftungsereignis wurde also in der Regel über mehrere Bilder hinweg beobachtet, mit Schwankungen zwischen einem einzigen Bild bis hin zu 28 Bildern pro Bewirtschaftung.

4.2 Genauigkeit der Bewirtschaftungserkennung

Die Liste der Bewirtschaftungsereignisse ist in den Tabellen 5 und 6 dargestellt. Die Tabellen zeigen die Ergebnisse der manuellen Auswertung der Bewirtschaftungsbilder. Die

Tabelle 5: Beobachtete Bewirtschaftungsereignisse.

| Bewirtschaftung | Erkannt | Erkannt % | Gesamtzahl Bilder |
|--------------------|---------|-----------|-------------------|
| 394-O 7:19 | 13 | 100.00 % | 13 |
| 394-O 8:21 | 28 | 100.00 % | 28 |
| 394-O 9:22 | 22 | 100.00 % | 22 |
| 394-W 27.8 7:13 | 6 | 100.00 % | 6 |
| 394-W 27.8 8:25 | 18 | 100.00 % | 18 |
| 394-W 27.8 9:27 | 7 | 100.00 % | 7 |
| 395-W 30.8 11:59 | 5 | 100.00 % | 5 |
| 395-W 30.8 15:17 | 14 | 93.33 % | 15 |
| 438-NW 26.08 12:01 | 2 | 100.00 % | 2 |
| 438-NW 26.08 13:31 | 4 | 100.00 % | 4 |
| 438-SO 27.08 9:01 | 13 | 92.86 % | 14 |
| 438-SO 27.08 10:03 | 2 | 100.00 % | 2 |
| 438-SO 27.08 12:33 | 13 | 100.00 % | 13 |
| 438-SO 27.08 13:37 | 3 | 100.00 % | 3 |
| 439-NW 26.08 14:13 | 3 | 100.00 % | 3 |
| 439-NW 26.08 15:55 | 14 | 100.00 % | 14 |
| 439-NW 26.08 16:57 | 7 | 100.00 % | 7 |
| 439-NW 27.08 15:51 | 15 | 100.00 % | 15 |
| 439-NW 27.08 16:49 | 1 | 100.00 % | 1 |
| 439-NW 27.08 17:55 | 5 | 71.43 % | 7 |
| 439-SO 26.08 14:13 | 3 | 100.00 % | 3 |
| 439-SO 26.08 16:57 | 4 | 100.00 % | 4 |
| 439-SO 27.08 15:45 | 9 | 100.00 % | 9 |
| 439-SO 27.08 17:55 | 5 | 100.00 % | 5 |
| 440-NO 26.08 07:01 | 16 | 100.00 % | 16 |
| 440-NO 28.08 11:35 | 8 | 100.00 % | 8 |
| 440-NO 28.08 12:45 | 9 | 100.00 % | 9 |
| 440-NO 28.08 13:47 | 16 | 100.00 % | 16 |
| 440-NO 28.08 14:49 | 14 | 100.00 % | 14 |
| 440-NO 28.08 15:51 | 4 | 100.00 % | 4 |
| 440-NO 01.09 17:01 | 14 | 100.00 % | 14 |
| 440-NO 01.09 18:25 | 21 | 100.00 % | 21 |
| 440-NO 01.09 19:27 | 22 | 100.00 % | 22 |
| 440-NO 01.09 20:29 | 3 | 100.00 % | 3 |
| 440-SW 26.08 7:21 | 16 | 100.00 % | 16 |
| 440-SW 28.08 11:49 | 13 | 100.00 % | 13 |
| 440-SW 28.08 12:53 | 13 | 100.00 % | 13 |
| 440-SW 28.08 14:01 | 16 | 94.12 % | 17 |
| 440-SW 28.08 15:51 | 2 | 100.00 % | 2 |
| 440-SW 01.09 17:19 | 9 | 100.00 % | 9 |
| 440-SW 01.09 18:21 | 7 | 100.00 % | 7 |
| 440-SW 01.09 20:07 | 4 | 100.00 % | 4 |

