Bundesamt für Naturschutz

Machbarkeit der Detektion von Bewirtschaftungsereignissen an Windenergieanlagen

Studie zu Stand und Perspektiven automatischer Systeme

Frank Musiol, Nico Klar, Bruntje Lüdtke und Claude Steck

BfN-Schriften
783
2026

Bundesamt für Naturschutz

Machbarkeit der Detektion von Bewirtschaftungsereignissen an Windenergieanlagen

Studie zu Stand und Perspektiven automatischer Systeme

Frank Musiol
Nico Klar
Bruntje Lüdtke
Claude Steck

Impressum

Titelbild: Traktor mäht in der Umgebung eines Windparks (iStock/ahavelaar)

Adressen der Autorin und der Autoren:

Dr. Frank Musiol
Nico Klar
Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)
Meitnerstraße 1, 70563 Stuttgart
E-Mail: frank.musiol@zsw-bw.de
nico.klar@zsw-bw.de

Bruntje Lüdtke
Dr. Claude Steck
Freiburger Institut für angewandte Tierökologie (FrInaT)
Dunantstraße 9, 70119 Freiburg
E-Mail: steck@frinat.de

Fachbetreuung im BfN:

Jens Ponitka
Fachgebiet II 4.3 Naturschutz und erneuerbare Energien

Förderhinweis:

Gefördert durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN) mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUKN) (FKZ: 3523 15 2100).

Diese Veröffentlichung wird aufgenommen in die Literaturdatenbank „DNL-online“ (www.dnl-online.de).

BfN-Schriften sind nicht im Buchhandel erhältlich. Eine pdf-Version dieser Ausgabe kann unter www.bfn.de/publikationen heruntergeladen werden.

Institutioneller Herausgeber: Bundesamt für Naturschutz
Konstantinstr. 110
53179 Bonn
URL: www.bfn.de

Der institutionelle Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des institutionellen Herausgebers übereinstimmen.

Diese Schriftenreihe wird unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz Namensnennung – keine Bearbeitung 4.0 International (CC BY - ND 4.0) zur Verfügung gestellt (creativecommons.org/licenses).

ISBN 978-3-89624-547-2

DOI 10.19217/skr783

Bonn 2026

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 5

1 Anforderungen aus Sicht des Naturschutzes 8

1.1 Grundlagen 8

1.1.1 Konflikt Windenergie und Vögel 8

1.1.2 Naturschutzrechtliche Grundlagen 10

1.2 Umsetzung der ereignisbezogenen Abschaltung bei Bewirtschaftungsereignissen in der Praxis 22

1.2.1 Ist-Zustand 22

1.2.2 Funktionsweise von sensorbasierten Systemen 23

2 Stand der Technik 26

2.1 Datengrundlage: Herstellerinterviews 26

2.2 Ziel und Abgrenzung 26

2.3 Methodisches Vorgehen 27

2.4 Technische Anforderungen an automatische Systeme 27

2.4.1 Abdeckung und Geometrie 27

2.4.2 Zeitliche Eigenschaften 27

2.4.3 Semantische Entscheidung 27

2.4.4 Schnittstellen und Sicherheit 28

2.4.5 Nachweisfähigkeit 28

2.4.6 Betriebsfestigkeit und Wartbarkeit 28

2.5 Technologiepfade und Architekturen 28

2.5.1 Optische Systeme (RGB/visuell) 28

2.5.2 Thermische Systeme (IR/Wärmebild) 29

2.5.3 Positions- und aktivitätsbasierte Systeme (GPS/ERP/Tracker) 29

2.6 Funktionskette und Leistungsfähigkeit 30

2.6.1 Abdeckung, Nacht- und Witterungstauglichkeit 30

2.6.2 Klassifikation relevanter Tätigkeiten und KI-Nachtraining 30

2.6.3 Reaktionskette, Schnittstellen und Automatisierungsgrade 31

2.6.4 Protokollierung und Nachweisführung 32

2.7 Betrieb, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit 32

2.7.1 IT-/OT-Sicherheit und Datenschutz 32

2.7.2 Wartung, Verfügbarkeit und Skalierung 33

2.7.3 Kostenbilder (Investition und Betrieb) 33

2.8 Reifegrad, Validierung und Mindestanforderungen 33
2.8.1 Praxiserfahrungen und Reifegrade 33
2.8.2 Validierung und Benchmarks 34
2.8.3 Technische Mindestanforderungen 34
2.9 Entwicklungsbedarfe und offene Herausforderungen 35
2.10 Schlussfolgerungen und Perspektive der Machbarkeit 35
3 Datenschutzrechtliche Aspekte 37
3.1 Videoüberwachung und Datenschutz 37
3.2 Checkliste Videoüberwachung durch automatische Systeme 37
3.2.1 Themenkomplex 1: Berechtigte Interessen von Verantwortlichen oder Dritten 38
3.2.2 Themenkomplex 2: Erforderlichkeit und Datensparsamkeit 38
3.2.3 Themenkomplex 3: Interessenabwägung mit den schutzwürdigen Interessen der betroffenen Personen 40
3.2.4 Themenkomplex 4: Rechenschaft und Transparenz 41
3.2.5 Themenkomplex 5: Datensicherheit und Speicherbegrenzung 42
3.3 Fazit 43
4 Anwendungsaspekte 45
4.1 Genehmigungsfragen 45
4.2 Anwendung automatischer Systeme in der Praxis 46
4.2.1 Assistierte Variante mit manueller Abschaltung 46
4.2.2 Teilautomatisierte Variante mit automatischer Abschaltung 47
4.2.3 Autonome Variante 47
4.3 Eignungsnachweis 48
4.3.1 Nachzuweisende Eigenschaften 48
4.3.2 Formale Eignungsnachweise 50
4.4 Evaluierung der Funktionserfüllung / Monitoring 56
4.5 Anschaffungs- und Betriebskosten 57
4.5.1 Beispielhafte Kostenberechnungen automatischer Systeme 58
4.5.2 Vergleich der Kosten mit der konventionellen Methode 59
4.6 Betrieb und Wartung 59
4.6.1 Umgang mit potenziellen Systemausfällen 60
5 Fazit 61
Literaturverzeichnis 62
Abkürzungsverzeichnis 66

Zusammenfassung

Die zeitweise Abschaltung von Windenergieanlagen (WEA) bei landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignissen gehört zu den hoch wirksamen Maßnahmen, das Tötungsrisiko von Brutvögeln durch Windenergieanlagen zu senken und wird regelmäßig angewandt. Dementsprechend ist diese Maßnahme in Anlage 1 zu § 45b Abs. 1-5 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) aufgeführt und definiert. Demnach sollen Windenergieanlagen abgeschaltet werden, wenn in weniger als 250 Meter Abstand Grünland gemäht wird, Feldfrüchte geerntet werden oder gepflügt wird. Die Abschaltung soll ab Beginn des Ereignisses bis mindestens 24 h (bei besonders gefährdeten Vogelarten mit mindestens zwei Brutpaaren bis mindestens 48 h) nach dem Ende des Ereignisses jeweils von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang erfolgen.

Diese Maßnahme ist nicht erst seit dem im Jahr 2022 novellierten BNatSchG gängige Praxis, sondern fand sich in ähnlicher Form bereits davor in vielen Länderleitfäden zur Windenergieplanung. Die konventionelle bzw. bisher zumeist praktizierte Umsetzung dieser Maßnahme besteht aus vertraglichen Vereinbarungen mit den bewirtschaftenden Landwirt*innen über eine entsprechende Verpflichtung, die Bewirtschaftungsereignisse rechtzeitig anzukündigen. Diese Methode ist organisatorisch aufwändig und zudem fehleranfällig, da Versäumnisse der Vertragspartner nicht auszuschließen sind. Zudem bedarf diese Methode der Kooperationsbereitschaft aller relevanten Bewirtschaftenden, weshalb ihre Umsetzung nicht immer möglich ist.

Abhilfe versprechen automatische Systeme, die Bewirtschaftungsereignisse sowie perspektivisch auch deren Relevanz für Abschaltungen eigenständig erkennen. Mit deren Potenzial als geeignetes Instrument zur Umsetzung der Abschaltungen befasst sich die vorliegende Studie. Die Mehrzahl der aktuell verfügbaren Systeme basiert auf dem Einsatz von optischen oder thermischen Kameras, die zum Teil auch kombiniert werden. Daneben sind positionsbasierte Systeme auf der Grundlage von GPS verfügbar, die jedoch weniger Vorteile gegenüber der konventionellen Methode besitzen und deshalb nur am Rande mitbetrachtet werden.

Bezüglich der Reaktionskette der auf Kameras beruhenden Systeme ist im Wesentlichen zwischen drei verschiedenen Automatisierungsgraden zu unterscheiden:

- **assistiert:** das System detektiert ein Ereignis und übermittelt der Betriebsführung entsprechende Bilder. Dort wird entschieden, ob das Ereignis abschaltrelevant ist oder nicht. Falls ja, wird die Windenergieanlage für den vorgeschriebenen Zeitraum seitens der Betriebsführung abgeschaltet;
- **halbautomatisiert:** das System detektiert ein Ereignis und schaltet die Windenergieanlage per entsprechendem Signal selbständig für den vorgeschriebenen Zeitraum ab. Gleichzeitig übermittelt es entsprechende Bilder an die Betriebsführung, die die Anlage wieder in Betrieb nimmt, falls das Ereignis nicht abschaltrelevant war;
- **autonom:** das System detektiert ein Ereignis und entscheidet eigenständig, ob dieses abschaltrelevant ist oder nicht. Falls ja, schaltet es die Windenergieanlage für den vorgeschriebenen Zeitraum ab.

Grundsätzlich haben automatische Systeme bereits eine Marktreife erreicht, die ihren kontextgerechten Einsatz ermöglicht, wobei zwischen den verfügbaren Systemen noch

Unterschiede im Automatisierungsgrad bestehen. Die Realisierung autonomer Systeme erscheint möglich, sie benötigen jedoch für die Unterscheidung der verschiedenen Bewirtschaftungsvorgänge hochqualitativ trainierte KI-Modelle oder die Kombination mit weiteren Quellen. Bislang bestehen daher noch keine Nachweise für die Funktionsfähigkeit autonomer Lösungen, nach Herstellerangaben befinden sich solche Systeme aber in der Entwicklung.

In der heutigen Praxis sind halbautomatisierte Systeme gegenüber assistierten zu bevorzugen, da bei Letzteren die Gefahr größerer Zeitversätze zwischen dem Beginn des Ereignisses und der Abschaltung besteht. Zudem ist die Umsetzung der Maßnahme über halbautomatisierte Systeme organisatorisch deutlich einfacher zu gewährleisten.

Auch wenn autonome Systeme derzeit noch nicht verfügbar sind und ihre Entwicklung noch mit verschiedenen Herausforderungen verbunden ist, hätten diese, in robuster Form verfügbar, sowohl unter dem Schutzaspekt als auch vor dem organisatorischen Hintergrund noch einmal signifikante Vorteile gegenüber halbautomatisierten Systemen. Ihre Entwicklung sollte deshalb wo möglich durch geeignete Regelungen unterstützt werden. So bestehen in den Leitfäden der Bundesländer beispielsweise noch teilweise abweichende Regelungen zu Abschaltdistanz und -dauer sowie zu den abschaltrelevanten Ereignissen. Für die Entwicklung und Etablierung autonomer Systeme sollte eine Vereinheitlichung, insbesondere hinsichtlich der abschaltrelevanten Vorgänge entsprechend den Vorgaben des BNatSchG angestrebt werden, damit auch die zu erfüllenden Funktionen der Systeme einheitlich sind.

Für eine breitere Anwendung automatischer Systeme sind Eignungsnachweise wichtig, damit Planer eine Hilfestellung bei der Auswahl und Behörden zuverlässige Entscheidungsgrundlagen für die Genehmigung haben. Insbesondere für autonome Systeme, die Bewirtschaftungsereignisse auch klassifizieren, wird die Entwicklung einer Standarderprobung vorgeschlagen. Da mit dem Einsatz der Systeme aus naturschutzfachlicher Sicht sowie aus Sicht der Praktikabilität perspektivisch große Vorteile verbunden sind, wird zudem vorgeschlagen, die Hürden im Rahmen einer solchen Standarderprobung nicht zu hoch anzusetzen und auf eine zwingende Erprobung unter realen Feldbedingungen soweit wie möglich zu verzichten. So kann die Überwachungsgüte anhand der technischen Eigenschaften eingesetzter Kameras nachgewiesen werden und die Detektion und Klassifikation anhand eines Standarddatensatzes, mit dem die hinterlegte Software getestet wird. Eckpunkte hierfür werden vorgeschlagen, die Entwicklung der Standarderprobung selbst ist nicht Gegenstand dieser Studie. Für bereits am Markt verfügbare Systeme, die assistiert oder halbautomatisch arbeiten, sollte übergangsweise die Funktionsfähigkeit auch über anderweitige Belege wie insbesondere die technischen Merkmale der eingesetzten Kameras nachweisbar sein, um den zunehmenden Einsatz nicht auszubremsen.

Im Rahmen der Nachweisführung zur korrekten Umsetzung der beauflagten Maßnahme zur Abschaltung von WEA bei Bewirtschaftungsereignissen können der Genehmigungsbehörde im Fall der Anwendung kamerabasierter automatischer Systeme neben den Log-Einträgen der WEA-Steuerung Bildbelege für die zugehörigen Bewirtschaftungsereignisse übermittelt werden. Für standarderprobte Systeme wird vorgeschlagen, auf Nachweise für nicht erfolgte Bewirtschaftungen zu verzichten, zumal solche Nachweise auch bei der konventionellen Umsetzungsmethode weder praktikabel sind noch in der Regel verlangt werden.

Bei aktueller Marktlage sind Anschaffungs- und Betriebskosten automatischer Systeme noch vergleichsweise hoch, können jedoch abhängig von der Zahl der Bewirtschafter und deren

erforderlichen Vergütung bereits heute im Bereich der Kosten für die konventionelle Methode oder sogar darunter liegen. Für einen entsprechenden Vergleich ist deshalb immer der Einzelfall entsprechend der konkreten Projektkonstellation zu betrachten.

1 Anforderungen aus Sicht des Naturschutzes

1.1 Grundlagen

1.1.1 Konflikt Windenergie und Vögel

Seit langem ist bekannt, dass Vögel an Windenergieanlagen (WEA) zu Tode kommen können, wenn sie mit den sich drehenden Rotorblättern kollidieren (erste Peer-reviewed Studien waren z. B. Musters et al. (1996); Osborn et al. (2000)). In Deutschland sammelt die brandenburgische Staatliche Vogelschutzwarte seit 2002 verfügbare, überwiegend nicht systematisch erhobene Daten zu Kollisionen von Vögeln an WEA (Dürr 2025). Mittlerweile umfasst die Datensammlung zu Vogelverlusten (Stand 26.02.2025) 162 Arten bzw. Artengruppen und 5.164 registrierte Schlagopfer. Mit großem Abstand sind der Mäusebussard (*Buteo buteo*) und der Rotmilan (*Milvus milvus*) mit 809 respektive 793 Funden die häufigsten Schlagopfer, gefolgt von Seeadler (*Haliaeetus albicilla*; n = 297), Stockente (Anas platyrhynchos; n = 214) und Ringeltaube (*Columba palumbus*; n = 199). Laut § 44 Abs. 1 Nr. 1 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) ist es verboten, wild lebende Tiere besonders geschützter Arten zu verletzen oder zu töten (siehe auch Kap. 1.1.2.1). In § 44 Abs. 5 S. 2 Nr. 1 BNatSchG wird allerdings relativiert, dass der Verbotstatbestand der Tötung nur dann eintritt, wenn ein signifikant erhöhtes Tötungsrisiko für die betroffenen Exemplare besteht. Aufgrund ihres artspezifischen Verhaltens (Flug, Nahrungssuche etc.), ihres Verhaltens gegenüber WEA, durch Populationsstrukturen, Empfindlichkeit und Gefährdungsstatus können besonders kollisionsempfindliche Arten identifiziert werden.

Die kollisionsgefährdeten und daher insoweit prüfungsrelevanten Brutvogelarten wurden in das BNatSchG § 45b Anlage 1 Abschnitt 1 aufgenommen. Diese sind demnach der Seeadler, der Fischadler (*Pandion haliaetus*), der Schreiadler (*Clanga pomarina*), der Steinadler (*Aquila chrysaetos*), die Wiesenweihe (*Circus pygargus*), die Kornweihe (*Circus cyaneus*), die Rohrweihe (*Circus aeruginosus*), der Rotmilan, der Schwarzmilan (*Milvus migrans*), der Wanderfalke (*Falco peregrinus*), der Baumfalke (*Falco subbuteo*), der Wespenbussard (*Pernis apivorus*), der Weißstorch (*Ciconia ciconia*), die Sumpfohreule (*Asio flammeus*) und der Uhu (*Bubo bubo*). Bei Planung und Genehmigung von Windenergieprojekten bzw. bei deren Betrieb müssen insbesondere diese Arten Berücksichtigung finden.

§ 44 Abs. 5 S. 2 Nr. 1 BNatSchG beschreibt hinsichtlich des signifikant erhöhten Tötungsrisikos, dass bei Anwendung der gebotenen, fachlich anerkannten Schutzmaßnahmen die Risikoerhöhung hinreichend gemindert wird und der Verbotstatbestand in der Folge nicht vorliegt (siehe auch Kap. 1.1.2.1). Die fachlich anerkannten Maßnahmen werden ebenfalls in § 45b Anlage 1 Abschnitt 2 definiert, darunter auch die hier im Zentrum stehende Schutzmaßnahme „Abschaltung bei landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignissen“ (siehe Kap. 1.1.2.2). Dass die Abschaltung bei landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignissen eine fachlich anerkannte Maßnahme ist, beruht unter anderem auf Studien zum Verhalten des Rotmilans.

Bereits zwischen 2007 und 2010 wurden Rotmilane, Seeadler und Wiesenweihen in einem Verbundprojekt telemetriert, um die Ursachen des erhöhten Kollisionsrisikos dieser Arten an WEA zu identifizieren (Hötker et al. 2013). Es stellte sich heraus, dass weder Rotmilane noch Seeadler Meideverhalten bezüglich der WEA zeigten, wobei sich die Anwesenheit der telemetrierten Rotmilane in einem Windpark bei Feldbearbeitung mit einer dadurch verursachten Steigerung des Nahrungsangebots erhöhte (Hötker et al. 2013; Heuck et al.

2019; ÖKOTOP & FÖA Landschaftsplanung 2023). Aktuelle Studien konnten über den Einsatz neuer Kameratechnik und Telemetriedaten zeigen, dass Rotmilane im Nahbereich der Rotorblätter ein kleinräumiges Ausweichverhalten zeigen („Microavoidance“). Dabei wurden Meideraten der Rotorscheibe von 98 – 99 % festgestellt, wohingegen der Bereich der Windparks selbst von den Rotmilanen nicht gemieden wurde (ARSU et al. 2023; Mercker et al. 2023; Mercker et al. 2024)

Auch Wiesenweihen hielten sich nach der Mahd von Mähwiesen vermehrt für ein bis drei Tage an solchen Flächen auf, auch wenn diese in der Nähe von Windparks lagen. Im Jahr 2017 stellte die Länderarbeitsgemeinschaft der Vogelschutzwarten in einem öffentlichen Beschluss dar, dass aufgrund der Anlockwirkung mancher landwirtschaftlichen Arbeiten auf Greifvögel und Störche ein zeitlich befristetes, erhöhtes Kollisionsrisiko besteht, wenn diese Arbeiten in der Nähe von WEA stattfinden (LAG VSW 2017). Die Länderarbeitsgemeinschaft formulierte in ihrem Beschluss deshalb Details zur Abschaltung von WEA zum Schutz von Greifvögeln und Störchen bei bestimmten landwirtschaftlichen Arbeiten. Bereits lange vor Inkrafttreten des Vierten Gesetzes zur Änderung des Bundesnaturschutzgesetzes am 29.07.2022 („BNatSchG-Novelle“) war die vorübergehende Abschaltung von WEA bei landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignisse als Vermeidungsmaßnahme in ähnlicher Form in vielen Länderleitfäden (vgl. Kap. 1.1.2.3) verankert.

Da das Flugverhalten des Rotmilans in der hier im Zentrum stehenden Schutzmaßnahme in Anlage 1 Abschnitt 2 zu § 45b Abs. 1 bis 5 BNatSchG explizit erwähnt wird (siehe Kap. 1.1.2.2), soll an dieser Stelle auf die Verhaltensweisen eingegangen werden, die zu dem besonders hohen Kollisionsrisiko der Art führen:

- Nahrungssuchverhalten: Während der Nahrungssuche fokussieren sich Rotmilane insbesondere auf den Bereich unter ihnen, den sie kreisend überfliegen. Attraktive Nahrungsflächen (z. B. Mastfußbrachen, frühzeitig gemähte Wiesen und gedroschene Getreidefelder) können Brutvögel, aber auch Nichtbrüter, aus bis zu 15 km Entfernung anlocken, wobei Distanzen bis zu 9 km in mehreren Studien belegt wurden (Nachtigall 1999; Hagge et al. 2003; Nachtigall 2008). Besonders zur Brutzeit zwischen April und Mai sind nutzbare Nahrungsflächen knapp, weshalb weite Strecken zurückgelegt werden.
- Flughöhe: mittlere Flughöhe zwischen 45 m und 71 m (Pfeiffer & Meyburg 2022); stetige Abnahme der Flugaktivität ab Höhen größer 40 m (ARSU et al. 2023); mittlere Flughöhe 28 m bzw. 52 m je nach Erfassungsmethode (Laser Range Finder LRF vs. GPS-Telemetrie, Aschwanden et al. 2025)
- Fluggeschwindigkeit: horizontale Fluggeschwindigkeit im Mittel 9,2 m/s (ARSU et al. 2023); im Mittel 7,6 m/s (je nach Methode 6,9 m/s (LRF) bzw. 8,0 m/s (GPS), ab 200 m Höhe Fluggeschwindigkeitszunahme auf 8,9 m/s (LRF) bzw. 9,7 m/s (GPS, (Aschwanden et al. 2025))
- Zusammenhang mit Windgeschwindigkeit: ab einer Flughöhe von ca. 80 m nimmt die Flugaktivität von Rotmilanen mit höheren Windgeschwindigkeiten ab (Heuck et al. 2019; HMUKLV & HMWEVW 2020)
- Tageszeitliche Variation: innerhalb der ersten 20 % und der letzten 10 % eines Tages kaum Aktivität (ARSU et al. 2023); kontinuierliche Aktivitätszunahme von 40 % am Morgen auf 80 % am Mittag gefolgt von einer Abnahme auf unter 25 % am Abend (Aschwanden et al. 2025); die tägliche Flugaktivität von Rotmilanen beträgt durchschnittlich zwischen 200 min

und 230 min (Hötker et al. 2013; ÖKOTOP & FÖA Landschaftsplanung 2023)

- Jahreszeitliche Variation: Die von Rotmilanen bevorzugten Flughöhen liegen im Frühjahr zu rund 50 % und im Spätsommer und Herbst noch zu 41 % im Risikobereich von 26 m bis 150 m Höhe; während der Brutzeit sind Männchen deutlich flugaktiver, nach dem Schlupf steigt die Flugaktivität für beide Geschlechter an (Hötker et al. 2013; ÖKOTOP & FÖA Landschaftsplanung 2023).

1.1.2 Naturschutzrechtliche Grundlagen

1.1.2.1 Nach § 44 BNatSchG

Die rechtlichen Grundlagen des besonderen Artenschutzes sind insbesondere in § 44 (Vorschriften für besonders geschützte und bestimmte andere Tier- und Pflanzenarten) und § 45 (Ausnahmen) bzw. § 45b (Betrieb von Windenergieanlagen an Land) des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) geregelt.

Die Zugriffsverbote ergeben sich aus § 44 Abs. 1 BNatSchG. Danach ist es verboten,

- wild lebenden Tieren der besonders geschützten Arten nachzustellen, sie zu fangen, zu verletzen oder zu töten oder ihre Entwicklungsformen aus der Natur zu entnehmen, zu beschädigen oder zu zerstören (Verletzungs- und Tötungsverbot),
- wild lebende Tiere der streng geschützten Arten und der europäischen Vogelarten während der Fortpflanzungs-, Aufzucht-, Mauser-, Überwinterungs- und Wanderungszeiten erheblich zu stören; eine erhebliche Störung liegt vor, wenn sich durch die Störung der Erhaltungszustand der lokalen Population einer Art verschlechtert (Störungsverbot),
- Fortpflanzungs- oder Ruhestätten der wild lebenden Tiere besonders geschützter Arten aus der Natur zu entnehmen, zu beschädigen oder zu zerstören (Schädigungsverbot).

In Bezug auf die Auswirkungen von Windenergieanlagen auf Vögel und die vorliegende Machbarkeitsstudie ist insbesondere das Tötungsverbot von Relevanz, das Individuen bezogen zu interpretieren ist.

In § 44 Abs. 5 S. 2 Nr. 1 BNatSchG wird u. a. für nach § 17 Abs. 1 und 3 BNatSchG genehmigte Eingriffe relativiert, dass keine Verstöße gegen die Zugriffsverbote nach § 44 Abs. 1 BNatSchG vorliegen, wenn betreffend

- § 44 Abs. 1 Nr. 1 (Tötungsverbot, s.o.)

die Beeinträchtigung durch den Eingriff oder das Vorhaben das Tötungsrisiko für Exemplare der betroffenen Arten nicht signifikant erhöht und diese Beeinträchtigung bei Anwendung der gebotenen, fachlich anerkannten Schutzmaßnahmen nicht vermieden werden kann.

- Abs. 1 Nr. 1 (Verletzungs- und Tötungsverbot, s.o.)

die Tiere oder ihre Entwicklungsformen im Rahmen einer erforderlichen Maßnahme, die auf den Schutz der Tiere vor Tötung oder Verletzung oder ihrer Entwicklungsformen vor Entnahme, Beschädigung oder Zerstörung und die Erhaltung der ökologischen Funktion der Fortpflanzungs- oder Ruhestätten im räumlichen Zusammenhang gerichtet ist, beeinträchtigt werden und diese Beeinträchtigungen unvermeidbar sind.

- § 44 Abs. 1 Nr. 3 (Schädigungsverbot, s.o.)

die ökologische Funktion der vom Eingriff oder Vorhaben betroffenen Fortpflanzungs- und Ruhestätte im räumlichen Zusammenhang weiterhin erfüllt wird.

1.1.2.2 Nach § 45b und Anlage 1

Vögel können an WEA umkommen oder verletzt werden. Insbesondere im Umfeld um WEA und Windparks brütende, kollisionsgefährdete Arten sind einem gesteigerten Tötungs- und Verletzungsrisiko ausgesetzt, das dazu führen kann, dass die oben genannten rechtlichen Vorgaben nicht eingehalten werden. Der § 45b BNatSchG (Betrieb von Windenergieanlagen an Land) trifft hier in den Absätzen 1 bis 5 in Kombination mit den in Anlage 1 genannten, artspezifischen Prüfradien konkrete Aussagen, unter welchen Bedingungen ein signifikant erhöhtes Tötungs- und Verletzungsrisiko zu erwarten ist. Derselbe Gesetzestext liefert zugleich Lösungsansätze, um den natur- und artenschutzverträglichen Ausbau der Windenergie trotz Vorkommen kollisionsgefährdeter Brutvogelarten zu ermöglichen. Demnach ist es möglich, ein prognostiziertes, signifikant erhöhtes Tötungsrisiko durch fachlich anerkannte Schutzmaßnahmen hinreichend zu mindern. Diese Vermutungsregel wird innerhalb § 45b Abs. 3 Nr. 2 BNatSchG aufgeführt und spezifiziert. Werden entweder Antikollisionssysteme genutzt, Abschaltungen bei landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignissen angeordnet, attraktive Ausweichnahrungshabitate angelegt oder phänologiebedingte Abschaltungen angeordnet, so ist für die betreffende Art in der Regel davon auszugehen, dass die Risikoerhöhung hinreichend gemindert wird (vgl. OVG Münster, Urteil vom 24. August 2023 – 22 A 793/22 – Rn. 102, 103 und Urteil vom 24. August 2023 – 201/22.AK. 2 Rn. 122, 123, sowie Urteil vom 29. November 2022 – 22 A 1184/18 – Rn. 173 juris., siehe auch KNE (2025)).

Für die hier relevante Abschaltung bei landwirtschaftlichen Ereignissen werden in Anlage 1 Abschnitt 2 BNatSchG folgende Aussagen getroffen:

„Beschreibung: Vorübergehende Abschaltung im Falle der Grünlandmahd und Ernte von Feldfrüchten sowie des Pflügens zwischen 1. April und 31. August auf Flächen, die in weniger als 250 Metern Entfernung vom Mastfußmittelpunkt einer Windenergieanlage gelegen sind. Bei Windparks sind in Bezug auf die Ausgestaltung der Maßnahme gegebenenfalls die diesbezüglichen Besonderheiten zu berücksichtigen. Die Abschaltmaßnahmen erfolgen von Beginn des Bewirtschaftungsereignisses bis mindestens 24 Stunden nach Beendigung des Bewirtschaftungsereignisses jeweils von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang. Bei für den Artenschutz besonders konfliktträchtigen Standorten mit drei Brutvorkommen oder, bei besonders gefährdeten Vogelarten, mit zwei Brutvorkommen ist für mindestens 48 Stunden nach Beendigung des Bewirtschaftungsereignisses jeweils von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang abzuschalten. Die Maßnahme ist unter Berücksichtigung von artspezifischen Verhaltensmustern anzuordnen, insbesondere des von der Windgeschwindigkeit abhängigen Flugverhaltens beim Rotmilan.

Wirksamkeit: Die Abschaltung bei Bewirtschaftungsereignissen trägt regelmäßig zur Senkung des Kollisionsrisikos bei und bringt eine übergreifende Vorteilswirkung mit sich. Durch die Abschaltung der Windenergieanlage während und kurz nach dem Bewirtschaftungsereignis wird eine wirksame Reduktion des temporär deutlich erhöhten Kollisionsrisikos erreicht. Die Maßnahme ist insbesondere für Rotmilan und Schwarzmilan, Rohrweihe, Schreiadler sowie den Weißstorch wirksam.“ (BNatSchG Anlage 1 Abschnitt 2)

In ÖKOTOP & FÖA Landschaftsplanung (2023) setzen sich die Autoren mit der biologischen und naturschutzrechtlichen Interpretation der Begrifflichkeiten auseinander. Hier wird anhand der Rechtsprechung erläutert, dass ein Schutzkonzept als wirksam zu gelten hat, wenn dieses die vorhabenbedingten (signifikanten) Risiken mit Hilfe von Maßnahmen auf ein nicht signifikantes Niveau zu senken vermag (BVerwG, Urteil vom 18.03.2009 – 9 A 39./07, Rn. 58, BVerwG, Urteil vom 14.07.2011 – 9 A 12./10, Rn. 99). Dabei müssen vier Voraussetzungen erfüllt werden:

1. Die Schutzmaßnahmen müssen mit Eintreten der vorhabenbedingten Beeinträchtigungen ohne zeitliche Verzögerung ihre Wirkung entfalten.
2. Sie müssen „entsprechend der beeinträchtigten ökologischen Funktion und den Ansprüchen der beeinträchtigten Art“ konzipiert sein.
3. Die Schutzmaßnahmen müssen fachlich anerkannt sein.

Für die Auslegung der anerkannten Wirksamkeit einer Schutzmaßnahme muss das erhöhte Kollisionsrisiko nicht mit vollständiger Gewissheit ausgeschlossen werden können. Eine umfängliche Vermeidung jeglicher Kollisionen ist dementsprechend nicht zu fordern. Vielmehr muss das vorhabenspezifische, individuenbezogene Tötungsrisiko unter die Signifikanzschwelle gesenkt werden (BVerwG, Urteil vom 27. November 2018 – 9 A 8/17 – juris, Rn. 123 f; Urteil vom 9. Juli 2008 – 9 A 14.07 – juris, Rn. 57). Essenzieller Kern der gesetzlichen Regel ist also die hinreichende Senkung des Tötungs- und Verletzungsrisikos. Dabei sind räumliche und zeitliche Abweichungen der Maßnahmenumsetzung in geringem Umfang möglich, solange die fachliche Wirksamkeit weiterhin gewährleistet wird (KNE 2025).

1.1.2.3 Länderleitfäden

Bereits vor dem Erscheinen des Beschlusses der Länderarbeitsgemeinschaft der Vogelwarten zur „Abschaltung von Windenergieanlagen (WEA) zum Schutz von Greifvögeln und Störchen bei bestimmten landwirtschaftlichen Arbeiten“ (LAG VSW 2017) haben viele Bundesländer die Vermeidungsmaßnahme der ereignisbezogenen Abschaltung von WEA in ihren Leitfäden und Erlassen aufgeführt. Seit dem Inkrafttreten des Vierten Gesetzes zur Änderung des Bundesnaturschutzgesetzes am 29.07.2022 wird die Vermeidungsmaßnahme „Abschaltung bei landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignissen“ auf Bundesebene geregelt (§ 45b BNatSchG Anlage 1 Abschnitt 2). Folgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Variabilität der relevanten Parameter (u. a. Art der Bewirtschaftungsereignisse, relevante Distanzen, zeitliche Vorgaben, Umsetzung durch technische Lösungen) der Vermeidungsmaßnahme innerhalb der für die Bundesländer verfügbaren Windkraft-Leitfäden sowie über den aktuellen Stand nach der BNatSchG-Novelle.

Tab. 1: Übersicht über die relevanten Maßnahmen-Kriterien innerhalb der einzelnen Bundesländer vor sowie nach der BNatSchG-Novelle im Jahr 2022.

	Vor BNatSchG-Novelle 2022	Nach BNatSchG-Novelle 2022
Baden-Württemberg		
Bewirtschaftungsereignisse	Grünlandmahd Ernte (ausgenommen Körnermais) Pflügen Mulchen	-

	Vor BNatSchG-Novelle 2022	Nach BNatSchG-Novelle 2022
Distanz	300 m	-
Zeitraum	01.03. – 31.10.	-
Tageszeit	Zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang	-
Dauer	Ab Beginn des Ereignisses und an den drei darauffolgenden Tagen	-
Mindestflächengröße	Feldblöcke ab einer Größe von 0,7 ha, wenn diese als Einheit bewirtschaftet werden	-
Mindestumsetzung	Reduktion der Maßnahme auf 80 % der Fläche bei sonst unzumutbarem Aufwand möglich	-
Technische Lösung erwähnt	-	-
Bemerkung	-	-
Quelle	LUBW (2021)	-
Bayern		Verweis auf § 45b BNatSchG Anlage 1 Abschnitt 2
Bewirtschaftungsereignisse	-	Grünlandmahd Ernte Pflügen
Distanz	-	250 m
Zeitraum	-	01.04. – 31.08.
Tageszeit	-	Zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang
Dauer	-	ab Beginn des Bewirtschaftungs-ereignisses bis mindestens 24 Stunden nach Beendigung des Bewirtschaftungsereignisses; an besonders konfliktträchtigen Standorten bis mindestens 48 Stunden nach Beendigung des Bewirtschaftungsereignisses (konfliktträchtig = drei Brutvor-kommen oder, bei besonders gefährdeten Vogelarten, zwei Brutvorkommen)
Mindestflächengröße	-	-
Mindestumsetzung	-	-
Technische Lösung erwähnt	-	-

	Vor BNatSchG-Novelle 2022	Nach BNatSchG-Novelle 2022
Bemerkung	-	Die in § 45b BNatSchG Anlage 1 Abschnitt 2 enthaltene Formulierung „insbesondere“ lässt weitere Schutzmaßnahmen zu, wenn diese fachlich anerkannt sind
Quelle	-	StMUV (2023)
Brandenburg		Verweis auf § 45b BNatSchG Anlage 1 Abschnitt 2
Bewirtschaftungsereignisse	-	Grünlandmahd Ernte Pflügen
Distanz	-	250 m
Zeitraum	-	01.04. – 31.08.
Tageszeit	-	Zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang
Dauer	-	ab Beginn des Bewirtschaftungs-ereignisses bis mindestens 24 Stunden nach Beendigung des Bewirtschaftungsereignisses; an besonders konfliktträchtigen Standorten bis mindestens 48 Stunden nach Beendigung des Bewirtschaftungsereignisses (konfliktträchtig = drei Brutvor-kommen oder, bei besonders gefährdeten Vogelarten, zwei Brutvorkommen)
Mindestflächengröße	-	-
Mindestumsetzung	-	-
Technische Lösung möglich	-	ja, wenn Wirksamkeit unabhängig erprobt wurde und Daten- sowie Persönlichkeitsschutz gewährleistet werden
Bemerkung	-	Als besonders gefährdete Arten werden solche definiert, die in der Roten Liste D bzw. BB geführt werden und eine besonders hohe Schlaggefährdung aufweisen
Quelle	-	MLUK BB (2023)

	Vor BNatSchG-Novelle 2022	Nach BNatSchG-Novelle 2022
Hessen		Verweis auf § 45b BNatSchG Anlage 1 Abschnitt 2 und HMUKLV (2021)
Bewirtschaftungsereignisse	Nicht näher definiert	Grünlandmahd Ernte Pflügen
Distanz	200 m	250 m
Zeitraum	Rotmilan: März - August Schwarzmilan, Weihen: April – August Wespenbussard: Mai – August Schwarzstorch: März – August Fischadler: Ende März – Anfang September	01.04. – 31.08.
Tageszeit	-	Zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang
Dauer	Zweitägige Abschaltung während Bewirtschaftungsereignissen	ab Beginn des Bewirtschaftungs-ereignisses bis mindestens 24 Stunden nach Beendigung des Bewirtschaftungsereignisses; an besonders konfliktträchtigen Standorten bis mindestens 48 Stunden nach Beendigung des Bewirtschaftungsereignisses (konfliktträchtig = drei Brutvor-kommen oder, bei besonders gefährdeten Vogelarten, zwei Brutvorkommen)
Mindestflächengröße	-	-
Mindestumsetzung	-	-
Technische Lösung erwähnt	-	-
Bemerkung	-	-
Quelle	HMUKLV (2021)	HMUKLV & HMWEVW (2023)
Mecklenburg-Vorpommern		
Bewirtschaftungsereignisse	Ernte Mahd Mulchen Pflügen Grubbern Eggen Freimist ausbringen Oder Ähnliches	-
Distanz	300 m	-
Zeitraum	01.03. – 31.10.	-

	Vor BNatSchG-Novelle 2022	Nach BNatSchG-Novelle 2022
Tageszeit	Zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang	-
Dauer	Ab Beginn des Ereignisses und an den drei Folgetagen	-
Mindestflächengröße	-	-
Mindestumsetzung	-	-
Technische Lösung erwähnt	-	-
Bemerkung	-	-
Quelle	LUNG MV (2016)	-
Niedersachsen		Verweis auf § 45b BNatSchG Anlage 1 Abschnitt 2
Bewirtschaftungsereignisse	Ernte Bodenwendende Bearbeitung	Grünlandmahd Ernte Pflügen
Distanz	Mindestens 100 m	250 m
Zeitraum	Bis zum 15. Juli	01.04. – 31.08.
Tageszeit	-	Zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang
Dauer	Drei Tage ab Beginn der Bearbeitung	ab Beginn des Bewirtschaftungs-ereignisses bis mindestens 24 Stunden nach Beendigung des Bewirtschaftungsereignisses; an besonders konfliktträchtigen Standorten bis mindestens 48 Stunden nach Beendigung des Bewirtschaftungsereignisses (konfliktträchtig = drei Brutvor-kommen oder, bei besonders gefährdeten Vogelarten, zwei Brutvorkommen)
Mindestflächengröße	-	-
Mindestumsetzung	-	-
Technische Lösung erwähnt	-	Potenzieller Einsatz wird erwähnt
Bemerkung	-	-
Quelle	NMUEK (2016)	NMUEK (2024)