Tabelle 6: Fortsetzung von Tabelle 5

| Bewirtschaftung | Erkannt | Erkannt % | Gesamtzahl Bilder |
|--------------------|---------|-----------|-------------------|
| 441-NW 26.08 16:57 | 6 | 85.71 % | 7 |
| 441-NW 26.08 14:27 | 10 | 90.91 % | 11 |
| 442-NO 26.08 16:11 | 1 | 33.33 % | 3 |
| 442-SW 01.09 9:31 | 13 | 100.00 % | 13 |
| 442-SW 01.09 11:07 | 13 | 100.00 % | 13 |
| 442-SW 01.09 16:31 | 6 | 100.00 % | 6 |
| 443-NW 28.08 10:01 | 3 | 100.00 % | 3 |
| 443-NW 28.08 15:23 | 5 | 100.00 % | 5 |
| 443-SO 26.08 6:25 | 3 | 100.00 % | 3 |
| 443-SO 26.08 7:57 | 2 | 66.67 % | 3 |
| 443-SO 28.08 10:01 | 3 | 100.00 % | 3 |
| 443-SO 28.08 15:41 | 3 | 100.00 % | 3 |
| 443-SO 01.09 16:53 | 2 | 100.00 % | 2 |
| 444-NW 28.08 15:19 | 3 | 100.00 % | 3 |
| 444-NW 31.08 8:49 | 17 | 100.00 % | 17 |
| 444-NW 31.08 9:51 | 18 | 94.74 % | 19 |
| 444-NW 31.08 10:53 | 8 | 100.00 % | 8 |
| 444-NW 31.08 12:47 | 6 | 100.00 % | 6 |
| 444-SO 31.08 8:37 | 24 | 100.00 % | 24 |
| 444-SO 31.08 9:41 | 21 | 100.00 % | 21 |

erste Spalte zeigt den Namen der Bewirtschaftungsereignisse, die zweite Spalte die Anzahl der Bilder, in denen diese Bewirtschaftung erkannt wurde. Die dritte Spalte zeigt die Prozentanteile der Bilder, in denen die Bewirtschaftung erkannt wurde. Die vierte Spalte zeigt die Anzahl der zugehörigen Bilder, auf denen die Landmaschinen zu sehen gewesen wären. Wie klar zu erkennen ist, wurde jede einzelne Bewirtschaftung anhand mindestens eines Bildes erkannt. Dies resultiert in einer Sensitivität von 100%.

Um eine Abschätzung des statistischen Fehlers zu ermitteln, wird die Verteilung modelliert. Wir nehmen zunächst an, jede Bewirtschaftung stellt eine unabhängige Wiederholung eines Detektionsexperiments dar, welches nur die möglichen Ergebnisse detektiert und nicht detektiert haben kann. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen in einem solchen Zusammenhang kann üblicherweise gut durch eine Binomialverteilung approximiert werden. Bei 62 von 62 erkannten Bewirtschaftungen nehmen wir für die Abschätzung der Unsicherheit weiterhin plausibel an, dass 0.5 Bewirtschaftungen falsch erkannt würden, sich dies nur nicht in den Daten manifestiert hat. Die Wahrscheinlichkeit einer korrekten Detektion wäre unter diesen Annahmen also $p = \frac{61.5}{62} = 0.991935$. Die Gleichung für die Standardabweichung einer Binomialverteilung ist

$$\sigma = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} = \sqrt{\frac{0.991935 \cdot (1 - 0.991935)}{62}} \approx 0.01136\% \quad (6)$$

Mit den beobachteten Daten und den Annahmen für die statistische Modellierung erhält man also eine obere Abschätzung der statistischen Unsicherheit $\sigma_{\text{real}} \leq 1.136\%$

Insgesamt ergibt sich bei der Auswertung gesamter Bewirtschaftungsereignisse eine Erkennungsrate von $100\% \pm 1.136\%$.