	Vor BNatSchG-Novelle 2022	Nach BNatSchG-Novelle 2022
Nordrhein-Westfalen		Verweis auf § 45b BNatSchG Anlage 1 Abschnitt 2 plus alternative Ausarbeitung
Bewirtschaftungsereignisse	-	Grünlandmahd Ernte Pflügen Eggen Fräsen Grubbern
Distanz	-	150 m
Zeitraum	-	01.03. – 31.10.
Tageszeit	-	Zwischen Beginn und Ende der bürgerlichen Dämmerung
Dauer	-	72 Stunden nach Beendigung des Ereignisses
Mindestflächengröße	-	-
Mindestumsetzung	-	-
Technische Lösung erwähnt	-	-
Bemerkung	-	-
Quelle	-	MUNV & LANUV (2024)
Rheinland-Pfalz		Verweis auf § 45b BNatSchG Anlage 1 Abschnitt 2
Bewirtschaftungsereignisse	Mahd Ernte	Grünlandmahd Ernte Pflügen
Distanz	Flächenbezug ist homerange der betroffenen Rotmilan-Revierpaare	250 m
Zeitraum	-	01.04. – 31.08.
Tageszeit	Zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang	Zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang
Dauer	Ab Mahdbeginn und an den drei darauffolgenden Tagen	ab Beginn des Bewirtschaftungs-ereignisses bis mindestens 24 Stunden nach Beendigung des Bewirtschaftungsereignisses; an besonders konfliktträchtigen Standorten bis mindestens 48 Stunden nach Beendigung des Bewirtschaftungsereignisses (konfliktträchtig = drei Brutvor-kommen oder, bei besonders gefährdeten Vogelarten, zwei Brutvorkommen)

	Vor BNatSchG-Novelle 2022	Nach BNatSchG-Novelle 2022
Mindestflächengröße	-	-
Mindestumsetzung	-	-
Technische Lösung erwähnt	-	-
Bemerkung	Sofern möglich, ist die landwirtschaftliche Nutzung im Windpark/um die Anlagen nicht früher als in der Umgebung durchzuführen; die Flächen im und um den Windpark sollen gleichzeitig bewirtschaftet werden	Maßnahme wird auch für nachbrutzeitliche Schlafplatzansammlungen empfohlen; dann sind neben Mahd und dem Pflügen alle Flächenbearbeitungen zu berücksichtigen, die die Aufenthaltswahrscheinlichkeit kollisionsgefährdeter Arten erhöht
Quelle	Richarz et al. (2012)	Geisen et al. (2025)
Saarland		
Bewirtschaftungsereignisse	Alle landwirtschaftlichen Nutzungsereignisse wie z. B. Pflügen Grubbern Eggen Einsaat Mahd Ernte Heuwenden Heuentnahme	-
Distanz	Vom Rotor zzgl. eines 50 m Puffers überstrichene Fläche	-
Zeitraum	01.03. – 31.10.	-
Tageszeit	Zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang	-
Dauer	Ab Tag des Mahdbeginns und an drei darauffolgenden Tagen (Grünland) bzw. ab Tag der Feldbearbeitung und an zwei darauffolgenden Tagen (Ackerstandorte)	-
Mindestflächengröße	-	-
Mindestumsetzung	-	-
Technische Lösung erwähnt	-	-
Bemerkung	Sofern möglich, ist die landwirtschaftliche Nutzung im Windpark/um die Anlagen nicht früher als in der Umgebung durchzuführen; die Flächen im und um den Windpark sollen gleichzeitig bewirtschaftet werden	-

	Vor BNatSchG-Novelle 2022	Nach BNatSchG-Novelle 2022
Quelle	Richarz et al. (2013)	-
Sachsen		Verweis auf § 45b BNatSchG Anlage 1 Abschnitt 2 und Leitfaden SMEKUL SN (2022)
Bewirtschaftungsereignisse	Mahd Ernte Bodenbearbeitung	Mahd Ernte Bodenbearbeitung
Distanz	Rotorradius plus 200 m	250 m
Zeitraum	April – August	01.04. – 31.08.
Tageszeit	Zwischen 30 min vor Sonnenauf- und 30 min nach Sonnenuntergang	Zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang
Dauer	Ab Beginn des Bewirtschaftungsereignisses bis Sonnenuntergang und an zwei Folgetagen	ab Beginn des Bewirtschaftungs-ereignisses bis Sonnenuntergang und mindestens ein Folgetag, 24 Stunden nach Beendigung; an konfliktträchtigen Standorten ist für mindestens 48 Stunden nach Beendigung des Ereignisses abzu-schalten (konfliktträchtig = Stand-ort mit drei Brutvorkommen kollisionsgefährdeter Arten im zentralen Prüfbereich oder 2 Brutvorkommen von Arten mit sehr kleinem Landesbestand innerhalb des zentralen Prüfbereichs)
Mindestflächengröße	Feldblöcke größer 1 ha bzw. kleinere Feldblöcke, die bei gleichzeitiger Bewirtschaftung aufsummiert mehr als 1 ha ergeben	Feldblöcke größer 1 ha bzw. kleinere Feldblöcke, die bei gleichzeitiger Bewirtschaftung aufsummiert mehr als 1 ha ergeben
Mindestumsetzung	-	-
Technische Lösung erwähnt	-	-
Bemerkung	-	Der Leitfaden SMEKUL SN (2022) behält bezüglich Schutzmaß-nahmen seine Wirkung
Quelle	SMEKUL SN (2021)	SMEKUL SN (2022) und SMEKUL SN (2023)
Sachsen-Anhalt		
Bewirtschaftungsereignisse	Bodenwendende Bearbeitung Erntearbeiten	-
Distanz	200 m	-
Zeitraum	Während der Brutzeit	-

	Vor BNatSchG-Novelle 2022	Nach BNatSchG-Novelle 2022
Tageszeit	-	-
Dauer	Drei Tage ab Beginn der Bewirtschaftung	-
Mindestflächengröße	-	-
Mindestumsetzung	-	-
Technische Lösung erwähnt	-	-
Bemerkung	Sofern möglich, ist die landwirtschaftliche Nutzung im Windpark/um die Anlagen nicht früher als in der Umgebung durchzuführen; die Flächen im und um den Windpark sollen gleichzeitig bewirtschaftet werden; die Ernte oder Mahd sollten nicht vor Ende Juli stattfinden	-
Quelle	(MULE 2018)	-
Schleswig-Holstein		
Bewirtschaftungsereignisse	Mahd Ernte Bodenbearbeitung	-
Distanz	500 m	-
Zeitraum	Bis zum 31.08.	-
Tageszeit	Zwischen einer Stunde vor Sonnenauf- und einer Stunde nach Sonnenuntergang	-
Dauer	Ab Beginn des Ereignisses und drei Folgetage (Grünlandflächen) bzw. vier Folgetage (Ackerflächen)	-
Mindestflächengröße	Flächen müssen zum wesentlichen Anteil innerhalb der relevanten Distanz liegen, um eine Abschaltung auszulösen. Bei nur randlich betroffenen Flächen wird unter naturschutzfachlichen Aspekten abgewogen (z. B. Lage der Flächen bezüglich Flugwege)	-
Mindestumsetzung	-	-
Technische Lösung erwähnt	-	-
Bemerkung	Im Leitfaden von 2017 werden zusätzlich Schwaden, Aufpressen, Strohpressen und Düngen als relevante Bewirtschaftungsereignisse genannt	-

	Vor BNatSchG-Novelle 2022	Nach BNatSchG-Novelle 2022
Quelle	MELUND & LLUR (2017) und MELUND & LLUR (2021)	-
Thüringen		
Bewirtschaftungsereignisse	Grünlandmahd Ernte (ausgenommen Körnermais)	-
Distanz	300 m	-
Zeitraum	April – September	-
Tageszeit	Zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang	-
Dauer	Ab Beginn des Ereignisses und zwei Folgetage	-
Mindestflächengröße	Feldblöcke größer 1 ha bzw. kleinere Feldblöcke, die bei gleichzeitiger Bewirtschaftung aufsummiert mehr als 1 ha ergeben	-
Mindestumsetzung	-	-
Technische Lösung erwähnt	-	-
Bemerkung	-	-
Quelle	TLUG (2017)	-

Es wird deutlich, dass insbesondere vor der Novelle des BNatSchG von 2022 landesspezifisch unterschiedliche Auslegungen der Schutzmaßnahme existierten. Die Novelle führte eine einheitliche Basis zur Umsetzung der Schutzmaßnahme ein, wobei eine gewisse Offenheit in der Ausgestaltung der Maßnahme durch die in § 45b Abs. 6 BNatSchG vom Gesetzgeber getroffene Formulierung „Fachlich anerkannte Schutzmaßnahmen für die in Anlage 1 Abschnitt 1 genannten Brutvogelarten sind **insbesondere** die in Anlage 1 Abschnitt 2 genannten Schutzmaßnahmen." eingeräumt wird. Durch die BNatSchG-Novelle wurden im Vergleich zu den Länderleitfäden insbesondere die Dauer der Abschaltung und der relevante Radius um die WEA größtenteils reduziert, bestimmte Optionen (z. B. Mindestflächengrößen) wurden wiederum nicht standardisiert. Nach Inkrafttreten der BNatSchG-Novelle informierten teilweise die ländereigenen Umweltministerien zum Teil über die nun geltenden Neuerungen, wobei Übergangsfristen gewährt wurden. Für bereits gebaute bzw. genehmigte Windparks und solche Vorhaben, die bis zur Übergangsfrist bereits beantragt waren, gelten weiterhin die seinerzeit gültigen Vorgaben aus den Länderleitfäden. Trotz der nun geschaffenen einheitlichen Gesetzeslage, kommen daher abhängig von Bundesland und Alter der Genehmigung verschiedene Maßnahmenkriterien in den Nebenbestimmungen zum Tragen.

Das OVG Münster urteilte am 29.11.2022, dass „[…] *zur Herabsetzung des Tötungsrisikos für den Rotmilan unter die Signifikanzschwelle in der Regel bereits eine der dort (Hinweis) aufgeführten Schutzmaßnahmen genügt. Dabei kann es sich auch um eine Abschaltung bei landwirtschaftlichen Ereignissen handeln, die nicht derjenigen nach Abschnitt 2 der Anlage 1*

zu § 45b Abs. 1 bis 5 BNatSchG entspricht, aber fachlich anerkannt und gleichwertig ist“ (Az.: 22 A 1184/18). Unter artenschutzrechtlicher Betrachtung sind dementsprechend weiterhin unterschiedliche Auslegungen der Schutzmaßnahme, wie sie in den Länderleitfäden aufgeführt sind, anwendbar, wenn diese fachlich anerkannt und gleichwertig sind. Insgesamt darf die in den Nebenbestimmungen festgesetzte Schutzmaßnahme nicht zu strengeren Auflagen führen, gerade auch vor dem Hintergrund der Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit bzw. Zumutbarkeit der Maßnahmen (vgl. Kap. 4.5).

Darüber hinaus weisen sowohl die in den ländereigenen Regelungen als auch die in den in § 45b BNatSchG Anlage 1 Abschnitt 2 getroffenen Formulierungen eine gewisse Unklarheit auf, die zu unterschiedlichen Auslegungen und damit zu unterschiedlichen Umsetzungen der Maßnahme führen kann. Vor allem die zeitliche Vorgabe, ab wann und für wie lange die WEA bei und nach relevanten Bewirtschaftungsereignissen explizit abzuschalten ist, lässt teilweise Spielraum für Interpretationen und kann insbesondere bei der Maßnahmenumsetzung mittels klassischer Meldekette zu Unklarheiten führen (gemeldeter Beginn vs. tatsächlicher Beginn der Bewirtschaftung auf der relevanten Ackerfläche; erneute Meldung bei Beendigung der Bewirtschaftung vs. keine weitere Meldung der Beendigung).

In manchen Länderleitfäden sind auch die Angaben bezüglich der relevanten Monate uneindeutig definiert. Zeitangaben wie etwa „von April bis September“ lassen offen, ob der September noch zu berücksichtigen ist, oder die Vermeidungsmaßnahme nur bis Ende August Anwendung finden soll (z. B. Leitfaden Thüringen TLUG (2017)). Im Leitfaden des Landes Schleswig-Holsteins wird sogar nur das Ende des Maßnahmen-Zeitraums mit „bis zum 31.08.“ definiert (MELUND & LLUR (2017) und MELUND & LLUR (2021)), womit die Maßnahme bereits ab 1.1. eines jeden Jahres angewendet werden müsste.

Unmissverständliche Formulierungen innerhalb des § 45b BNatSchG Anlage 1 Abschnitt 2 und der Länderleitfäden wären zukünftig wünschenswert, um einen einheitlichen Schutz der Brutvögel zu garantieren, die Arbeit der zuständigen Genehmigungsbehörden sowie der Betreiber von Windparks/WEA zu vereinfachen und um auch klare Anforderungen an die Nutzung technischer Detektionssysteme vorzugeben.

1.2 Umsetzung der ereignisbezogenen Abschaltung bei Bewirtschaftungsereignissen in der Praxis

1.2.1 Ist-Zustand

In der derzeitigen Praxis beruht die tatsächliche Umsetzung der in der Nebenbestimmung festgehaltenen Schutzmaßname meist auf einer Meldekette, die bei den bewirtschaftenden Landwirt*innen oder einer explizit für die Aufgabe eingesetzten Person („Parkwächter“) beginnt. Zwischen dem Betreiber und den betroffenen Landwirt*innen werden vertragliche Vereinbarungen getroffen, die als Nachweis zur grundlegenden Umsetzung der Maßnahme bei den Behörden dienen. In der Regel müssen die Landwirt*innen rechtzeitig (z. B. mindestens eine Stunde) vor Beginn der jeweiligen relevanten Bewirtschaftung die geplante Feldarbeit an den Betreiber der betroffenen WEA melden. Daraufhin wird je nach Nebenbestimmung eine zeitlich begrenzte Abschaltung der WEA erwirkt. Versäumnisse oder Fehler innerhalb dieser Meldekette können dazu führen, dass trotz relevantem Bewirtschaftungsereignis eine verspätete oder gar keine Abschaltung der WEA erfolgt. In der Schlussfolgerung werden die potenziell anwesenden, kollisionsgefährdeten Brutvögel einem erhöhten Verletzungs- und Tötungsrisiko ausgesetzt, insbesondere wenn solche Vorfälle

gehäuft auftreten. Eine unabhängige und vor allem zeitnahe Überprüfung, ob alle relevanten Bewirtschaftungsereignisse, die zu einer Abschaltung der WEA führen müssten, tatsächlich gemeldet wurden, ist in der Praxis kaum möglich.

Der Einsatz von unabhängigen Personen, z. B. Parkwächtern, würde zumindest eine korrekte Meldung über ein relevantes Bewirtschaftungsereignis ermöglichen, allerdings sind mit dieser Methode zusätzliche Mehrkosten für den Betreiber verbunden. Zudem kann die Meldung über relevante Bewirtschaftungsereignisse durch Parkwächter immer erst nach deren Beginn mit zudem variablem Zeitverzug erfolgen. Ohne solche unabhängigen Parkwächter kann allenfalls anhand der angebauten Feldfrüchte oder der Nutzung der Flurstücke im relevanten Radius um die WEA nach der abgeschlossenen Anbauphase geprüft werden, ob für diese Art der Ackernutzung die Anzahl an Abschaltungen der WEA sinnvoll übereinstimmt. Diese Methode zeigt allerdings nur bereits eingetretene Versäumnisse auf, die wahrscheinlich zu einem Verstoß gegen die behördlich festgesetzten Auflagen geführt haben. Überprüfungsmethoden, die bei Meldeversäumnissen dem Verletzungs- und Tötungsrisiko zeitnah entgegenwirken, sind beim derzeit angewandten Vorgehen nicht oder nur stichprobenartig zu erwarten.

Es ist davon auszugehen, dass die Wahrscheinlichkeit von versäumten Meldungen steigt, je mehr bewirtschaftende Landwirte innerhalb des relevanten Radius um eine WEA oder einen Windpark aktiv sind. Neben der Zuverlässigkeit der Landwirtinnen und Landwirte kann hierbei ebenso das Wetter eine Rolle spielen. Entscheidungen über erforderliche Bewirtschaftungsereignisse sind stark von geeigneten Witterungsbedingungen abhängig. Unter Umständen führen Wetterumschwünge oder nur kurzfristige Zeitfenster mit geeigneten Bedingungen zu extremen Arbeitsspitzen. In solchen Stresssituationen können Meldeauflagen vergessen werden. Zudem kann der „Faktor Mensch“ in der Meldekette ganz generell fehleranfällig sein. Andersherum können Anlagen durch Fehler in der Meldekette auch fälschlicherweise abgeschaltet werden und somit Ertragsverluste entstehen. Letztendlich haftet der Betreiber für einen ordnungsgemäßen Betrieb seiner Anlagen.

1.2.2 Funktionsweise von sensorbasierten Systemen

Um die vorher angesprochenen, potenziellen Fehlerquellen innerhalb der Meldekette der Vermeidungsmaßnahme zu umgehen, um Aufwand und Kosten für Verträge mit den betroffenen landwirtschaftlichen Betrieben einzusparen und behördliche Überprüfungen zur Einhaltung der Maßnahme zu erleichtern, untersucht die vorliegende Machbarkeitsstudie, ob sensorbasierte Systeme mit automatisierter Bewirtschaftungserkennung die Umsetzung der Schutzmaßnahme „Abschaltungen bei landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignissen“ optimieren können. Aus naturschutzfachlicher Sicht muss ein solches System mindestens so zuverlässig sein wie die bisher gängige „menschenbasierte“ Methode. Alleine die Nachvollziehbarkeit der Abschaltungen birgt einen großen Vorteil der sensorbasierten Systeme gegenüber der klassischen Meldekette. Dabei erfolgt die Detektion von landwirtschaftlichen Ereignissen automatisiert (vgl. Kap. 2), die Klassifizierung und die darauffolgende Meldekette mit Systemreaktion können hingegen assistiert, teilautomatisiert oder autonom umgesetzt werden.

1.2.2.1 Detektion

Essenzielle Grundlage ist hierbei die sichere Erfassung des relevanten Bewirtschaftungs-ereignisses, zumeist über die Erkennung von bewirtschaftenden Fahrzeugen im relevanten Umkreis um die WEA. Bei der reinen Erkennung sollte ein kamerabasiertes System so angelegt

sein, dass eine Detektionsquote von > 90 Prozent erreicht wird. Über den nachgeschalteten Schritt der Klassifizierung werden dann relevante und nicht relevante Detektionen gefiltert. In der Praxis kann die Detektion durch die lokale Topografie und Landschaftsstrukturen wie Hecken, Feldgehölze und Wälder erschwert werden, wenn diese die Sicht der Kamera auf die relevante Umgebung einschränken. In den meisten Fällen wird ein Bewirtschaftungsereignis wohl nicht komplett unentdeckt bleiben, dennoch wird auch der Installationsort des Kamerasystems im Windpark bzw. an der WEA bei der erfolgreichen Erkennung von Fahrzeugen von Belang sein. Entsprechend muss der Installationsort unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten und der technischen Spezifikationen (z. B. Öffnungswinkel der verwendeten Kameras) immer individuell festgelegt werden, um eine bestmögliche Abdeckung der Umgebung zu gewährleisten.

Neben der eingeschränkten Sicht durch lokale Gegebenheiten kann die Erkennung auch bei nächtlicher Bewirtschaftung erschwert werden. Durch die heutige Ausstattung von Landmaschinen mit starken Scheinwerfern ist die nächtliche Bewirtschaftung insbesondere zu arbeitsintensiven Zeiten wie der Ernte keine Seltenheit mehr. Natürlich fliegen die kollisionsgefährdeten Arten, für die eine Lockwirkung besteht, nicht zu Nachtzeiten. Dennoch bleiben die nächtlich bewirtschafteten Flächen auch tagsüber für Arten wie z. B. Rotmilan und Schwarzmilan attraktiv und dies ggf. für mehrere Tage (ÖKOTOP & FÖA Landschaftsplanung (2023)). Zur Detektion eingesetzte Kamerasysteme müssen dementsprechend auch in Dunkelheit bewirtschaftende Fahrzeuge innerhalb des relevanten Umfelds erkennen, um in den Folgetagen Schutzmaßnahmen zu aktivieren. Für Systeme, die Bewirtschaftungsereignisse bzw. die Anwesenheit eines landwirtschaftlichen Geräts für eine relevante Bewirtschaftungsform mittels GPS-Signal erfassen (vgl. Kap. 2.5.3), verursacht die Detektion zur Nachtzeit keinen zusätzlichen technischen Aufwand.

Sowohl tags als auch nachts muss das Kamerasystem die räumlichen Vorgaben zum relevanten Bereich berücksichtigen. Um unnötige Abschaltungen zu vermeiden (siehe auch 1.2.2.2) und erforderliche Abschaltungen zu gewährleisten, müssen eingesetzte Kamerasysteme nur Ereignisse innerhalb des relevanten Bereichs berücksichtigen. Dies wird für die meisten kamerabasierten Systeme über die Maskierung nicht-relevanter Bereiche (Straßen und Feldwege werden ausgeschlossen; Felder, die weiter als der relevante Prüfbereich entfernt liegen werden ausgeschlossen) und für GPS-basierte Systeme über Geofencing erfüllt. Dies trägt dazu bei, zuverlässige Detektionen zu erzeugen, die in Folge die Einhaltung der naturschutzrechtlichen Vorgaben sichern (KNE 2024).

1.2.2.2 Klassifizierung

Nach der erfolgreichen Detektion von möglichst allen landwirtschaftlichen Fahrzeugen durch ein kamerabasiertes System, erfolgt die Klassifizierung in naturschutzrechtlich relevante und nicht-relevante Bewirtschaftungsereignisse. Um falsche Klassifizierungen zu vermeiden, die falsch-positive Abschaltungen (unnötige Abschaltungen mit entsprechenden Einbußen bei der Stromerzeugung) oder falsch-negative Abschaltungen (nicht erfolgte, eigentlich notwendige Abschaltungen mit einhergehender akuter Gefährdung kollisionsgefährdeter Brutvögel) nach sich ziehen würden, muss das eingesetzte System (oder die entsprechende Reaktionskette – s.u.) verlässlich alle relevanten Ereignisse von nicht-relevanten unterscheiden können. Relevante Ereignisse sind nach BNatSchG die Ernte von Feldfrüchten, die Mahd von Grünland und das Pflügen von Ackerboden. Zusätzlich können je nach Bundesland und spezifischem Länderleitfaden (vergleiche Kap. 1.1.2.3) weitere Ereignisse inkludiert sein, wie etwa das Mulchen oder Grubbern.

Wie ein autonomes System zur korrekten Klassifizierung der Ereignisse kommt – sei es über die eingesetzten Geräte, Fahrzeuge, Fahrweisen, Veränderungen der Bodenbeschaffenheit oder einer Kombination aus diesen Aspekten – ist dabei nicht einzuschränken, solange die Funktionsweise nachvollziehbar dokumentiert und die Funktionsfähigkeit belegt wird. Die korrekte Klassifizierung ist derzeit der kritischste Punkt in der erfolgreichen Anwendung einer autonomen kamerabasierten Abschaltung, siehe auch Kap. 2. Systemhersteller sollten vor dem empfohlenen Einsatz in der Schutzmaßnahme die in Kap. 4.3 beschriebene Erprobung durchlaufen und Eckdaten nachweisen können, die die Einhaltung naturschutzrechtlicher Bestimmungen gewährleisten. Denn wird ein relevantes Bewirtschaftungsereignis nicht als solches erkannt, bleibt die erforderliche Abschaltung der WEA aus. Somit sind die lokalen Brutvögel einem Verletzungs- und Tötungsrisiko ausgesetzt, das unter Umständen signifikant erhöht sein kann, womit ein Verstoß gegen das Bundesnaturschutzgesetz vorliegt. Falsch-positive Klassifizierungen bedeuten wiederum unnötige Abschaltungen, die zu Ertragseinbußen für die Betreiber führen.

1.2.2.3 Meldekette und Systemreaktion

Der letzte Schritt innerhalb der Schutzmaßnahme „Abschaltungen bei landwirtschaftlichen Ereignissen“ ist die tatsächliche Abschaltung bzw. Abregelung der WEA, sobald ein relevantes Ereignis klassifiziert wurde. Erst mit der umgesetzten Abschaltung/Abregelung für den nach Nebenbestimmung und erfolgtem Ereignis festgelegten Zeitraum ist die Entscheidungs- und Meldekette vollständig und das erhöhte Verletzungs- und Tötungsrisiko für das Ereignis gesenkt. Ob assistiert, teilautomatisiert oder autonom, die Weiterleitung des Signals zur Abschaltung muss verlässlich funktionieren. Bei assistierten Systemen wird die Betriebsführung über die Detektion eines relevanten Ereignisses informiert. Anhand mitgelieferter Bilder entscheidet diese, ob es sich um ein abschaltrelevantes Ereignis handelt oder nicht und leitet dementsprechend die nächsten erforderlichen Schritte ein. Teilautomatisiert arbeitende Systeme lösen nach erfolgter Detektion eines relevanten Ereignisses selbständig eine Abschaltung der WEA aus, was durch die Betriebsführung nach Kontrolle ggf. rückgängig gemacht werden kann. Bei autonomen Systemen entfällt die Überprüfung durch die Betriebsführung, das System entscheidet eigenständig. Detaillierte Ausführungen zu den drei System-Typen sind in Kap. 4 zu finden.

An dieser Stelle können keine pauschalen, biologisch begründbaren Latenzzeiten genannt werden, die zwischen dem tatsächlichen Beginn des relevanten Ereignisses über die Detektion, Klassifizierung bis zur erforderlichen Abschaltung/Abregelung der WEA vergehen dürfen. Denn wie schnell ein Bewirtschaftungsereignis und dessen Lockwirkung zu tatsächlich anwesenden, kollisionsgefährdeten Brutvögeln führt, ist sehr stark von der jeweiligen Situation abhängig (vgl. Kap. 1.1.1). Neben der Fluggeschwindigkeit der einzelnen Vogelarten und deren Verbreitung im Einzugsbereich (insbesondere Brutvorkommen) wird die Attraktionswirkung einer ausgewählten Fläche u. a. auch von der Lebensphase der lokalen Brutvögel, der Topografie, der allgemeinen Nahrungsverfügbarkeit innerhalb des Aktionsraums der lokal agierenden Vögel, von weiteren Bewirtschaftungsereignissen im räumlichen Kontext und der angebauten bzw. bearbeiteten Feldfrucht beeinflusst. Erstrebenswert ist eine Latenzzeit von maximal etwa 20 Minuten zwischen Detektion und Stillstand/Trudelbetrieb der WEA.

2 Stand der Technik

2.1 Datengrundlage: Herstellerinterviews

Die im Folgenden dargestellten technischen Erkenntnisse basieren auf strukturierten Herstellerinterviews, die im Zeitraum 28. August bis 9. September 2025 durchgeführt wurden.

Befragt wurden:

- FlexiMaus GmbH (Interview am 28.08.2025)
- Comp-Pro Systemhaus GmbH (Interview am 04.09.2025)
- sciota GmbH (Interview am 04.09.2025)
- ATEG Automation GmbH / SELA-System (Interview am 09.09.2025)

Die Gespräche verliefen in einer offenen, konstruktiven und transparenten Atmosphäre und ermöglichten wertvolle Einblicke in aktuelle Entwicklungsansätze. Den beteiligten Unternehmen gilt an dieser Stelle ein herzlicher Dank für ihre Offenheit und die Bereitschaft zur Mitwirkung.

Die Auswahl der Hersteller erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit[1]. Als Ergänzung flossen öffentliche Informationen anderer Anbieter, eigene Fach- und Markteinschätzungen sowie recherchierte Herstellerunterlagen mit ein.

Rückschlüsse auf Aussagen oder Bewertungen einzelner Unternehmen sind daher nicht möglich, da die Darstellungen aggregiert und durch ergänzende Quellen und fachliche Einschätzungen validiert wurden.

2.2 Ziel und Abgrenzung

Ausgehend von den in Kap. 1 skizzierten Zielen und Rahmenbedingungen fokussiert dieser Abschnitt ausschließlich auf die technischen Aspekte und die Realisierbarkeit von Systemen zur automatisierten Erkennung abschaltrelevanter Bewirtschaftungsereignisse im Umfeld von WEA. Betrachtet werden die Prozessschritte der Kette

Erfassung → Entscheidung → Reaktion → Nachweis.

Naturschutzfachliche und -rechtliche Fragen, Datenschutz und Anerkennungsverfahren werden in den Abschnitten 1, 3 und 4 behandelt und hier nur insoweit aufgegriffen, wie sie die technische Auslegung beeinflussen.

Ausgangspunkt sind der gesetzliche Radius von 250 m und die einschlägigen Tätigkeiten Mahd, Ernte, Bodenbearbeitung gemäß § 45b BNatSchG (Anlage 1). Ziel ist eine herstellerunabhängige Einordnung der heute verfolgten Technologiepfade, ihrer Leistungs-grenzen und Integrationsanforderungen sowie die Ableitung technischer Mindestkriterien und Entwicklungsbedarfe. Die Aussagen stützen sich auf strukturierte Herstellerinterviews (s. Kap. 2.1) und ergänzende Unterlagen. Zuordenbare Hersteller- und Personennamen werden nicht genannt, die Darstellungen erfolgen aggregiert.

[1] Es sind jene Hersteller ausgewählt worden, die auch in der aktuellen Systemübersicht des KNE aufgeführt sind: KNE (2025): Systemübersicht – Technische Detektionssysteme zur Abschaltsteuerung bei landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignissen.

2.3 Methodisches Vorgehen

Die mit Herstellern geführten Interviews folgten einem Leitfaden mit den Blöcken Systembeschreibung, Sensorik und Abdeckung, Klassifikation und KI, Systemintegration und Reaktion, Nachweis und Validierung, IT-Sicherheit und Datenschutz, Wirtschaftlichkeit sowie Weiterentwicklung. Für dieses Kapitel wurden die Inhalte in vier Blöcken verdichtet: (1) Technologiepfade und Architekturen, (2) Funktionskette und Leistungsfähigkeit, (3) Betrieb, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit, (4) Reifegrad, Validierung und Mindestanforderungen. Dadurch werden Dopplungen reduziert und die Ergebnisse entlang der technischen Kette eingeordnet. Prozentuale Angaben zur Leistungsfähigkeit der Systeme – etwa zu Detektionsraten, Klassifikationsgüte oder Fehlalarmen – beruhen, sofern nicht anders gekennzeichnet, auf Herstellerangaben. Eine externe, methodisch einheitliche Validierung wird in Kap. 4.3.2 adressiert.

2.4 Technische Anforderungen an automatische Systeme

Automatische Systeme sollen in heterogenen Windparkanordnungen, wechselnden Bewirtschaftungsrhythmen und unter variabler Witterung gleichbleibend zuverlässig arbeiten. Unabhängig vom Technologiepfad lassen sich die im Folgenden aufgeführten Grundanforderungen formulieren.

2.4.1 Abdeckung und Geometrie

Der Radius von 250 m um eine WEA ist vollständig, ohne blinde Zonen, zu überwachen. Topografische Abschattungen (Geländekanten, Hecken, Gebäude) sind in der Planung explizit zu berücksichtigen. Für optische/thermische Systeme (s. Kap. 2.5) bedeutet dies standortspezifische Montagehöhen, überlappende Sichtfelder und Maskierungen für Wege/Verkehrsflächen. Für positionsbasierte Systeme (GPS) (s. Kap. 2.5) ist die Qualität der Geofences (Parkgrenzen, Flurstücksgeometrien) und Wegenetze maßgeblich.

2.4.2 Zeitliche Eigenschaften

Detektion, Entscheidung und Reaktion müssen in operativ kurzen Latenzen ablaufen. Für vollautomatisierte Abschaltungen sind End-to-End-Laufzeiten im Bereich von Minuten vorzusehen. Teilautomatisierte Konzepte können längere Bestätigungsfenster vorsehen, dürfen jedoch einen artenschutzfachlich angemessenen sowie ggf. behördlich geforderten Beginn der Stillstandszeit nicht verfehlen (vgl. Kap. 1.2.2.3). Eine präzise, synchronisierte Zeitbasis ist Voraussetzung für konsistente Protokolle.

2.4.3 Semantische[2] Entscheidung

Nicht jede Bewirtschaftungsaktivität ist abschaltrelevant. Autonome Systeme müssen relevante Tätigkeiten (Grünlandmahd, Feldfruchternte, Pflügen) von nicht-relevanten Aktivitäten (z. B. Eggen, Düngung, Transitfahrten) unterscheiden. Dies kann je nach System bildbasiert (Klassifikation von Anbaugeräten und Bewegungsmustern), thermisch-regelbasiert (Mustererkennung, Bewegungs-Trajektorien) oder datensemantisch (ERP-Aktivitäts-kennzeichen, Geräte-Tracker/GPS) erfolgen. Kurze Verzögerungsfenster (10 - 20 Minuten)

[2] „Semantisch“ bezeichnet in diesem Zusammenhang die inhaltliche Bedeutung von Maschinen- und Bewegungsdaten, also deren Zuordnung zu einer konkreten Tätigkeit oder Funktion (z. B. Mahd, Transport, Düngung).

können nicht abschaltrelevante Aktivitäten abfangen, dürfen aber den wirksamen Beginn einer relevanten Tätigkeit nicht überdecken. Dabei werden die erkannten Bewegungen über mehrere Zeitpunkte hinweg ausgewertet, so dass das System das Verhalten der Fahrzeuge im Verlauf beurteilen kann. Auf diese Weise lässt sich besser erkennen, ob es sich tatsächlich um eine relevante Bewirtschaftungstätigkeit handelt oder nur um eine vorübergehende, nicht abschaltrelevante Bewegung.

2.4.4 Schnittstellen und Sicherheit

Die Anbindung der Detektionssysteme an die WEA-Steuerung erfolgt über standardisierte Schnittstellen (z. B. SCADA oder vergleichbare Protokolle). Rückmeldungen der WEA zur Freigabe/Abschaltung werden berücksichtigt und die Hersteller betonten die Notwendigkeit von Sicherheitsmaßnahmen zur Absicherung der Kommunikationswege und zur Nachvollziehbarkeit von Änderungen.

2.4.5 Nachweisfähigkeit

Ereignisse müssen durch revisionssichere Zeit- und Zustandslogs belegt werden.[3] Wo bildgebende Sensorik eingesetzt wird, sind ereignisbezogene Sequenzen oder Ausschnitte zu speichern. Bei positionsbasierten Systemen treten Pfad- und Aktivitätsprotokolle an diese Stelle. Exportformate sind so zu wählen, dass Betreiber und Behörden die Nachweise konsistent prüfen können.

2.4.6 Betriebsfestigkeit und Wartbarkeit

Zustandsüberwachung der Sensorik (Temperatur, Versorgung, Verschmutzung), Fernwartungsfähigkeit und eine klare Störfalllogik (Ausfall-Sicherheitsstrategie/„Fail-Safe“) sind Bestandteil der Auslegung. Für lernende Komponenten (KI-Modelle) sind standortspezifisches Fine-Tuning/Nachtrainieren sowie Prozesse für deren Versionierung vorzusehen.

2.5 Technologiepfade und Architekturen

2.5.1 Optische Systeme (RGB/visuell)

Optische Systeme können Übersichts- und Aufklärungssensorik kombinieren. Für die Übersicht dienen meist Panorama- oder Mehrfach-Weitwinkelkameras, die Bewegungen und Konturen im Sichtfeld erkennen. Bedarf es einer zusätzlichen Aufklärung des Ereignisses, kann beispielsweise eine schwenk-/neigbare RGB-Zoomkamera (Pan-Tilt-Zoom - PTZ) übernehmen, die detektierten Bereiche automatisch anfahren und zusätzliche hochaufgelöste Sequenzen liefern. Aufgezeichnete Sequenzen werden sowohl maschinell (Klassifikation von Anbaugeräten, Bewegungsmustern) als auch menschlich (assistierte bzw. teilautomatisierte Systeme) bewertet. Für den Nachtbetrieb können IR-Scheinwerfer eingesetzt werden, etwa zur Detektion von nächtlich begonnenen Bewirtschaftungsereignissen. Denn auch wenn Abschaltungen gemäß geltendem Rechtsrahmen nur tagsüber erfolgen, ist dennoch eine nächtliche Erfassung der Bewirtschaftungen relevant. Die Reichweite aktiver IR-Beleuchtung

[3] Im 2. Praxisworkshop zu dieser Machbarkeitsstudie wurde von Behördenvertreter*innen und Fachgutachter*innen übereinstimmend betont, dass Abschaltungen ohne dokumentierten Auslöser nicht als ausreichend prüf- und nachvollziehbar angesehen werden. Erforderlich ist eine ereignisbezogene Dokumentation, die eine Unterscheidung relevanter Bewirtschaftungsvorgänge von irrelevanten Aktivitäten ermöglicht.

ist physikalisch begrenzt, weshalb Blendungen und Reflexionen bei der Parametrisierung und Auslegung zu berücksichtigen sind.

Die Verarbeitung erfolgt meist „Edge-nah“ im Turm (Recorder/Industrie-PC vor Ort) mit optionaler Analyse auf einem externen Server (On-Premises/Cloud). Die Koppelung zur WEA läuft über SCADA-Schnittstellen oder über eine separate, sicherheitsgerichtete Signalkette. Pro Anlage können je nach Topografie, Vegetation und Verkehrsflächen zwei bis acht Kameras notwendig sein. In dichten Parks werden Sichtfelder benachbarter Anlagen vernetzt, um Abschattungen zu vermeiden. Die Stärken liegen in der Interpretierbarkeit sowie in der Möglichkeit, aussagekräftige Nachweisbilder zu erzeugen. Grenzen zeigen sich bei Dämmerung, Nebel, Gegenlicht, Regen sowie in komplexen Hintergründen. Eine standortspezifische Ausrichtung und Maskierung sind zwingend. Testfahrten zur Inbetriebnahme sind gängige Praxis.

2.5.2 Thermische Systeme (IR/Wärmebild)

Thermalsensoren detektieren Maschinen über Temperaturkontraste. Industrietaugliche Detektoren mit hoher thermischer Auflösung ermöglichen eine robuste Erfassung auch bei Nacht, Dunst oder Regen. In der Praxis wird der 250-m-Bereich in mehrere kleine polygonale Messfelder untergliedert, welche kontinuierlich auf Strukturänderungen überwacht werden. Straßen, Parkplätze und technische Hotspots[4] werden analog der RGB-Systeme als Ausnahmeflächen maskiert. Die Tätigkeitseinordnung erfolgt nach aktuellem Stand u. a. hybrid, d. h. thermisch für eine sichere Detektion, ergänzt durch eine visuelle PTZ-Kamera für die Klassifikation und Nachweisbilder. Architekturseitig ähneln thermische Lösungen den optischen Systemen (Edge-Verarbeitung bzw. serverseitige Analyse). Der Montage- und Kostenaufwand ist hier deutlich höher als bei RGB-Kameras. Dafür ist die witterungsunabhängige Sicht- und Nachttauglichkeit überlegen. Je nach Gelände werden ebenfalls zwei bis acht Module pro Anlage benötigt. Lücken lassen sich auch hier durch Nachbaranlagen schließen. Der Mehrwert zeigt sich besonders bei regelmäßiger Nachtbewirtschaftung oder häufigem Dunst/Nebel.

2.5.3 Positions- und aktivitätsbasierte Systeme (GPS/ERP/Tracker)

Eine zweite Entwicklungslinie automatischer Systeme verzichtet weitgehend auf Bilddaten. Ereignisse werden aus georeferenzierten Bewegungs- und Aktivitätsdaten abgeleitet: aus landwirtschaftlichen Betriebsführungssystemen (Enterprise Resource Planning – ERP-Systeme) oder aus externen Trackern (GPS) an den Maschinen oder gezielt an den Bewirtschaftungsgeräten. Die Systemlogik verschneidet diese Bewegungsdaten mit Geofences (Parkgrenzen, Prüfradien) und Wegenetzen. Relevanz entsteht semantisch: Ein am Pflug angebrachter Tracker oder eine ERP-Aktivitätsmarke liefert die Tätigkeit direkt mit und reduziert so strukturell falsch-positive Abschaltungen. Die Architektur ist plattformzentriert: Daten werden sicher aufgenommen, in Echtzeit mit den relevanten Flächen verschnitten und als Ereignisse an Betriebsführung und WEA übergeben. Visuelle Sensorik ist somit nicht zwingend, kann aber zur Evidenz in Konfliktzonen, wie bei GPS-Störungen durch schlechte Signalqualität oder unklaren Bewegungsmustern, ergänzt werden. Stärken dieser Entwicklungslinie sind Wetter-/Nachtunabhängigkeit, sehr geringe Falsch-Positiv-Raten bei

[4] Technische Hotspots sind Bereiche technischer Infrastruktur (z. B. Trafostationen, Serviceflächen oder WEA-nahe Betriebsbereiche), in denen regelmäßige nicht-landwirtschaftliche Aktivitäten auftreten und daher maskiert werden müssen.

irrelevanten Aktivitäten sowie exakte zeitliche Zuordnung. Herausforderungen sind jedoch die Gewährleistung der Ausrüstung aller relevanten Arbeitsgeräte, die kontinuierliche Datenqualität und insbesondere die Kooperationsbereitschaft der Bewirtschaftenden. Investitionen liegen parkweit oft im mittleren fünfstelligen Bereich, wobei die Bewirtschaftenden in der Regel zusätzlich zu vergüten sein werden. Dafür beschränkt sich der laufende Aufwand auf Batteriewechsel (Mehrjahreszyklus) und die Pflege der Betreiberplattform.