5 Stabilität beim Einsatz in neuen Windparks

Die Auswertung der Bewirtschaftungserkennungen in Kapitel 3 und 4 bezieht sich auf die Auswertung der Bilddaten und Bewirtschaftungsereignisse in Windparks, deren frühere Kamerabilder zum Training des Convolutional Neural Networks verwendet wurden oder zumindest potenziell verwendet werden hätten können. Nahezu alle Deep-Neural-Networks tendieren zu Overfitting [5], also einer Überanpassung an die Trainingsdaten, was dazu führt, dass sie ihre Trainingsdaten und sehr ähnliche Daten besser analysieren können, als neue Daten, die oft stärker vom Trainingsmaterial abweichen. Obwohl die hier ausgewerteten Bilder sicher nicht direkt zum Training der KI verwendet wurden, ist es also aufgrund dieses Effekts theoretisch vorstellbar, dass die Ergebnisse in Kapitel 4 besser sein könnten, als die Detektionsgenauigkeit in neuen Windparks. Um diesen Effekt zu überprüfen, wurden die Ergebnisse der Bewirtschaftungserkennung auf zusätzlichen Kameras ausgewertet, die aufgrund ihres Inbetriebnahmedatums unmöglich in das Training der Modelle eingeflossen sein können. Es liegen Bilder zugrunde, die zwischen dem 7. März 2025 und dem 28. März 2025 aufgenommen wurden. In diesem Zeitraum wurden im Blickfeld der 4 ausgewerteten Kameras 21 Bewirtschaftungsereignisse verteilt über 171 relevante Bilder beobachtet.

Die Bewirtschaftungsereignisse wurde in der Regel über mehrere Bilder hinweg beobachtet, mit Schwankungen zwischen einem einzigen Bild bis hin zu 23 Bildern pro Bewirtschaftung. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt. Der Mittelwert ist mit 8.14 Bildern pro Bewirtschaftung konsistent zu den 9.51 Bildern pro Bewirtschaftung aus Kapitel 4.

Tabelle 7: Beobachtete Bewirtschaftungsereignisse auf neuen Kameras.

| Bewirtschaftung | Erkannt | Erkannt % | Gesamtzahl Bilder |
|------------------|---------|-----------|-------------------|
| 91-O 27.03 13:11 | 2 | 100.00 % | 2 |
| 91-O 27.03 14:15 | 4 | 80.00 % | 5 |
| 91-W 27.03 13:31 | 1 | 100.00 % | 1 |
| 91-W 27.03 14:35 | 4 | 100.00 % | 4 |
| 93-N 07.03 13:57 | 1 | 100.00 % | 1 |
| 93-N 18.03 08:19 | 2 | 25.00 % | 8 |
| 93-N 18.03 12:29 | 16 | 94.12 % | 17 |
| 93-N 18.03 13:39 | 23 | 100.00 % | 23 |
| 93-N 18.03 14:41 | 3 | 100.00 % | 3 |
| 93-N 25.03 15:13 | 8 | 88.89 % | 9 |
| 93-N 28.03 13:53 | 1 | 100.00 % | 1 |
| 93-N 28.03 14:59 | 2 | 28.57 % | 7 |
| 93-S 07.03 13:47 | 7 | 100.00 % | 7 |
| 93-S 25.03 18:03 | 6 | 85.71 % | 7 |
| 93-S 18.03 08:13 | 15 | 93.75 % | 16 |
| 93-S 18.03 11:07 | 16 | 100.00 % | 16 |
| 93-S 18.03 12:09 | 16 | 100.00 % | 16 |
| 93-S 18.03 13:13 | 9 | 56.25 % | 16 |
| 93-S 18.03 14:19 | 1 | 50.00 % | 2 |
| 93-S 25.03 15:11 | 6 | 100.00 % | 6 |
| 93-S 28.03 11:13 | 4 | 100.00 % | 4 |