2.6 Funktionskette und Leistungsfähigkeit

2.6.1 Abdeckung, Nacht- und Witterungstauglichkeit

Die lückenlose Abdeckung des 250-m-Radius ist die Kernanforderung. Optische und thermische Systeme erreichen sie durch geeignete Montagehöhen, überlappende Sichtfelder und, wo möglich, durch Mitnutzung benachbarter Anlagen. Masken für Wege und Straßen sind Standard, um Fahrzeugverkehr und damit mögliche falsch-positive Detektionen einzugrenzen sowie ggf. den Anforderungen des Datenschutzes gerecht zu werden (s. Kap. 3). Optische Systeme benötigen für die Nacht eine sorgfältig konzipierte IR-Beleuchtung (Reichweite, Blendungen, Reflexionen), die sich als komplex und standortabhängig erweist. Thermalsensorik ist hier deutlich robuster. Positionsbasierte Systeme sind unabhängig von Sichtbedingungen. Hier hängt die Abdeckung an der Geometrie und Qualität der Geofences sowie an der Semantik der Aktivitätsdaten. Bewährt sind bei visuellen Systemen laut Hersteller drei Schritte: (1) Sichtfeldsimulation mit topografischen Daten oder Drohnenflügen, (2) Inbetriebnahme-Testfahrten (Tag/Nacht) zur Parametrisierung von Schwellen und Masken, (3) periodische Überprüfung nach Vegetations- oder Wegeänderungen. Für positionsbasierte Ansätze treten an ihre Stelle (1) Verfügbarkeits-Tests (ERP-Schnittstellen, Trackerverfügbarkeit), (2) Pflege von Flächen- und Wegenetzdaten, (3) Monitoring von Batterieständen und Wartung der Tracker.

Zusätzlich zur Fahrzeugdetektion können auch Veränderungen der Untergrundbeschaffenheit nach der Bearbeitung eines Feldes, z. B. durch Mahd, als signifikante Marker genutzt werden. Besonders bei Nacht oder unter schlechten Wetterbedingungen, in denen visuelle Sensorik über längere Zeiträume hinweg beeinträchtigt sein kann, bietet die Erkennung solcher Änderungen eine wertvolle Ergänzung zur Identifikation relevanter Aktivitäten.

2.6.2 Klassifikation relevanter Tätigkeiten und KI-Nachtraining

Die sichere Unterscheidung zwischen relevanten (Mahd, Ernte, Pflügen) und irrelevanten Aktivitäten (z. B. sonstige Bodenbearbeitung, Düngung, reine Durchfahrten) ist der zentrale Leistungshebel. Visuelle Systeme setzen zunehmend auf Deep-Learning-Modelle, insbesondere Faltungsnetze (CNNs) und Transformer-Modelle, um Anbaugeräte und Bewegungsmuster zuverlässig zu erkennen [Krizhevsky et al., 2012; Dosovitskiy et al., 2021]. Ergänzt werden diese Architekturen durch Sequenzverfahren wie 3D-Faltungsnetze (3D-CNNs) oder Methoden mit zeitlicher Aufmerksamkeit, die Arbeitsfahrten, Verhaltensmuster und Stillstände im zeitlichen Kontext analysieren und so die Klassifikationsgenauigkeit über Sequenzen hinweg erhöhen [Tran et al., 2015; Hou et al., 2021]. Im Rahmen dieser Studie wird folgend nicht näher auf die spezifischen Modellarchitekturen eingegangen. Sie werden hier exemplarisch als Stand der Technik genannt, um die immense Bandbreite aktueller KI-Ansätze aufzuzeigen. Im Vordergrund stehen die technische Leistungsfähigkeit und Übertragbarkeit dieser Ansätze.

Die Güte der Modelle wächst mit der Varianz und Kuratierung der Trainingsdaten. Anbieterübergreifende Benchmarks fehlen bislang (s. auch Kap. 4.3). Thermalsysteme nutzen laut Hersteller bisher häufig regelbasierte Muster (Signatur, Verweildauer, Trajektorie) und gewinnen in hybrider Kombination mit visueller Aufklärung deutlich an Schärfe. Auch bei dieser Technologie kann der Einsatz von KI-Algorithmen die Klassifikationsgenauigkeit weiter steigern und Unsicherheiten bei der Tätigkeitserkennung reduzieren. Positionsbasierte Systeme verlagern die Klassifikation in die Quelle: Ein Geräte-Tracker oder ein ERP-Eintrag liefert die Semantik direkt und umgeht damit die Probleme optischer Systeme.

Zwei Fehlerbilder prägen die Auslegung:

- **Falsch-negative Detektionen** (übersehene relevante Tätigkeit) sind artenschutzrechtlich kritisch. Sie treten optisch vermehrt am Radiusrand, bei Abschattung oder starken Lichtwechseln auf. Gegenmaßnahmen sind überlappende Sichtachsen, konservative Schwellen, redundante Pfade oder, falls verfügbar, semantische Bestätigungen aus ERP/Trackern.
- **Falsch-positive Detektionen** (fälschlich relevante Tätigkeit) verursachen unnötige Stillstände. Sie entstehen typischerweise durch Kontrollfahrten, kurze Randbefahrungen oder irrelevante Anbaugeräte. Hier helfen räumliche Masken, Wegenetzfilter, kurze Verzögerungsfenster (typisch 10 – 20 Minuten) sowie in hybriden Systemen die Aufklärung per PTZ-Kamera für eine nachgelagerte robustere Verifikation.

Ein wiederkehrender Punkt ist der sogenannte „Domain-Shift“ nach der Inbetriebnahme: Geräteflotten, Bodenfarben, Bewirtschaftungsrhythmen und Topografie unterscheiden sich zwischen Standorten. Standortspezifisches Nachtrainieren der Modelle, sogenanntes „Fine-Tuning“ bzw. „Domain-Adaption“ mit sorgfältig ausgewählten lokalen Sequenzen aus einer Kalibrierphase, senkt Fehlerraten spürbar. Dafür braucht es klare Prozesse für Datenauswahl, Datenbeschriftung (Annotation/Labeling) und Versionierung sowie eine kontrollierte Bereitstellung neuer Modellstände, was zusätzlichen Aufwand und Komplexität in den Einzelsystemen mit sich bringt. Wo kein Nachtraining vorgesehen ist, können konservativere Schwellen und semantische Redundanzen Restunsicherheiten abfedern. Perspektivisch ist ein anonymisierter Referenzkorpus entscheidend, um die Übertragbarkeit zwischen Standorten methodisch zu prüfen und damit abzusichern, s. auch Kap. 4.3.2.4.

2.6.3 Reaktionskette, Schnittstellen und Automatisierungsgrade

Die Anbindung der Systeme an die WEA erfolgt nach Herstellerangaben meist entweder über bestehende Steuerschnittstellen (z. B. SCADA oder Modbus) oder über potenzialfreie Kontakte, die direkt in den Abschaltkreis eingebunden werden. Die kontaktbasierte Variante wird von mehreren Anbietern als robuste und universell einsetzbare Lösung beschrieben, da sie unabhängig von der Steuerungstechnik des WEA-Herstellers funktioniert. Die softwarebasierte Kopplung über SCADA- oder Modbus-Schnittstellen erlaubt hingegen eine differenziertere Kommunikation (z. B. Statusmeldungen oder Abregelungen), erfordert aber eine enge Abstimmung mit dem jeweiligen WEA-Hersteller. In beiden Fällen ist eine Rückmeldung der WEA über den erfolgten Entzug der Freigabe üblich und wird systemseitig dokumentiert.

In der Praxis werden drei Automatisierungsgrade der Abschaltung unterschieden:

- **Assistiert:** Das System detektiert und dokumentiert. Die Freigabeentziehung erfolgt manuell, häufig durch Betriebsführungen mit hoher Vor-Ort-Präsenz. Geeignet für kleine

Parks, in denen Telefonketten oder feste Bereitschaften verlässlich sind.

- **Teilautomatisiert:** Das System löst bei erkannter relevanter Tätigkeit automatisch eine Abschaltung der Anlage aus und informiert die Betriebsführung. Diese kann nachfolgend prüfen, ob die Abschaltung notwendig war, und die Anlage im Falle einer Fehlabschaltung manuell wieder freigeben. Dieses Vorgehen ermöglicht eine schnelle Reaktion bei gleichzeitiger Absicherung durch menschliche Kontrolle und wird aktuell in der Regel noch gewählt, um Restunsicherheiten in der Klassifikation abzufedern.
- **Autonom:** Bei positiver Relevanzentscheidung erfolgt die Abschaltung sofort. Die Wiederfreigabe erfolgt automatisch nach Ablauf der Vorgaben (Sonnenauf-/-untergang, Folgetage). Vorausgesetzt sind hierbei hohe Klassifikationssicherheit, ausfallsichere Strategien und eine dokumentierte Rückmeldelogik der WEA.

Für alle Varianten gilt: nachts müssen die Detektion und Protokollierung der Aktivitäten unverändert weiter erfolgen. Bei Systemen mit zeitabhängiger Steuerlogik werden Abschaltungen oder Wiederfreigaben an definierte Zeitpunkte, wie Sonnenaufgang oder den im Dämmerungskalender hinterlegten Zeitraum, gekoppelt.

2.6.4 Protokollierung und Nachweisführung

Für Betreiber und Behörden haben sich drei Elemente etabliert: (i) manipulationsresistente Zeitprotokolle mit WEA-Rückmeldung, (ii) ereignisbezogene Evidenzen (Bildsequenzen, Thermal-Signaturauszüge, Metadaten) und (iii) standardisierte Exporte bis hin zu automatisierten Statusmails im Ereignisfall. Die Speicherung kompletter Aufnahmen ist aus Datenschutz- und Speichergründen limitiert, aber nicht vollkommen ausgeschlossen. Ereignisbezogene Bildausschnitte sind hier gängige Praxis. Aufnahmen von Wärmebildkameras sind datenschutzseitig unkritischer (s. Kap. 3). Bei positionsbasierten Systemen bilden Pfad- und Aktivitätslogs den Nachweis. Ihre Integrität wird über Signaturen und Zugriffsprotokolle abgesichert. Für behördliche Kontrollen bewähren sich Ereignisprotokolle, WEA-Rückmeldungen und stichprobenweise Evidenzen sowie eine Kombination hieraus.

2.7 Betrieb, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit

2.7.1 IT-/OT-Sicherheit und Datenschutz

Alle betrachteten Systeme folgen möglichst dem Prinzip der Datensparsamkeit. Visuelle Systeme arbeiten mit Maskierungen, begrenzter Auflösung im Fernbereich über 250 Metern sowie kurzen Speicherfristen. IR-Systeme erfassen nicht identifizierbare Wärmesignaturen. Positionsbasierte Systeme vermeiden Personen- und Kennzeichendaten strukturell. Kommunikationspfade werden über VPN und Zertifikate gesichert und zusätzlich abgesichert durch gestufte Nutzerrechte und revisionssichere Änderungslogs. Bei einer Anbindung über SCADA-Schnittstellen ist laut Herstellern eine abgestimmte Integration mit der WEA-Steuerung erforderlich, um Daten sicher und störungsfrei zu übertragen. Alternativ kann die Kopplung über potenzialfreie Kontakte erfolgen, was sich in der Praxis als robust und herstellerübergreifend bewährt hat. Beide Varianten ermöglichen die sichere Umsetzung der Abschaltbefehle bei gleichzeitiger Wahrung der Datensicherheit. Der Rechenbetrieb der Systeme erfolgt laut Hersteller vor Ort oder in deutschen Rechenzentren. Weitere Details zum Umgang mit Personen- und Kennzeichendaten sind in Kap. 3 beschrieben.

2.7.2 Wartung, Verfügbarkeit und Skalierung

Optische und thermische Systeme überwachen beispielsweise Temperaturen, Netzwerkverfügbarkeit oder Verschmutzung und lösen bedarfsorientierte Wartung aus (z. B. Optikreinigung). PTZ-Antriebe besitzen Lebensdauern im Bereich mehrerer Jahre. Ersatzteil- und Garantiepläne sind generell vorzusehen. Positionsbasierte Systeme benötigen Batteriewechsel (Mehrjahresrhythmus) und ggf. ein Monitoring der Schnittstellen zu ERP-Quellen. Für lernende Komponenten (KI-Algorithmen) ist ein geeigneter Prozess (Versionierung, Updates, ggf. Fallback-Strategien bei auftretenden Problemen) zweckmäßig, um Aktualisierungen ohne größere Ausfälle einzuspielen.

Skalierungsvorteile entstehen, wenn Sichtfelder vernetzt oder Positionsdaten parkweit genutzt werden. Heterogene Flurstücke, hohe Verkehrsanteile im Radius und stark strukturiertes Gelände erhöhen Planungs- und Integrationsaufwand. Hybride Architekturen erlauben, teure Sensorik auf konfliktträchtige Zonen zu konzentrieren und ansonsten semantisch sichere Datenquellen zu nutzen. Service-Level-Vereinbarungen mit definierten Reaktions- und Wiederanlaufzeiten sichern die Funktionsfähigkeit in Ernte- und Hauptbetriebszeiten. Wo mehrere Technologien parallel betrieben werden, empfiehlt sich eine zentrale Ereignisplattform mit Priorisierungs- und Abgleichslogik zur Vermeidung doppelter Meldungen.

2.7.3 Kostenbilder (Investition und Betrieb)

Kosten hängen stark von Standort und Ausbaustufe ab. Aus den Interviews lassen sich folgende Orientierungen ableiten: Visuelle Systeme liegen, je nach Kameraanzahl und Integration, typisch im unteren bis mittleren fünfstelligen Bereich pro Anlage. Thermische Systeme erreichen in Vollausstattung ein oberes fünfstelliges Niveau. Positions-/Aktivitätslösungen verursachen parkweit niedrige bis mittlere fünfstellige Gesamtkosten bei sehr geringen laufenden Aufwänden. Minimalvarianten ohne Sensorik (manuelle Auslösung via Bedienelement/Applikation) liegen pro Anlage im niedrigen bis unteren fünfstelligen Bereich, siehe auch Kap. 4.5.

Für den Betrieb wurden Monitoring- und Servicepakete mit niedrigen bis mittleren dreistelligen Monatsbeträgen berichtet. Diese Spannweiten dienen der groben Einordnung. Projektindividuelle Faktoren (Netz, Höhenzugang, IT-Integration, Prozesse) können sie verschieben. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist eine Lebenszyklus-Perspektive hilfreich: Robuste Sensorik mit höherer Anfangsinvestition kann, bei sinkender Fehlabschaltquote und reduziertem Serviceeinsatz, über die Laufzeit im Vorteil sein, siehe dazu auch Kap. 4.5.

2.8 Reifegrad, Validierung und Mindestanforderungen

2.8.1 Praxiserfahrungen und Reifegrade

Die Systeme entwickeln sich klar in Richtung automatisierter Reaktionsketten. Optische Lösungen sind in der Detektion bei Tageslicht ausgereift. Die Tätigkeitsschärfe ist gut bis sehr gut, bleibt aber witterungs- und gerätespezifisch variabel. Eine 100-prozentige Sicherheit ohne Fehldetektionen bleibt vorerst ausgeschlossen. Thermalsysteme sind bei Nacht und schlechter Sicht robuster. Ihre Klassifikationsgüte ist durch den geringeren Informationsgehalt in Bezug auf die Tätigkeit im Vergleich zu RGB-Sensoren eingeschränkt und kann durch hybride Setups verbessert werden, was jedoch die Kosten erhöht. Positionsbasierte Architekturen

liefern hohe Zuverlässigkeit in ihrer Erkennung, sofern die Datenflüsse organisatorisch gesichert sind. Sie lassen sich technisch aktuell am ehesten vollautomatisiert realisieren.

Insgesamt zeigt sich ein heterogenes, aber technologisch fortgeschrittenes Feld. Die reine Detektion von Maschinenaktivitäten ist bei guten Sichtverhältnissen weitgehend gelöst, während die verlässliche Klassifikation der Tätigkeit, also die Unterscheidung zwischen relevanten und irrelevanten Arbeitsschritten, weiterhin die zentrale technische Hürde darstellt. Die Systeme nähern sich damit einer hohen Reife in der Erfassung, nicht jedoch in der vollautomatisierten Entscheidungsfindung. Entsprechend sind vollständig autonome Abschaltungen bislang nur Ausnahmen. In der Praxis dominieren aktuell hybride oder teilautomatisierte Reaktionsketten, um verbleibende Unsicherheiten abzufedern.

2.8.2 Validierung und Benchmarks

Eine standardisierte, anbieterübergreifende Erprobung der Erkennungsleistung ist bislang nicht etabliert. Für die Anerkennungspraxis wäre ein Referenzdesign hilfreich, das

- einen Szenarienkatalog (Sicht, Wetter, Tageszeit, Topografie),
- Gerätekombinationen samt Anbaugeräten,
- Bewertungsmetriken nach Tätigkeit (True/False-Raten getrennt nach Kontext) und
- die Behandlung von Null-Ereignissen definiert.

Wichtig ist zudem die Bewertung von Sequenzen statt Einzelbildern, da Bewegungsdynamik (Fahrtmuster: Arbeitsfahrt vs. Durchfahrt) für die korrekte Klassifikation entscheidend ist. Ein variantenreicher, anonymisierter Referenzkorpus aus Praxisdaten und gezielten Testfahrten würde die Vergleichbarkeit deutlich erhöhen. In Kap. 4.3 wird hierfür ein Vorgehen skizziert, das Metriken, Testprozeduren und Berichtsvorlagen vorschlägt.

2.8.3 Technische Mindestanforderungen

Aus den Befunden lassen sich Mindestanforderungen formulieren, ohne dem Anerkennungsprozess vorzugreifen:

- **Abdeckung:** Vollständige Überwachung des 250-m-Prüfradius bei Tag und Nacht. Für optische Systeme: Nachgewiesene Nachtstrategie. Für positionsbasierte Systeme: Belastbare Geofences und Wegenetzmasken.
- **Relevanzentscheidung:** Ein autonomes System muss verlässlich unterscheiden, ob eine erkannte Aktivität tatsächlich abschaltrelevant ist oder nicht.
- **Kopplung zur WEA:** Die Anbindung des Systems an die Windenergieanlage muss über standardisierte, herstellerübliche Schnittstellen (z. B. SCADA, Modbus) erfolgen und eine sichere Signalübertragung gewährleisten. Wesentlich ist eine Rückmeldung der Anlage, dass Abschaltsignale korrekt verarbeitet wurden, sowie eine lückenlose Protokollierung aller Ereignisse zur Nachvollziehbarkeit der Systemreaktionen.
- **Nachweisführung:** Ereignis- und Eingriffslog mit revisionssicherer Speicherung, Exporte in gängige Formate und (optional) Schnittstellen zu behördlichen Statusmeldungen.
- **Betriebsfestigkeit:** Fernwartungsfähigkeit, Zustandsmonitoring der Sensorik (Temperaturen, Netzwerk, Verschmutzung) und ausfallsichere Strategien (technischer Ausfall führt in einen sicheren Zustand).

- **KI-Komponente:** Dokumentierte Datenherkunft sowie Verfahren für ein standortspezifisches Nachtraining sowie deren Evaluation.

2.9 Entwicklungsbedarfe und offene Herausforderungen

Trotz klar ersichtlicher Fortschritte bestehen Lücken, die den breiten Einsatz automatischer Systeme hemmen. Im Vordergrund stehen drei Themenfelder:

A. **Klassifikationssicherheit:** Deep-Learning-Modelle benötigen domänenspezifische, variantenreiche Bildsequenzen oder alternativ aussagekräftige Aufnahmen der Zustandsänderung vor und nach der Bodenbearbeitung. Die Erhebung ist aufwändig, die Übertragbarkeit zwischen Standorten begrenzt. Somit ist die einheitliche Gewährleistung vollautonomer relevanter Tätigkeitsdetektionen weiterhin eine große Herausforderung. So ist auf dem Markt aktuell kein System verfügbar, das dies lückenlos nachweisen kann.

B. **Standardisierte Validierung:** Ohne harmonisierte Szenarien, Metriken und Datensätze bleiben Aussagen zur Eignung von Systemen weiter kontextgebunden bzw. nicht unabhängig belegt.

C. **Schnittstellen- und Betriebsintegration:** Unterschiedliche Betreiber- und Herstellerlandschaften verlangen flexible und zugleich robuste und sichere Koppelungen mit klaren Profilen (Schnittstellen und Signale, Latenzzeiten, Rückmeldungen) und definierten Fallbacks für Störungen im Signalfluss.

Weitere Bedarfe betreffen die Witterungsrobustheit optischer Systeme (Nebel/Staub/Blendung), die Skalierbarkeit hybrider Architekturen in heterogenen Parkgeometrien sowie die Automatisierungsgrade: Autonome Systeme sind zwar angekündigt, stoßen aktuell aber dort an Grenzen, wo reine Bildklassifikation ohne Semantik eingesetzt wird. Eine Kombination mit semantischen Quellen (ERP/Tracker) ist dort hingegen der pragmatische Pfad, wo sie vorhanden und einsetzbar sind.

2.10 Schlussfolgerungen und Perspektive der Machbarkeit

Der Markt hat eine Reife erreicht, die den kontextgerechten Einsatz automatischer Systeme ermöglicht. Der Automatisierungsgrad der einzelnen Systeme variiert jedoch noch erheblich. Optische Systeme bieten Evidenz und wachsende Klassifikationsschärfe, Thermalsensorik liefert Nacht- und Witterungsrobustheit, positionsbasierte Verfahren Semantik und Prozessnähe. In der Praxis erweist sich die Hybridisierung aktuell oftmals als tragfähiger Weg, um Kosteneffizienz, Resilienz und Nachweisfähigkeit auszubalancieren. Vollautomatisierte Lösungen können technisch möglich sein, erfordern jedoch insbesondere für die robuste Unterscheidung der Tätigkeiten entweder hochqualitative, standortspezifisch nachtrainierte Modelle oder die Kombination mit zusätzlichen, semantisch sicheren Quellen. Einen unabhängigen Nachweis für vollautomatisierte Systeme mit hoher Detektions- und insbesondere Klassifikationsgüte der relevanten Tätigkeiten konnten zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie nicht identifiziert werden. Kurz- bis mittelfristig erscheint daher eine gestufte Automatisierung mit klaren Fallbacks der am besten skalierbare Pfad.

Für die nächste Phase sind weniger Einzellösungen als vielmehr gemeinsame Referenzmetriken, Prüfdesigns und Schnittstellenprofile entscheidend. Sie schaffen Vergleichbarkeit, beschleunigen Anerkennungen und reduzieren Integrationsaufwände und Kosten.

Die grundlegenden technischen Prozesse – Detektion, Bewertung, Reaktion und Nachweis – gelten als ausreichend verstanden, um stabile Systeme zu realisieren. Prioritär sind nun die transparente Steigerung der Klassifikationsgüte und die Standardisierung von Prüf- und Validierungsverfahren.

3 Datenschutzrechtliche Aspekte

In den meisten Fällen erfolgt die automatische Detektion von Bewirtschaftungsereignissen durch die Auswertung von Kamerabildern oder -videosequenzen. Rechtlich besteht damit eine gute Vergleichbarkeit mit anderen Formen der Videoüberwachung. Es ist daher zu beleuchten, welche datenschutzrechtlichen Aspekte[5] zu beachten und ggf. bei der Konzeption und dem technischen Aufbau der Detektionssysteme bzw. bei deren konkretem Einsatz zu berücksichtigen sind. Dieses Kapitel beschränkt sich auf diesen rechtlichen Aspekt. Einschränkend ist festzustellen, dass im Falle der Detektion rein mit Hilfe von Wärmebildkameras weder Personen noch Autokennzeichen erkennbar sind, weshalb der personenbezogene Datenschutz hier keine Rolle spielen dürfte. Bei der Detektion mittels GPS dürften sich datenschutzrechtliche Bedenken dadurch entfallen, dass Verträge zwischen Betreiber und Bewirtschaftenden abzuschließen sind.

3.1 Videoüberwachung und Datenschutz

Der Betrieb einer Videoüberwachung ist dazu geeignet, in die Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen einzugreifen und unterliegt daher der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) sowie dem Bundesdatenschutzgesetz (BDSG). Er ist stets rechtfertigungsbedürftig. Konkret richtet sich der Maßstab einer datenschutzgerechten Videoüberwachung nach § 4 BDSG. Danach ist die Verarbeitung personenbezogener Daten (und damit eine Videoüberwachung) nur zulässig, wenn sie

- für die Wahrung berechtigter Interessen erforderlich ist und
- sofern nicht die Grundrechte und Grundfreiheiten der betroffenen Personen, die den Schutz personenbezogener Daten erfordern, überwiegen.

Aus Gründen der Rechenschaft und Transparenz muss über die Überwachung stets deutlich und verständlich aufgeklärt werden, zudem ist ggf. eine Datenschutz-Folgenabschätzung notwendig. Außerdem spielen Fragen der Datensicherheit und der Speicherbegrenzung bei technisch-organisatorischen Entscheidungen zur Umsetzung der Überwachung eine Rolle.

Grundsätzlich ist auch eine regelmäßige Überprüfung einer Videoüberwachung verpflichtend. Wird z. B. nach dem Ablauf eines Jahres festgestellt, dass der angestrebte Zweck der Überwachung nicht erreicht wird, darf diese nicht weiter betrieben werden. Geht man jedoch im hier betrachteten Fall davon aus, dass die eingesetzten Systeme für die automatische Detektion von Bewirtschaftungsereignissen grundsätzlich geeignet sind, bedarfsgerechte Abschaltungen auszulösen, so dürfte ihr Einsatz einer Überprüfung regelmäßig standhalten und ebendiese überflüssig sein.

3.2 Checkliste Videoüberwachung durch automatische Systeme

Eine gute Zusammenstellung der im Falle der Installation einer Videoüberwachung durch nicht-öffentliche Stellen zu beachtenden Fragen findet sich in Form einer Checkliste beispielsweise bei der Berliner Beauftragten für Datenschutz und Informationsfreiheit [Datenschutz-Berlin]. In fünf Themenkomplexen werden hierin Fragen formuliert, die

[5] Dieses Kapitel wurde mit Unterstützung des externen Datenschutzbeauftragten des ZSW erstellt. Die Ausarbeitung dient der allgemeinen datenschutzrechtlichen Orientierung und erhebt keinen Anspruch auf eine vollumfängliche rechtliche Würdigung.

hinsichtlich des Datenschutzes bei Videoüberwachungen zu berücksichtigen sind. Im Folgenden wird diese Checkliste einmal bezüglich ihrer Relevanz für die Anwendung einer automatisierten Detektion von Feldbewirtschaftungen abgearbeitet.

3.2.1 Themenkomplex 1: Berechtigte Interessen von Verantwortlichen oder Dritten

Welchem Zweck dient die Videoüberwachung? Besteht eine Gefährdungslage und auf welche Tatsachen gründet sich diese?

Als Zweck kann hier der Schutz von Greifvögeln beim Betrieb von Windenergieanlagen genannt werden bzw. die Umsetzung entsprechender Genehmigungsnebenbestimmungen. Ein berechtigtes Interesse dürfte somit nicht in Abrede gestellt werden. Eine Gefährdungslage verlangt § 4 Abs. 1 BDSG nicht, sondern lediglich die Wahrnehmung berechtigter Interessen für konkret festgelegte Zwecke. Es wird daher an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die herangezogene Checkliste für den vorliegenden Fall nur mit Einschränkungen geeignet ist, die rechtlichen Voraussetzungen zu prüfen.

Ist der Zweck der Videoüberwachung schriftlich festgelegt?

Dies sollte grundsätzlich jederzeit möglich sein. Ggf. kann hierfür direkt der Genehmigungsbescheid der Windenergieanlage bzw. die Anlage zum Bescheid, in der die entsprechende Nebenbestimmung enthalten ist, herangezogen werden.

Wem und zu welchem Anlass sollen aufgezeichnete Daten übermittelt werden?

Bei herkömmlichen Videoüberwachungen werden Daten allenfalls anlassbezogen z. B. an Ordnungsbehörden oder die Polizei übermittelt. Im hier betrachteten Fall dienen die Videoaufzeichnungen der Entscheidung, ob eine Windenergieanlage abgeschaltet werden muss oder nicht. Dafür werden die Daten in der Regel durch den Hersteller des Systems, der dieses auch betreibt, an den Betreiber der Anlage übermittelt. Sofern das System eigenständig vom Betreiber der Windenergieanlage selbst betrieben werden kann, entfällt zunächst eine Übermittlung von Daten. Der Betreiber bzw. von ihm beauftragte Personen werden einzelne Bilder oder Sequenzen im Fall ausgelöster Detektionssignale sichten bzw. kontrollieren.

Eine Übermittlung an Dritte ist dennoch nicht zu vermeiden, denn in der Regel verlangt die Genehmigungsbehörde Nachweise zur Umsetzung von Nebenbestimmungen - hier die Abschaltung der Windenergieanlage bei Feldbewirtschaftungen. Daher werden Bilder oder Videosequenzen von den Abschaltanlässen gemeinsam mit den Abschaltbelegen einmal jährlich an die Genehmigungsbehörde übermittelt werden müssen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine entsprechende Übermittlung an die Behörde auch vor dem Hintergrund des BDSG zulässig ist – zumindest sofern die im Weiteren aufgeführten Punkte berücksichtigt werden.

3.2.2 Themenkomplex 2: Erforderlichkeit und Datensparsamkeit

Ist die Videoüberwachung geeignet, den festgelegten Zweck zu erreichen?

Es ist stets die Frage zu beantworten, ob sich der festgelegte Zweck durch die Form der Videoüberwachung erreichen lässt. In diesem Zusammenhang spielt eine wichtige Rolle, ob die Aufnahmen auch kontinuierlich für diesen Zweck ausgewertet werden. Bei automatischen Systemen erfolgt dies über eine implementierte KI, so dass dies gegeben ist. Zudem wird ein automatisches System vor seinem Einsatz seine grundsätzliche Eignung im Sinne der

Zweckerfüllung nachgewiesen haben, d.h. es werden ausschließlich Systeme eingesetzt, die für die Erfüllung des Zwecks auch geeignet sind, siehe dazu auch Kap. 4.3.

Gibt es mildere Mittel, die für die Persönlichkeitsrechte der Betroffenen weniger einschneidend sind?

Hierzu ist insbesondere festzuhalten, dass ein Eingriff in Persönlichkeitsrechte weitgehend vermieden werden kann, wenn bestimmte technische Randbedingungen beachtet werden. Insbesondere sofern das Sichtfeld und die Auflösung der Kameras von automatischen Systemen so eingestellt werden, dass keine Erkennung von Gesichtern und Autokennzeichnen möglich ist bzw. für entsprechende Verpixelung gesorgt wird, dürften Persönlichkeitsrechte nicht betroffen sein.

Die Frage nach milderen Mitteln zielt auf alternative Methoden zur Erreichung des Zwecks ab. Hier ist zum einen die bislang zumeist praktizierte, herkömmliche Methode des Abschlusses von vertraglichen Vereinbarungen mit allen Landwirten, die im entsprechenden Radius um die Windenergieanlagen bewirtschaftete Felder besitzen. Wie in AP 1 ausgeführt, ist diese Methode jedoch aufwändig und zudem fehleranfällig. Eine weitere Alternative sind automatische Systeme, die auf GPS beruhen. Diese vermeiden ebenso das Eingreifen in Persönlichkeitsrechte, sind allerdings mit ähnlichem administrativem Aufwand wie die konventionelle Umsetzungsmethode verbunden.

Ist eine Beobachtung der Bilder auf einem Monitor ohne Speicherung der Bilddaten ausreichend? Wenn nein, warum nicht?

Beim Einsatz automatischer Systeme ist die Live-Betrachtung der Aufnahmen am Monitor durch Personen nicht vorgesehen, sondern die in dem System hinterlegte KI verfolgt die Bilder und wertet sie aus. Theoretisch wäre dies bei autonomen Systemen für die Sicherstellung der Abschaltung ausreichend. Bei assistierten oder halbautomatischen Systemen werden die Bilder von Ereignissen, die für eine Abschaltung relevant sein können, jedoch an die Betriebsführung übertragen, was immer auch einen Speicherprozess impliziert. Zudem wird es für die Erfüllung der Berichtspflichten gegenüber der Genehmigungsbehörde in der Regel notwendig sein, einzelne Bilder oder Sequenzen als Nachweis der sachgerechten Umsetzung der entsprechenden Nebenbestimmung zu speichern.

Zu welchen Zeiten erfolgt die Videoüberwachung? Wenn eine Videoüberwachung rund um die Uhr erfolgt, warum kann diese nicht zeitlich eingegrenzt werden?

Die Überwachung ist in der Regel nicht über das ganze Jahr notwendig. Nach Anlage 1 zu §45, BNatSchG ist die Abschaltung bei Bewirtschaftungsereignissen lediglich zwischen dem 1. April und dem 31.8. eines jeden Jahres umzusetzen. In Altgenehmigungen und entsprechend der Länderleitfäden ist der Zeitraum allerdings zumeist noch weiter gefasst, oftmals vom 1. März bis 31. Oktober. In den Wintermonaten außerhalb dieses Zeitraums ist keine Überwachung erforderlich und automatische Systeme sollten dementsprechend in dieser Zeit deaktiviert werden. Zwar besteht die Abschaltauflage nur am Tage, d.h. zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang. Allerdings ist eine Überwachung auch nachts notwendig (s. Kap. 1). Bis auf die jahreszeitliche Beschränkung dürften daher keine weiteren Eingrenzungen der Überwachung möglich sein.

Werden bestimmte Bereiche ausgeblendet oder verpixelt? Wenn nein, warum nicht?

Die Ausblendung bzw. Maskierung bestimmter Aufnahmebereiche ist ein in der Regel gut geeignetes Mittel, mögliche datenschutzrechtliche Probleme bei Videoüberwachungen zu

vermeiden. Im betrachteten Fall geht es dabei vornehmlich um die Vermeidung der Erkennung von Personen sowie Autokennzeichen. Dies dürfte wiederum vor allem Bereiche wie öffentliche Straßen, Parkplätze und sonstige Anlagen betreffen, die man in der hier diskutierten Anwendung einer Videoüberwachung schon deshalb maskieren wird, um unnötige nicht-relevante Detektionen („falsch-positiv“) zu vermeiden. Oftmals dürfte das Problem ohnehin nur eingeschränkt bestehen, da es im vorliegenden Fall um die Überwachung über große Distanzen geht. Selbst bei Einsatz von Kameras mit vergleichsweise hoher Auflösung dürften Gesichter und Kennzeichen nur im Nahbereich erkennbar sein. Zumindest in letzterem sind Möglichkeiten der Maskierung oder Verpixelung gesondert zu betrachten.

Über welche Möglichkeiten verfügt die Videokamera und welche sind hiervon für die Überwachung nicht erforderlich und daher deaktiviert?

Diese Frage lässt sich nicht pauschal beantworten und kann für den Fall relevant sein, dass Standardkameras eingesetzt werden, deren Funktionen und Leistungsfähigkeiten über die eigentlichen Erfordernisse eines automatischen Systems zur Abschaltung bei Bewirtschaftungen hinausgehen. Überflüssige Funktionen wie automatisches Zoomen oder Speichern können dann beispielsweise deaktiviert werden. Schwieriger wird dies möglicherweise bei zu hohen Auflösungen, die innerhalb des Überwachungsbereichs auch Gesichter oder Autokennzeichen erkennen lassen.

3.2.3 Themenkomplex 3: Interessenabwägung mit den schutzwürdigen Interessen der betroffenen Personen

Welche Bereiche sollen überwacht werden und wer hält sich üblicherweise dort auf?

Schutzwürdige Interessen sind betroffen, wenn bei einer Videoüberwachung Personen erfasst werden und insbesondere dann, wenn dies in Situationen erfolgt, in denen die Persönlichkeitsentfaltung im Vordergrund steht, also insbesondere bei privaten Tätigkeiten. Zu überwachen sind im betrachteten Fall aber Felder bzw. landwirtschaftliche Nutzflächen, auf denen Personen in der Regel im Zusammenhang mit den Bewirtschaftungsereignissen, d.h. ihren beruflichen Tätigkeiten erfasst werden. Da genau diese Tätigkeit Gegenstand der Überwachung ist, sollten die schutzwürdigen Interessen in diesem Fall nicht überwiegen. Zudem sollte durch geringe Auflösung oder Verpixelung möglichst dafür gesorgt werden, dass Gesichter nicht erkennbar sind.

Sofern Bereiche betroffen sind, in denen Personen vor allem in Freizeittätigkeiten erfasst werden könnten, wie z. B. Sportplätze, Wanderparkplätze, Ausflugslokale usw., so ist in jedem Fall dafür zu sorgen, dass diese maskiert und damit von der Überwachung ausgenommen werden. Es ist aber festzuhalten, dass solche Fälle bei der hier diskutierten Anwendung selten sein dürften. Überwacht werden muss ein Umkreis von 250 Metern um Windenergieanlagen, die oftmals eine Höhe von 200 Metern oder mehr aufweisen. In der Regel dürfte die Errichtung in derartiger Nähe zu Freizeiteinrichtungen oder Ähnlichem nicht zulässig sein. Alles, was über den 250-Meter-Radius hinausgeht, kann (und muss in relevanten Fällen) wiederum maskiert werden.

Welche schutzwürdigen Interessen der Betroffenen wurden mit welchem Ergebnis in die Interessenabwägung einbezogen?

Eine Videoüberwachung darf nur dann betrieben werden, wenn nach sorgfältiger Prüfung keine Anhaltspunkte dafür vorliegen, dass schutzwürdige Interessen Betroffener den

Überwachungszweck überwiegen. Hierbei ist die Eingriffsintensität zu berücksichtigen, die durch die Art der erfassten Informationen und deren Umfang (Informationsdichte und -qualität, zeitliches und räumliches Ausmaß) bestimmt wird, durch den Personenkreis und dessen Interessenlage und Ausweichmöglichkeiten sowie durch Art und Umfang der Verwertung der Daten.

Für den hier betrachteten Einsatz automatischer Systeme kann festgestellt werden, dass die Eingriffsintensität voraussichtlich als gering eingestuft werden kann. Die Informationsdichte dürfte gering sein, da sich im Umfeld von Windenergieanlagen in der Regel nicht viele Menschen aufhalten. Zudem kann und sollte – wie bereits beschrieben - die Qualität der Aufnahmen insbesondere hinsichtlich ihrer Auflösung so gering wie möglich gehalten werden. Zwar ist das zeitliche (mindestens 5 Monate im Jahr) und räumliche (mindestens 250-Meter-Radius) Ausmaß durchaus erheblich. Allerdings müssen nur solche Aufnahmen verarbeitet und ggf. gespeichert werden, in denen tatsächlich landwirtschaftliche Bewirtschaftungsvorgänge detektiert werden, was über den Zeitraum betrachtet vergleichsweise seltene Ereignisse sind. Alle Aufnahmen, die keine Detektionen beinhalten, sollten weder verarbeitet noch gespeichert werden.

3.2.4 Themenkomplex 4: Rechenschaft und Transparenz

Wurde eine Datenschutz-Folgenabschätzung den Vorgaben entsprechend durchgeführt? Wenn nein, warum nicht?

Bei einer systematisch-umfangreichen Überwachung öffentlich zugänglicher Bereiche ist eine Datenschutz-Folgenabschätzung durchzuführen. Darin müssen die Verantwortlichen, ggf. unter Hinzuziehung eines Datenschutzbeauftragten, abwägen, welche Folgen die Überwachung für den Schutz personenbezogener Daten hat und ob sich daraus Konsequenzen für deren Betrieb ergeben.

Sollten die Systemanbieter dies aufgrund der angewendeten Überwachungsform nicht von vornherein als irrelevant belegen können, sollten im Falle eines breiten Einsatzes automatischer Detektionssysteme Standardfragebögen für die Folgenabschätzung erstellt werden, die vom jeweiligen Windparkbetreiber im Sinne einer Checkliste abgearbeitet werden können. Im Einzelfall sollten lediglich bestimmte Besonderheiten der örtlichen Situation einer besonderen Betrachtung bedürfen. Auch hierfür sollte eine Reihe typischer Fallkonstellationen erstellbar sein, die dann entsprechend abgearbeitet werden kann. Eine Datenschutz-Folgenabschätzung dürfte also – sofern überhaupt notwendig – jeweils mit vertretbarem Aufwand durchzuführen sein.