Die Ergebnisse zeigen, dass im betrachteten Zeitraum die tatsächlich beobachtete Erkennungswahrscheinlichkeit in Windparks, die nicht in das Training der KI eingeflossen sein können, ebenfalls 100% beträgt. Da nur 21 Bewirtschaftungen in diesem Zeitraum beobachtet wurden, ist die statistische Unsicherheit mit $p = \frac{20.5}{21}$ gemäß Gleichung 6 abzuschätzen zu kleiner 3.32%.

6 Stabilität zu verschiedenen Jahreszeiten

Die Auswertung der Bewirtschaftungserkennungen in Kapitel 3, 4 und 5 fanden anhand von Aufnahmen statt, die den Zeitraum Sommer und Herbst gut repräsentieren. Es ist beim Einsatz von Deep Neural Networks vorstellbar, dass die Detektionsgenauigkeit im Frühling durch geänderte Vegetationsbedingungen abweicht. Um diese Hypothese zu überprüfen, wurde die Analyse der Bewirtschaftungserkennung auf weiteren Aufnahmen aus dem Zeitraum vom 29.4.2025 bis zum 11.5.2025 wiederholt. Dieser Zeitraum hat eine besonders hohe Wahrscheinlichkeit Mahdereignisse zu enthalten. In diesem Zeitraum fanden auf den ohne Bias ausgewählten 6 Kameras 19 Bewirtschaftungsereignisse statt, die insgesamt auf 148 Bilder zu sehen waren. Die genauen Ergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt. Wie in den vorherigen Auswertungszeiträumen wurden die Bewirtschaftungsereignisse meist über mehrere Bilder hinweg beobachtet, mit Schwankungen zwischen einem Bild bis hin zu 25 Bildern pro Bewirtschaftung. Der Mittelwert der Bildanzahl pro Bewirtschaftung beträgt 7.79 und ist somit konsistent zu den Werten der vorherigen Auswertungen.

Tabelle 8: Beobachtete Bewirtschaftungsereignisse im Frühling 2025.

| Bewirtschaftung | Erkannt | Erkannt % | Gesamtzahl Bilder |
|--------------------|---------|-----------|-------------------|
| 444-NW 01.05 9:29 | 25 | 100.00 % | 25 |
| 444-NW 03.05 8:36 | 13 | 100.00 % | 13 |
| 444-NW 11.05 10:32 | 17 | 100.00 % | 17 |
| 444-SO 30.04 14:01 | 6 | 100.00 % | 6 |
| 444-SO 01.05 9:31 | 16 | 100.00 % | 16 |
| 444-SO 03.05 8:37 | 3 | 100.00 % | 3 |
| 444-SO 11.05 10:33 | 11 | 100.00 % | 11 |
| 445-NW 29.04 13:31 | 8 | 100.00 % | 8 |
| 445-NW 02.05 14:27 | 3 | 100.00 % | 3 |
| 445-NW 02.05 15:29 | 1 | 100.89 % | 1 |
| 445-NW 08.05 12:40 | 8 | 88.89 % | 9 |
| 445-NW 10.05 11:17 | 2 | 100.00 % | 2 |
| 445-SO 29.04 13:32 | 6 | 75.00 % | 8 |
| 445-SO 02.05 13:11 | 1 | 100.00 % | 1 |
| 446-SO 30.04 19:18 | 0 | 0.00 % | 2 |
| 445-SO 02.05 14:26 | 6 | 100.00 % | 6 |
| 445-SO 02.05 15:29 | 2 | 100.00 % | 2 |
| 445-SO 02.05 12:41 | 8 | 88.89 % | 9 |
| 445-SO 10.05 11:15 | 7 | 100.00 % | 7 |

Die Ergebnisse zeigen, dass der Mittelwert der Einzelbildererkennung mit 96.6% konsistent zu den 96.3% aus Kapitel 3 ist. Von den 19 Bewirtschaftungsereignissen wurden 18 erkannt.