Wird auf die Videoüberwachung so hingewiesen, dass der Betroffene den Umstand der Beobachtung vor Betreten des überwachten Bereichs hinreichend erkennen kann? Enthält der Hinweis die vorgeschriebenen Inhalte?

Eine vollständige Erfüllung dieser Anforderung dürfte kaum möglich sein. In der Regel erfolgt ein solcher Hinweis mit Hilfe von Hinweisschildern an der Windenergieanlage selbst oder in deren unmittelbarer Umgebung. Es ist in diesem Fall nicht möglich, den Hinweis immer so zu platzieren, dass er vor Eintreten in den Überwachungsbereich wahrgenommen wird. Da es sich hierbei um landwirtschaftliche Flächen handelt, auf denen außer dem Landwirt und dessen Bearbeiter keine weiteren Personen zum Aufenthalt befugt sein sollten, dürfte dies auch nicht notwendig sein. Öffentliche Wege, über die Personen in den Überwachungsbereich

eintreten, sollten, wie bereits beschrieben, maskiert bzw. von der Überwachung ausgenommen werden.

Die betroffenen Landwirte können gezielt, z. B. per Brief auf die Überwachung hingewiesen werden. Dass die vorgeschriebenen Inhalte in den Überwachungshinweisen enthalten sind, kann jeweils durch entsprechende Handreichungen sichergestellt werden.

Durch wen wird unter welchen Voraussetzungen Einsicht in die Aufnahmen genommen? Wie wird die Protokollierung der Einsichtnahme sichergestellt? Wurden die zugriffsberechtigten Personen auf das Datengeheimnis verpflichtet?

Zunächst einmal werden die Aufnahmen in Echtzeit automatisiert ausschließlich durch KI ausgewertet. Es ist aber in der assistierten und halbautomatischen Variante notwendig, Nachkontrollen durch Personen durchzuführen. Zudem wird es auch im Rahmen von Nachweisen für die Genehmigungsbehörde notwendig sein, dass zuständige Personen Bilder auswählen oder auswerten, sowohl auf Seiten des Betreibers als auch in der Genehmigungsbehörde.

Es handelt sich bei den betreffenden Aufnahmen jedoch nicht um Personenaufnahmen, sondern in der Regel um solche von landwirtschaftlichen Fahrzeugen. Zugehörige Personen sollten in der Regel nicht erkennbar sein. Unter dieser Voraussetzung dürften die Fragestellungen für diesen Anwendungsfall irrelevant sein. Davon unabhängig ist der Einsicht nehmende Personenkreis gut eingrenzbar (Betriebsführung, Genehmigungsbehörde).

Gibt es im Unternehmen einen Betriebsrat und wurde mit diesem eine Betriebsvereinbarung zur Videoüberwachung getroffen?

Die Frage bezieht sich in diesem Fall auf den überwachenden Betrieb, also den Betreiber der Windenergieanlage. Da es sich aber um keine betriebliche Überwachung handelt, dürfte dies in diesem Fall nicht relevant sein. Die Überwachung hat nicht den Zweck, Betriebsangehörige aufzunehmen und tut dies in der Regel auch nicht.

Wie ist sichergestellt, dass Betroffene informiert werden?

Hintergrund dieser Fragestellung ist, dass für den Fall, dass Aufnahmen bestimmten Personen zugeordnet werden können, diese darüber zu unterrichten sind. Weder ist bei der Erkennung von Feldbearbeitungen aber die Zuordnung zu bestimmten Personen das Ziel der Überwachung, noch dürfte dies in der Regel möglich sein bzw. sollte durch geeignete Maßnahmen (s.o.) vermieden werden. Wie oben beschrieben, kann ergänzend eine gezielte Information der bewirtschaftenden Landwirte erfolgen.

3.2.5 Themenkomplex 5: Datensicherheit und Speicherbegrenzung

Welche technisch-organisatorischen Maßnahmen sind zum Schutz der Daten getroffen worden?

Es ist dafür zu sorgen, dass Aufnahmen nicht missbraucht oder für verbotene Zwecke genutzt werden, da elektronische Bilder einfach gespeichert, kopiert und weitergeleitet werden können. Daher muss die Technikgestaltung mit Blick auf Sicherheit und Datenverarbeitung stets an den aktuellen gesetzlichen Vorgaben ausgerichtet werden. In jedem Fall sind die Daten vor Zugriff durch Dritte zu schützen und regelmäßige Sicherheitsupdates durchzuführen.

Unabhängig davon, dass der Datenschutz in Folge oben beschriebener Maßnahmen nur in geringem Umfang betroffen sein dürfte, sind diese Anforderungen durch die automatischen Systeme in jedem Fall durch entsprechende Maßnahmen und Routinen umzusetzen.

Sofern aufgezeichnet wird: Wann werden die Aufnahmen gelöscht? Sofern nicht innerhalb von 48 Stunden gelöscht wird, ist dies gesondert zu begründen.

Die Daten von Videoüberwachungen müssen gelöscht werden, sobald sie zur Zweckerreichung nicht mehr erforderlich sind oder schutzwürdige Interessen betroffener Personen einer weiteren Speicherung entgegenstehen. In der Regel werden hierfür periodische Löschungen oder Überschreibungen angewendet. Es wird allgemein davon ausgegangen, dass innerhalb von zwei Tagen entschieden werden kann, ob eine Sicherung der Daten notwendig ist. Die gesetzliche maximale Speicherdauer orientiert sich am konkreten Aufzeichnungszweck und kann entsprechend variieren.

Für den hier betrachteten Anwendungsfall stellt sich zunächst die Frage der Relevanz, da bei sachgerechter Durchführung keine personengebundenen Daten und damit keine datenschutzrechtlich relevanten Aufnahmen betroffen sind. Unabhängig davon werden für den Detektionsprozess an sich in den assistierten und halbautomatischen Varianten zunächst nur die Detektionen selbst im Rahmen der Übertragung der Bilder bzw. -sequenzen an die Entscheider kurzzeitig gespeichert. In aller Regel wird jedoch auch für zumindest einen Teil dieser Bilder bzw. Videosequenzen eine längerfristige Speicherung notwendig sein, da diese als Nachweis der ordnungsgemäßen Umsetzung der Abschaltauflage gegenüber der Genehmigungsbehörde vorgehalten werden müssen. Für diese ist dann besonders darauf zu achten, dass sie keine personenbezogenen Daten enthalten.

3.3 Fazit

Automatische, kameragestützte Erkennungssysteme für Bewirtschaftungen sind aus Sicht des Datenschutzes als wenig problematisch einzustufen, sofern die Aufnahmen keine personenbezogenen Daten wie insbesondere Gesichter sowie Autokennzeichen enthalten. Die Auflösung der Kamerabilder kann und sollte daran orientiert werden, sofern die Erfordernisse der Detektionen dem technisch nicht entgegenstehen. Ggf. sind für den - für die Detektion wenig relevanten - Nahbereich besondere Maßnahmen wie Maskierung oder Verpixelung vorzusehen. Gleiches gilt in jedem Fall für Bereiche, die für die Überwachung nicht relevant sind, insbesondere öffentliche Wege, Straßen und Parkplätze sowie ggf. Freizeiteinrichtungen im weiteren Sinne, denn eine Aufzeichnung privater Vorgänge ist unbedingt zu vermeiden.

Die längerfristige Speicherung von Aufzeichnungen, die von den Genehmigungsbehörden als Nachweise der Umsetzung dieser Abschaltauflage verlangt werden, sollte ebenfalls datenschutzrechtlich unproblematisch sein, sofern diese keine personenbezogenen Daten enthalten. Unabhängig davon könnte aber zumindest perspektivisch angestrebt werden, dass entsprechende Nachweisbelege für die Genehmigungsbehörde im Zuge der Etablierung von standardisierten Eignungsnachweisen für autonome Systeme weitgehend überflüssig werden.

Im Falle der Anwendung von Wärmebildkameras statt visueller Technik sind datenschutzrechtliche Probleme grundsätzlich nicht zu befürchten, da hier weder Fahrzeuge selbst noch Nummernschilder oder Personen identifizierbar sind. Bei GPS-gestützten Systemen sind ausschließlich die Interessen der Bewirtschaftenden und nicht Dritter betroffen. Da es bei diesen Systemen ohnehin notwendig sein wird, Verträge mit den Bewirtschaftenden über das

Mitführen eines Trackers oder die Offenlegung betriebswirtschaftlicher Daten zu schließen, können die Datenschutzfragen in diesen Verträgen mit geklärt werden.

4 Anwendungsaspekte

Für den breiten Einsatz automatischer Systeme zur Detektion von landwirtschaftlichen Ereignissen sind neben den naturschutzfachlichen Rahmenbedingungen (s. Kap. 1), der technischen Machbarkeit (s. Kap. 2) und datenschutzrechtlicher Fragen (s. Kap. 3) weitere formale, genehmigungsrechtliche und praktische Anwendungsaspekte bedeutsam, für die unter verschiedenen Gesichtspunkten ein Rahmen geschaffen werden muss, um eine Markteinführung der Systeme zu ermöglichen.

Im Folgenden werden die wesentlichen Fragen thematisiert. Für viele dieser Fragen bestehen in der Praxis sowohl bei Windparkbetreibern als auch in Genehmigungsbehörden bereits unterschiedliche Erfahrungen dahingehend, mit welchen Problemen die Anwendung automatischer Systeme aktuell noch verbunden ist und was in der Folge ihren Einsatz hemmt. Im Rahmen der Anfertigung dieser Studie wurden daher auch zwei Praxisworkshops durchgeführt, in denen diese Fragen mit den verschiedenen relevanten Akteuren (Genehmigungsbehörden, übergeordnete Behörden, Betreiber sowie weitere einschlägige Fachleute) erörtert wurden. Es fand ein Workshop zu Beginn der Studienbearbeitung statt, in dem vor allem die bestehenden Probleme und offenen Fragen abgefragt wurden. Damit sollte sichergestellt werden, dass die wesentlichen Fragen in diesem Kapitel auch beleuchtet werden. Die entsprechenden Ergebnisse wurden in einem zweiten Workshop denselben Akteuren gegen Ende der Projektbearbeitung vorgestellt. Anmerkungen und Impulse aus diesem Workshop flossen wiederum in die vorliegende Endfassung ein.

4.1 Genehmigungsfragen

Im BNatSchG (2022) ist bislang nur die Schutzmaßnahme der Abschaltung bei landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignissen als solche definiert, es finden sich jedoch keine Hinweise zur konkreten Umsetzung. In Genehmigungsverfahren gingen die Behörden (und Betreiber) in der Vergangenheit in der Regel davon aus, dass die Umsetzung der Maßnahme mit Hilfe von vertraglichen Vereinbarungen mit den Landeigentümer*innen bzw. -bewirtschafter*innen sicherzustellen ist. Da dies oft mit hohem Aufwand verbunden ist, insbesondere wenn sich der Betreiber bei kleinteiligen Flurstücken mit sehr vielen Eigentümer*innen bzw. Bewirtschafter*innen ins Einvernehmen setzen muss, sind teilweise in Länderleitfäden auch Ausnahmen definiert. So wird beispielsweise im Hinweispapier der LUBW (LUBW 2021) die Möglichkeit eröffnet, dass die Umsetzung der Maßnahme nur auf mindestens 80 % der betroffenen Flurstücke gewährleistet werden muss. Dies kann zur Folge haben, dass bei Bewirtschaftungen auf bestimmten Flurstücken kein Hinweis erfolgt und entsprechend nicht abgeschaltet wird (Im LUBW-Hinweispapier wird der Radius allerdings mit 300 Meter angegeben, weshalb dies auch als Kompromiss von pragmatischen Ausnahmen bei gleichem Schutzniveau gewertet werden kann. Zudem wird auch in der Anlage 1 zu § 45 Abs. 1-5 BNatSchG darauf verwiesen, dass „bei Windparks in Bezug auf die Ausgestaltung der Maßnahme gegebenenfalls die diesbezüglichen Besonderheiten zu berücksichtigen“ sind). Nichtsdestotrotz wären bei der Anwendung automatischer Systeme i. d. R. keine solche Ausnahmen notwendig, so dass diese das Schutzniveau in solchen Fällen erhöhen würden. Bezüglich möglicher Anpassungen der abschaltrelevanten Flächen sind automatische Systeme in der Lage, bestimmte Bereiche zu maskieren und damit von der Überwachung auszunehmen.

In ersten Länderleitfäden sind aber neben den herkömmlichen Vereinbarungen auch automatische Systeme als Möglichkeit zur Gewährleistung der Umsetzung der Maßnahme aufgeführt. So stellt das MLUK Brandenburg in seinem entsprechenden Papier (MLUK BB, 2023) fest, dass die Wirksamkeit der Maßnahme voraussetzt, dass entsprechende vertragliche Vereinbarungen zwischen dem Betreiber der WEA und Flächeneigentümern/-bewirtschaftern „im maßgeblichen Flächenumgriff“ getroffen werden. In der Regel seien diese bereits im Genehmigungsverfahren vorzulegen. Als Alternative zu den Vereinbarungen werden Systeme zur Detektion landwirtschaftlicher Ereignisse genannt, die „automatische Meldungen an den WEA-Betreiber zur Abschaltung der WEA absetzen können, sofern Ergebnisse unabhängiger Erprobungen deren Wirksamkeit belegen, eine Begrenzung des Kreises der Zugriffsberechtigten erfolgt und mit dem eingesetzten System ein Identifizieren von Personen und Fahrzeugen ausgeschlossen ist.“

Die letzten beiden im MLUK genannten Punkte adressieren den Datenschutz und sind vergleichsweise einfach aufzulösen (s. Kap. 3). Der erste Punkt des Nachweises der Wirksamkeit jedoch stellt sich – wie schon bei der Diskussion über Antikollisionssysteme – als der für die Markteinführung automatischer Systeme wesentliche heraus. Belege für die Wirksamkeit dürften in der Regel eine Voraussetzung dafür sein, dass diese Systeme in Genehmigungsverfahren als Mittel für die Umsetzung der Abschaltmaßnahme Anerkennung finden, siehe dazu Abschnitt 4.3.

4.2 Anwendung automatischer Systeme in der Praxis

Die Anwendung automatischer Systeme zur Detektion von Bewirtschaftungsereignissen bedeutet nicht zwangsläufig, dass Detektion und Klassifizierung des Ereignisses sowie die Abschaltung durchweg automatisch erfolgen. In der Praxis werden vielmehr bislang zumeist assistierte oder teilautomatisierte Varianten unter Beteiligung von Personen in der Reaktionskette angewandt. Daher werden zunächst die verschiedenen Varianten skizziert und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile betrachtet.

4.2.1 Assistierte Variante mit manueller Abschaltung

Das System überwacht die Umgebung. Wird ein Ereignis detektiert, wird einer mit der Betriebsführung der WEA verknüpfte, verantwortlichen Person bzw. einem Personenkreis ein entsprechendes Signal zusammen mit einem oder mehreren Bildern dieses Ereignisses übermittelt. Die Bilder werden von mindestens einer Person überprüft, die entscheidet, ob es sich um ein relevantes Bewirtschaftungsereignis handelt. Falls ja, löst die Person direkt oder über eine weitere Station in der Meldekette die Abschaltung aus. Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass Abschaltungen aufgrund falsch-positiver Signale vermieden werden. Voraussetzung ist allerdings, dass die Bilder von geschulten Personen kontrolliert werden, die relevante und nicht-relevante Ereignisse sicher unterscheiden können. Gravierender Nachteil ist, dass immer eine entsprechende Person sehr kurzfristig verfügbar sein muss, die kontrollieren, entscheiden und eine Abschaltung auslösen kann. Zwischen dem Detektionssignal und dessen Überprüfung sowie der Abschaltung ist vor dem Hintergrund der Naturschutzwirkung nur ein sehr begrenzter Zeitversatz tolerabel, vgl. 1.2.2.1.

Bezüglich der Zeitschiene besteht in dieser Variante grundsätzlich ein gravierender Nachteil gegenüber der konventionellen Variante mit vertraglichen Vereinbarungen. In letzterer werden die Bewirtschafter dazu verpflichtet, die Bewirtschaftung rechtzeitig, in der Regel mindestens eine Stunde vorher anzukündigen. Erfahrungen zeigen, dass der zeitliche Vorlauf

in der Praxis oftmals deutlich größer ist, da Bewirtschaftungen beispielsweise für den folgenden Tag geplant und entsprechend angekündigt werden. Zudem ist hier bereits mit der Meldung klar, ob das Ereignis abschaltrelevant ist oder nicht bzw. werden nicht abschaltrelevante Ereignisse in der Regel auch nicht gemeldet. Die Folge der assistierten Variante ist, dass bei Beginn des Ereignisses über einen gewissen Zeitraum keine Schutzwirkung durch die Vermeidungsmaßnahme besteht, sondern erst dann, wenn die Kontrolle und Entscheidung stattgefunden hat und in der Folge die Abschaltung ausgelöst wurde.

Die tolerierbare Reaktionszeit ist bei dieser Variante der Anwendung von automatischen Systemen in jedem Falle eng begrenzt, was die Praktikabilität deutlich einschränkt. Denn in der Praxis dürfte es zumindest in den Tagesrandzeiten oftmals schwierig sein, die erforderliche schnelle Reaktion personell jederzeit zu gewährleisten. Die im Folgenden beschriebene, teilautomatisierte Variante schafft dahingehend Abhilfe.

4.2.2 Teilautomatisierte Variante mit automatischer Abschaltung

Das System überwacht die Umgebung und löst selbständig eine Abschaltung der Windenergieanlage aus, wenn ein Bewirtschaftungsereignis detektiert wird. Zeitgleich werden an eine mit der Betriebsführung verknüpfte, geschulte Person bzw. einen Personenkreis Bilder des Ereignisses übertragen. Die Person überprüft anschließend, ob das Ereignis tatsächlich für eine Abschaltung relevant war. War dies nicht der Fall, wird die Abschaltung nach der Überprüfung wieder aufgehoben.

Auch in der teilautomatisierten Variante ist also eine Voraussetzung, dass die Bilder von geschulten Personen kontrolliert werden, die relevante und nicht-relevante Ereignisse sicher unterscheiden können. Gegenüber der assistierten Variante mit manueller Abschaltung weist diese Variante jedoch sowohl vor dem Hintergrund der Praktikabilität als auch aus Naturschutzsicht Vorteile auf. Zum einen tritt die Schutzwirkung der Maßnahme – optimale Funktionsfähigkeit und kurze Reaktionszeiten des Systems selbst vorausgesetzt – unmittelbar nach Beginn des Ereignisses in Kraft. Die für die Kontrolle verantwortliche Person bzw. der Personenkreis trägt nicht die Verantwortung für die zeitnahe Umsetzung der Abschaltauflage und muss deshalb auch nicht zwangsläufig jederzeit verfügbar sein. Die zeitliche Verfügbarkeit hat jedoch Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme. Je schneller die Abschaltung anhand der Bilder nachkontrolliert wird, umso geringer werden Ertragsverluste im Fall von Abschaltungen aufgrund von nicht-relevanten Ereignissen.

4.2.3 Autonome Variante

Im Falle eines autonomen Einsatzes des Systems finden die Detektionen und Abschaltungen gänzlich ohne menschliche Entscheidungen oder Eingriffe statt. Hierfür sind allerdings deutlich höhere Ansprüche an die Funktion des Systems zu stellen. Anders als in den ersten beiden Varianten muss das System nicht nur Ereignisse detektieren, sondern es muss auch selbständig abschaltrelevante von nicht-abschaltrelevanten Ereignissen mit hoher Sicherheit unterscheiden können. Mit Stand der Studienerstellung sind keine Systeme marktverfügbar, die dies sicher gewährleisten können.

Beim autonomen Einsatz von Systemen sind sowohl falsch-negative als auch falsch-positive Detektionen zu vermeiden:

Falsch-negative Detektion:

- Es findet ein abschaltrelevantes Ereignis statt, dieses wird aber entweder gar nicht detektiert oder als nicht-abschaltrelevantes Ereignis klassifiziert. Dies muss mit hoher Sicherheit ausgeschlossen werden, da sonst die korrekte Umsetzung der angeordneten Maßnahme nicht gewährleistet werden kann. Die Maßnahme würde in diesen Fällen nicht die erforderliche Schutzwirkung entfalten.