Abbildung 7: Beginn und Ende der Bewirtschaftung 446-SO 30.04 zwischen 19:18 Uhr und 19:23. Nur auf dem ersten Bild (links) befindet sich der Traktor gerade noch im für diese Anlage relevanten Bereich.

Die einzige nicht erkannte Bewirtschaftung in Tabelle 8 ist die Bewirtschaftung 446-SO 30.04 19:18. Es handelt sich um eine Bewirtschaftung, die den Rand des für dieses Windrad relevanten Bereichs streift. Die Bewirtschaftung dauert insgesamt 5 Minuten, davon ca. 90 Sekunden im relevanten Bereich des Windrades. Innerhalb dieses Zeitfensters ist der Traktor nur auf einem Bild im relevanten Bereich, auf welchem er nicht detektiert wurde. Die Aufnahme fällt daher in die 3.4 bis 3.7% der False-Negative Einzelbilder.

Insgesamt kann kein signifikanter Unterschied in der Detektionsgenauigkeit zwischen den Jahreszeiten festgestellt werden.

7 Weitere Herausforderungen

7.1 Entfernung

Insgesamt wurden in den Auswertungen der Kapitel 3, 4 und 5 Daten verschiedener Windparks ausgewertet. Die Überwachungsbereiche decken dabei maximale Entfernungen von bis zu 300 Meter ab. Tabelle 9 zeigt anonymisiert die überwachten Entfernungen der Windparks zu den Kameras.

Die Auswertungen von Windparks mit hoher maximaler Reichweite, beispielsweise in den Daten von Kapitel 4, zeigen dabei bis 300 m keine signifikante Abweichung von der festgestellten Detektionsgenauigkeit. Im analysierten Datensatz hat sich die festgestellte Sensitivität auf Einzelbildern im Windpark mit bis zu 300 m Entfernung entgegen der Erwartung sogar erhöht. Dabei ist zu erwähnen, dass die Statistik hier geringer war

Tabelle 9: Maximale Entfernungen zwischen einzelnen Windenergieanlagen und zu detektierenden Landmaschinen in verschiedenen Windparks.

| Windpark | Maximale Entfernung |
|------------|---------------------|
| Windpark 1 | 200 m |
| Windpark 2 | 150 m |
| Windpark 3 | 100 m |
| Windpark 4 | 200 m |
| Windpark 5 | 131 m |
| Windpark 6 | 300 m |

als in Kapitel 3 (114 Bilder relevanter Bewirtschaftungen im Windpark mit 300 Meter Entfernung) und es sich bei der zusätzlichen Verbesserung höchstwahrscheinlich um eine statistische Fluktuation handelt. Es konnte aber dementsprechend keine Verschlechterung bis 300 Meter festgestellt werden.

Bei Entfernungen zwischen 300 m und ca. 1000 m fällt die Erkennungsgenauigkeit allerdings ab. Dieser Effekt wurde zum Beispiel in Kapitel 3 bei den 3612 Bildern von Landmaschinen außerhalb des jeweiligen Beobachtungsbereichs festgestellt. Die Bilder nicht relevanter Maschinen enthalten neben zu weit entfernten Traktoren aber auch Baumaschinen, Traktoren auf Feldwegen und andere Fahrzeuge. Die vorhandene Datenlage erlaubt dementsprechend keine direkte Aussage darüber, ab welcher Entfernung die Genauigkeit nachlässt. Laut den vorliegenden Daten und Auswertungsergebnissen ist die ermittelte Genauigkeit bis 300 m gegeben.

7.2 Nachtbetrieb

Eine häufige Herausforderung bei der Überwachung von Windkraftanlagen ist die Erkennung von Landmaschinen bei Nacht oder schlechten Lichtverhältnissen. Hierzu wurde noch keine dedizierte Studie durchgeführt. Es ist sicher anzunehmen, dass die Unterscheidung relevanter und nicht relevanter Bewirtschaftungsereignisse bei Dunkelheit schwieriger ist, als bei Tageslicht. Laut Aussagen von Fleximaus sind nächtliche Bewirtschaftungen Gegenstand aktueller Weiterentwicklungen. Beim Sichten der Bilder, die in die Auswertungen der Kapitel 3, 4 und 5 eingeflossen sind, wurde aber auch ein Bild einer Bewirtschaftungen bei Nacht gefunden. Die Landmaschine in Abbildung 8 wurde korrekt erkannt. Abbildung 9 zeigt eine verifizierte Erkennung einer Bewirtschaftung bei dunkleren Lichtverhältnissen. Das Beispiel ist aus dem Onlineportal von Fleximaus entnommen, da in den analysierten Daten keine entsprechende Bewirtschaftung enthalten war. Diese Beispiele stellen keine quantitative Aussage über die Erkennung nächtlicher Bewirtschaftungen dar, sondern sind individuelle positive Indizien.



Abbildung 8: Korrekte Erkennung und Lokalisation bei einsetzender Dämmerung.

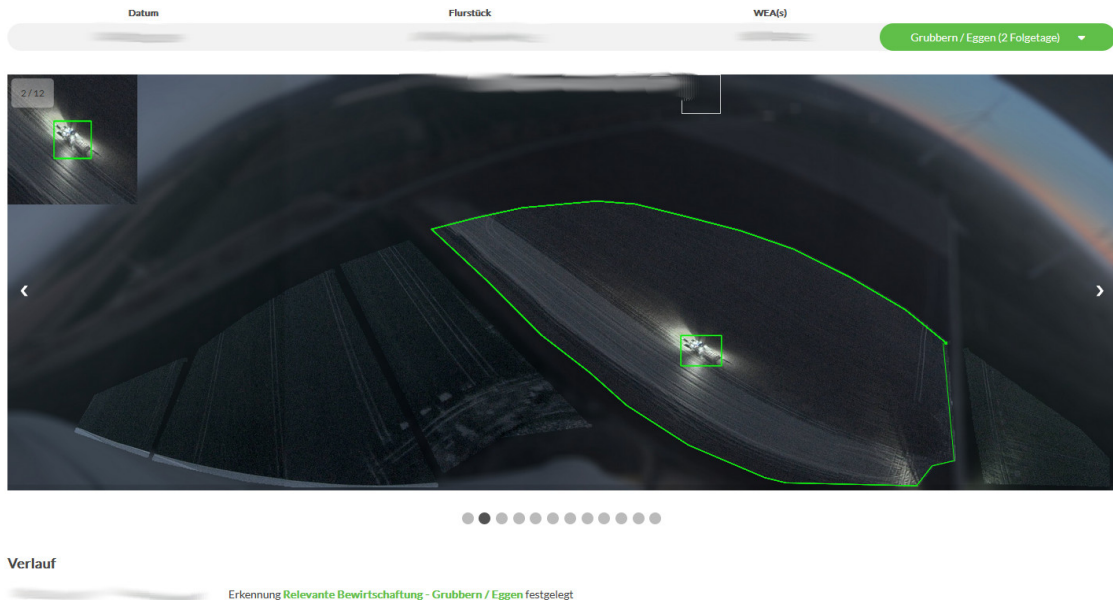


Abbildung 9: Korrekte Erkennung und Lokalisation bei Nacht. Dieses Bild zeigt die Darstellung aus dem Onlineportal von Fleximaus. Benutzerspezifische Informationen wurden aus Datenschutzgründen nachträglich unkenntlich gemacht.

8 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Das System Flexibird hat über alle Test hinweg 100% aller Bewirtschaftungsereignisse mit einer Dauer ab 6 Minuten erkannt. Die Detektionsgenauigkeit ist über verschiedene Testbedingungen hinweg konstant. Auf Einzelbildern wurden 96.3% der Bewirtschaftungen beim ersten Versuch korrekt erkannt. Bei Bewirtschaftungsereignissen ab 6 Minuten entspräche dies einer Wahrscheinlichkeit von 99.9949%. Die False Positive Rate beträgt 0.55% und unter plausiblen Annahmen resultiert die erzielte Genauigkeit in einer Reinheit der gemeldeten Alarme von 86.23%. Die Lokalisation war in einer manuell ausgewerteten Stichprobe bei allen detektierten Landmaschinen korrekt im Sinne einer

feldstücksbezogenen Abschaltung. Zwei Landmaschinen hatten eine etwas ungenaue Lokalisation durch zu große Bounding Boxen, die aber in keinem Fall zu einer Falscherkennung führte. Bei einer Auswertung, bei der ganze Bewirtschaftungsereignisse als detektiert oder nicht detektiert gezählt werden, wurden 100% der Bewirtschaftungen korrekt erkannt. Auch bei einer weiteren Auswertung ganzer Bewirtschaftungsereignisse auf Bildern von neu installierten Kameras, wurden ebenfalls 100% der Bewirtschaftungen erkannt. Eine weitere Auswertung bei geänderter Jahreszeit zeigt konsistente Detektionsergebnisse, wobei ein besonders kurzes Bewirtschaftungsereignis nicht detektiert wurde. Die ermittelten Unsicherheiten dieser Ergebnisse aufgrund limitierter Statistik sind kleiner als 1.136% bzw. 3.32%. Die Sensitivität von FlexiBird ist dementsprechend als sehr hoch einzustufen und scheint robust gegenüber Varianz in den betrachteten Blickwinkeln und überwachten Flächen.

Es konnte bis 300 m Entfernung keine signifikante Abweichung der Detektionsgenauigkeit festgestellt werden. Bei einer nicht näher bestimmten Entfernung zwischen 300 m und 1000 m Entfernung reduziert sich die Detektionsgenauigkeit signifikant. Da dies über die maximalen überwachten Entfernungen hinausgeht, wurde keine genauere Untersuchung vorgenommen. Die beobachtete Verfügbarkeit des Systems lag bei 99.5%. Ebenfalls nur als Einzelfälle konnte die Erkennung von Bewirtschaftungen bei Nacht oder schlechten Lichtverhältnissen eingestuft werden.

Es gab bei allen durchgeführten Tests keine Indizien darauf, dass es systematische Probleme bei der Erkennung von Bewirtschaftungen mit FlexiBird gibt. Positiv fällt die hohe Sensitivität des Systems auf.

Literatur

- [1] Seaq68 auf pixabay.com unter Creative Commons Zero (CC0). milan-vogel-raubvogel-greifvogel, 05 2017. Accessed: 2025-04-08.
- [2] Elke Bruns, Eva Schuster, and Julia Streiffeler. Anforderungen an technische Überwachungs- und abschaltssysteme an windenergieanlagen. Workshopreihe Technische Systeme Bundesamt für Naturschutz, 2021. Accessed: 2025-03-07.
- [3] Fleximaus GmbH. Systembeschreibung flexibird. 03 2025. Accessed: 2025-04-07.
- [4] Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende. Detektionssysteme zur ereignisbezogenen abschaltung von windenergieanlagen zum schutz von tagaktiven brutvögeln. 01 2025. Accessed: 2025-04-07.
- [5] M.M. Bejani and M. Ghatte. A systematic review on overfitting control in shallow and deep neural networks. Artif Intell Rev, 54(6391–6438), 2021. Accessed: 2025-04-02.