Falsch-positive Detektion:

- Es wird ein nicht-abschaltrelevantes Ereignis detektiert aber fälschlicherweise als abschaltrelevantes Ereignis klassifiziert.

Dies muss vor dem Hintergrund der Wirksamkeit der Schutzmaßnahme nicht ausgeschlossen, aber vor dem Hintergrund der Minimierung der mit der Maßnahme verbundenen Ertragsverluste und damit entgangener Vergütungen vermieden werden.

Grundsätzlich können falsch-positive Detektionen nachträglich noch durch Personal korrigiert werden (wie bei der halbautomatischen Variante), falsch-negative jedoch in aller Regel nicht, es sei denn, es ist eine zusätzliche Sicherheitsstufe, wie z. B. ein Parkwächter, eingebaut, wovon nicht auszugehen ist.

4.3 Eignungsnachweis

Voraussetzung dafür, dass ein automatisches System zur Sicherstellung der Umsetzung der Vermeidungsmaßnahme „Abschaltung bei landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignissen“ eingesetzt werden kann, ist ein Nachweis für dessen Eignung dafür. Dies ist nicht nur aus Sicht des Betreibers notwendig, der sicher sein muss, dass das System die ordnungsgemäße Umsetzung der Maßnahme sicherstellt, sondern auch für die Genehmigungsbehörde, die ggf. ein solches System als Umsetzungsoption anordnen kann.

4.3.1 Nachzuweisende Eigenschaften

Eignungsnachweise von automatischen Systemen beziehen sich vor allem auf ihre Detektionsgüte sowie je nach Anwendungsvariante (siehe Kap. 4.2) auch auf die Klassifizierungsgüte (relevant/nicht relevant). Die Anforderungen an die Güte der Detektion von Ereignissen sind dabei in allen Varianten sehr hoch, da die Detektion selbst die wesentliche Voraussetzung dafür ist, dass die angeordnete Schutzmaßnahme überhaupt umgesetzt wird bzw. ihre Wirkung entfaltet. Hingegen bestehen Anforderungen an die Güte der Klassifikation der Ereignisse insbesondere in der autonomen Variante.

In allen Varianten ist an das Detektionssystem die Anforderung zu stellen, dass es alle Ereignisse, die relevante Bewirtschaftungsereignisse sein könnten, im erforderlichen Überwachungsraum (Distanz 250 Meter) schnell und mit hoher Sicherheit – es wird dafür ein Wert von > 90 Prozent vorgeschlagen - erkennt. Im Allgemeinen wird sich die Detektion daher darauf konzentrieren, sich bewegende Traktoren und andere Landmaschinen sicher zu erkennen.

Bezüglich detaillierterer Anforderungen an die Detektion in der bisherigen Praxis wurde nach verfügbaren Auszügen entsprechender Nebenbestimmungen recherchiert. In einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung des Landkreises Höxter [Landkreis Höxter, 2025;

persönliche Übermittlung von Auszügen durch BayWa r.e.] verlangt die Genehmigungsbehörde beispielsweise, dass ein automatisches System alle in der Nebenbestimmung genannten Flurstücke vollständig bzw. einzelne, sehr lange Flurstücke mindestens bis auf eine Distanz von 500 Meter vom Turm der WEA überwachen kann. In diesem Fall wird also weniger auf die erforderliche pauschale Abschaltdistanz nach BNatSchG von 250 Meter, sondern auf Feldbewirtschaftungen auf Flurstücken, die sich im entsprechenden Radius um die WEA befinden, abgestellt. Dies geht vermutlich darauf zurück, dass die ursprüngliche Nebenbestimmung besagt, dass Vereinbarungen mit Bewirtschaftern zu Meldung von Bewirtschaftungen auf den entsprechenden Flurstücken zu schließen sind und ein automatisches System ebendiese 1:1 ersetzen können sollen.

Das Abstellen auf Flurstücke ist zwar insofern sachgerecht, als Feldbewirtschaftungen auf den entsprechenden Flurstücken in aller Regel auch den 250-Meter-Radius betreffen, da sie in diesem liegen oder in diesen hineinragen und sich die Bewirtschaftungsvorgänge zumeist auf das gesamte Flurstück erstrecken. Im Falle des Einsatzes automatischer Systeme ist jedoch die Frage zu stellen, ob die so definierte Anforderung sachgerecht ist. Die Anforderung, Bewirtschaftungsvorgänge auch jenseits des 250-Meter-Radius zu erkennen, ist gesetzlich so nicht vorgesehen (außer bei Besonderheiten bei der Ausgestaltung der Maßnahme in Windparks) und stellt deutlich höhere Anforderungen an ein automatisches System als notwendig. Entsprechend höhere Anforderungen an die Kameras einschließlich ihrer Platzierung und/oder die Bildverarbeitung würden Systeme unnötig verteuern und ihre Markteinführung erschweren. Es wird daher vorgeschlagen, an automatische Systeme hinsichtlich der Erkennungsreichweite keine höheren Anforderungen als die einer Detektion im gesetzlich vorgesehenen 250-Meter-Radius zu stellen. Ggf. wäre eine Klarstellung im Gesetz oder zumindest in den Hinweispapieren der Bundesländer hilfreich, dass im Falle der Anwendung automatischer Systeme ausschließlich auf den 250-Meter-Radius und nicht auf Flurstücksystematiken, welche allenfalls bei der Berechnung der Zumutbarkeit der Schutzmaßnahme eine Rolle spielen, abzustellen ist.

Im Falle eines autonomen Systems sind nicht nur an die Sicherheit der Erkennung aller Ereignisse hohe Anforderungen zu stellen, sondern auch an eine korrekte Klassifizierung der detektierten Ereignisse in abschaltrelevante und nicht-abschaltrelevante. Zum einen müssen wie bei assistierten und halbautomatischen Systemen alle relevanten Ereignisse mit hoher Sicherheit erkannt werden, damit das System die Erfüllung der Abschaltauflage sicher gewährleistet. Zum anderen müssen, wenn keine zeitnahe Nachkontrolle erfolgt, falsch-positive Signale mit entsprechender Abschaltung zur Vermeidung von Erzeugungsverlusten vermieden werden. Die bloße Erkennung von sich bewegenden Traktoren oder anderen Landmaschinen ist für diese Zwecke nicht ausreichend, da in diesem Fall auch nicht-relevante Ereignisse, wie z. B. das Ausbringen von Pflanzenschutzmitteln, zu einer Abschaltung der Anlagen über 24 Stunden, an für den Artenschutz besonders konfliktträchtigen Standorten sogar über 48 Stunden, führen würden.

Der Nachweis einer sicheren Klassifikation ist in diesem Fall aber nicht nur für den Betreiber selbst, sondern ebenso für die Genehmigungsbehörde von großer Wichtigkeit. Denn wenn das System nicht bei allen Detektionen automatisch Abschaltungen auslöst (wie halbautomatische Systeme), sondern nur dann, wenn das detektierte Ereignis als abschaltrelevant klassifiziert wurde, müssen falsch-negative Detektionen so weit wie möglich – auch hier wird eine Sicherheit von > 90 Prozent vorgeschlagen – ausgeschlossen werden.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass vor dem Hintergrund der Notwendigkeit einheitlicher Eignungsnachweise auch eine Vereinheitlichung der teilweise von den Vorgaben des BNatSchG abweichenden Regelungen in den Ländern angestrebt werden sollte. Dies bezieht sich zum einen auf die erforderliche Detektionsdistanz, vor allem aber auf die Art der abschaltrelevanten Ereignisse. Denn sofern die Software auf eine Klassifikation relevant/nicht relevant trainiert ist und nicht auf alle verschiedenen in Frage kommenden Bewirtschaftungsereignisse getrennt – wovon in der Regel auszugehen ist – müssten für die Systeme ggf. mehrere Softwareversionen entwickelt werden. Dies würde die Entwicklung und den Markteintritt der Systeme unnötig erschweren.

4.3.2 Formale Eignungsnachweise

Für Betreiber ist bei der Auswahl eines automatischen Systems eine wichtige Frage, ob bzw. unter welchen Voraussetzungen dieses von der Genehmigungsbehörde anerkannt wird. In der Regel werden deshalb die Genehmigungsbehörden als Voraussetzung dafür von den Betreibern bzw. den Systemherstellern Nachweise dafür verlangen, dass die Systeme für die Sicherstellung der Wirksamkeit der beauflagten Vermeidungsmaßnahme im beantragten Projekt geeignet sind. In bisherigen Nebenbestimmungen von Genehmigungen ist in diesem Zusammenhang beispielsweise von „systematischen Erprobungen“ [Landkreis Gifhorn, persönliche Übermittlung von Auszügen der Genehmigung durch BayWa r.e.] oder auch „Fachgutachten“ die Rede. [Landkreis Höxter, 2025; persönliche Übermittlung von Auszügen der Genehmigung durch BayWa r.e.].

Häufig wird in diesem Zusammenhang von Zertifizierungen gesprochen, die die Eignung eines Systems kennzeichnen können. Eine Zertifizierung technischer Systeme ist jedoch ein formal sehr aufwändiger Prozess, unter anderem, weil er neben den eigentlich relevanten Systemtests weiterer Formalitäten wie der Festlegung von Zertifizierungsschritten, der Akkreditierung einer Zertifizierungsstelle usw. bedarf. Um diese Hürden zu umgehen scheint ein vereinfachter Anerkennungsprozess über eine Standarderprobung gangbar. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass hier kein Bezug zum Prüfrahmen für Antikollisionssysteme des Landes Schleswig-Holstein (MEKUN, LfU, 2024) besteht. Automatische Systeme zur Erkennung von Bewirtschaftungsereignissen sind technisch deutlich weniger komplex als Antikollisionssysteme für Vögel, weshalb auch die an sie zu stellenden und von ihnen nachzuweisenden Anforderungen weniger anspruchsvoll sein sollten.

4.3.2.1 Standarderprobung der Systeme

Unabhängige Erprobungen mit entsprechenden Berichten können ein geeignetes Instrument sein, um die Eignung von automatischen technischen Systemen für bestimmte Anwendungen nachzuweisen. Dafür ist es erforderlich, die Erprobungen zu standardisieren, um sie vergleichen zu können. Auf diese Weise können sowohl Betreiber als auch Genehmigungsbehörden anhand von Erprobungsberichten entscheiden, ob ein System für die Erfüllung der jeweiligen Abschaltauflage geeignet ist.

Soll dieser Weg des Anerkennungsverfahrens eingeschlagen werden, empfiehlt es sich, hierfür ein möglichst bundesweit anerkanntes Standardkonzept zu erstellen, das Vorgaben für die relevanten, zu prüfenden Kenndaten eines Systems sowie für deren Überprüfung selbst enthält. Ein solches Konzept kann dann nicht nur als Vorgabe für unabhängige Erprobungen dienen, sondern auch als Benchmark für Entwickler dieser Systeme. Das heißt, aus dem

Standardkonzept mit seinen entsprechenden Zielwerten geht hervor, welche Entwicklungsziele erfüllt werden müssen.

Im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie kann ein solches Standardkonzept selbst nicht entwickelt werden. Gleichwohl werden im Folgenden Eckpunkte vorgeschlagen, die aus Sicht der Autor*innen bei der Entwicklung eines solchen Standardkonzepts Berücksichtigung finden sollten. Dabei ist grundsätzlich festzustellen, dass die Anforderungen insbesondere an die nachzuweisenden Klassifizierungseigenschaften der Systeme davon abhängen, ob ein System mit assistierter, halbautomatisierter oder autonomer Abschaltung (s. Kap 4.2) eingesetzt wird.

Da automatische Systeme gewichtige Vorteile mit sich bringen können, wird vorgeschlagen, für die Standarderprobungen einen Weg zu wählen, der die Hürden für den Einsatz dieser Systeme – auch vor dem Hintergrund der damit verbundenen Kosten – nicht zu hoch ansetzt. So wird es weder für praktikabel noch für notwendig erachtet, Eignungsnachweise immer zwingend an eine Standarderprobung unter realen Bedingungen im Feld zu knüpfen. Hierfür müssten jeweils bestimmte Anzahlen von Ereignissen real dargestellt werden, d.h. es wären verschiedene landwirtschaftliche Fahrzeuge, die verschiedene Wege unter unterschiedlichen Bedingungen im Überwachungsbereich zurücklegen, zu organisieren. Es wird stattdessen vorgeschlagen, die Überwachungsgüte anhand der technischen Merkmale der eingesetzten Kameras nachzuweisen und die Detektion und Klassifizierung durch die hinterlegte Software soweit wie möglich anhand eines Standarddatensatzes zu erproben.

4.3.2.2 Prüfgegenstand und Geltungsbereich

Im Mittelpunkt stehen autonome Systeme, die relevante landwirtschaftliche Tätigkeiten, etwa Mahd, Ernte oder Bodenbearbeitung, innerhalb eines im Anerkennungskontext üblicherweise verwendeten Prüfradius um die Windenergieanlage erkennen sollen. Im Kern geht es um zwei komplementäre Fähigkeiten:

- die allgemeine Detektion des Auftretens einschlägiger Aktivitäten und
- deren Klassifikation in fachlich brauchbare Kategorien (abschaltungsrelevant, nicht abschaltungsrelevant).

Die Prüfung orientiert sich an Ereignis- bzw. Sequenzbezügen: Bewertet wird hier nicht das Einzelbild, sondern das zeitliche und inhaltliche Geschehen, wie es für die behördlich relevante Abschaltlogik maßgeblich ist. Diese Ausrichtung ist nicht nur eine technische Präferenz, sondern eine Erkenntnis aus der Praxis: Relevante Tätigkeiten lassen sich selten in isolierten Momentaufnahmen bestimmen, sondern in charakteristischen Abläufen, in An- und Abfahrtsituationen, in Arbeits- und Transitpassagen. Ein prüfbarer Nachweis muss diesem Charakter Rechnung tragen, wenn er die Wirksamkeit einer Vermeidungsmaßnahme plausibel bestätigen soll.

Diese Ergebnisse können nachfolgenden einfachen, praxisnahen Kontexten differenziert werden, ohne dass diese mit starren Quoten hinterlegt werden müssen:

- Tageslichtsituationen (hell, Dämmerung, Nacht, künstlich beleuchtet),
- prägende Witterungslagen (trocken, nass, eingeschränkte Sicht),
- typische geometrische Konstellationen (Anfahrt, Querung, Randbereiche) und
- bestimmte Topografien (flach, hügelig).

Ein solcher Zuschnitt ist für eine hohe Aussagekraft nötig, ohne den Prüfprozess zu überfrachten.

4.3.2.3 Prüfungsrelevante Kenngrößen

Die Auswertung erfolgt, wie oben beschrieben, sequenz- bzw. ereignisbezogen und muss die Ergebnisse verständlich darstellen. Hierfür können folgende Metriken zur Bestimmung der Bestimmungsgüte herangezogen werden[6]:

- Erfassungsquote (Recall): Sie beantwortet die zentrale Frage, in welchem Maße relevante Ereignisse gefunden wurden. Für assistierte und halbautomatisierte Systeme steht diese Kennzahl im Vordergrund, da sie die Schutzwirkung absichert.

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

- Treffsicherheit (Precision): Sie beschreibt, wie zuverlässig gefundene Ereignisse tatsächlich relevant waren. Für autonome Systeme kommt ihr besonderes Gewicht zu, um unnötige Abschaltungen zu vermeiden.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

- Verhältnisdarstellung (z. B. F1): Wo es der Einordnung dient, kann ein zusammenfassendes Maß die Balance zwischen Erfassungsquote und Treffsicherheit verdichten, ohne die Einzelaussagen zu überdecken.

$$F1 = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision * Recall} = \frac{2 * TP}{2 * TP + FP + FN}$$

Die Anforderungen an die nachzuweisenden Klassifizierungseigenschaften hängen wesentlich vom Automatisierungsgrad ab. Bei assistierten und halbautomatischen Systemen, bei denen die abschaltrelevante Entscheidung in einer zweiten Stufe überprüft wird, ist insbesondere der Recall prüfungsrelevant: Entscheidend ist, dass keine relevanten Ereignisse übersehen werden, also keine unentdeckten Tätigkeiten im Sinne von Falsch-Negativen „durchrutschen“. Eine niedrigere Präzision kann in diesem Setting durch die menschliche Zweitstufe korrigiert werden, um weiterhin die Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten ohne die Schutzwirkung zu gefährden.

Demgegenüber müssen autonome Systeme, die ohne menschliche Zweitstufe abschaltwirksam sind, zwei Ziele zugleich erreichen: Sie benötigen einen hohen Recall, um die Schutzwirkung sicherzustellen, und zugleich eine hinreichend hohe Precision um unnötige Abschaltungen zu vermeiden und damit die Zumutbarkeit für Betrieb und Netzbetrieb nicht zu untergraben. In solchen Konstellationen kann ein zusammenfassendes Verhältnismaß (etwa ein F1-Maß) als ausbalancierte Kombination von Erfassungsquote und Treffsicherheit helfen, die Gesamtaussagekraft der Ergebnisse verständlich darzustellen, ohne die Einzelseiten zu verschleiern.

[6] FN = Anzahl falsch negativer Detektionen; FP = Anzahl falsch positiver Detektionen; TP = Anzahl richtig positiver Detektionen.

Dabei gilt durchgängig: Bewertet wird ereignis- bzw. sequenzbezogen. Das heißt, die Frage ist nicht, wie viele Einzelbilder „richtig“ waren, sondern ob das System die relevanten Tätigkeitssequenzen als solche erkannt und zutreffend eingeordnet hat. Wie hierbei eine finale Entscheidung der Kompletteinordnung getroffen wird, kann weiterhin unterschiedlich gehandhabt werden.

4.3.2.4 Anerkennungspfade: Referenzkorpus und Feld-Validierung

Im Sinne eines praktikablen und zugleich belastbaren Eignungsnachweises sind zwei Anerkennungspfade denkbar, die alternativ, ggf. auch kombiniert beschritten werden können: der Einsatz eines Referenzkorpus und die Feld-Validierung. Um unnötige Hürden für die Anerkennung zu vermeiden und die Verhältnismäßigkeit von Anerkennungsaufwänden im Blick zu behalten, sollte wo immer möglich eine Beschränkung auf ersteren Pfad erfolgen.

- Referenzkorpus („Standarddatensatz“):

Ein unabhängiger, kuratierter Referenzkorpus könnte typische Tätigkeiten und Abläufe in geeigneten Sequenzen abbilden. Er umfasst sowohl relevante als auch nicht-relevante Tätigkeiten an verschiedenen Standorten, in unterschiedlichen Entfernungen und Anfahrtsrichtungen sowie Kombinationen aus Tageszeit (ebenfalls Aktivitäten bei Nacht) und Witterung. Ergänzend können Durchfahrten ohne Tätigkeit als Negativkontrolle einbezogen werden, um die Einordnung von Transitereignissen zu berücksichtigen. Zweck dieser Szenarien ist nicht die Erzeugung lückenloser Kataloge, sondern die Plausibilisierung. Das System soll zeigen, dass es in typischen, für die Anwendung maßgeblichen Konstellationen verlässlich arbeitet. Systeme werden dann unter Aufsicht mit diesem Korpus gespeist. Ihre Ausgaben (Detektions- und Klassifikationsereignisse mit Zeit- und ggf. Positionsbezug) werden protokolliert und ausgewertet. Der Referenzkorpus würde somit der einfachen Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit dienen: Anbieter können die grundsätzliche Leistungsfähigkeit ihrer Erkennung darlegen, ohne für diesen Nachweis auf langwierige Feldkampagnen angewiesen zu sein.

Die Grenzen eines solchen Ansatzes stellen sich wie folgt dar: Unterschiede in Optik, Sensorik und Bildentstehung (etwa Auflösung, Blickwinkel, Brennweiten oder spektrale Empfindlichkeiten) könnten die Übertragbarkeit auf manche Hersteller einschränken. Der Referenzkorpus kann daher die Feldbeobachtung voraussichtlich nicht in jedem Fall ersetzen. Wo immer möglich sollte er jedoch bevorzugt angewendet werden, da er eine gemeinsame, nachvollziehbare Bezugsbasis bei überschaubarem Aufwand schafft und die Anforderungen an eine ggf. ergänzende Feld-Validierung deutlich verringert.

- Feld-Validierung:

In Fällen, in denen ein Korpus technisch nicht sinnvoll eingebunden werden kann, muss alternativ eine Validierung im Feld in Betracht gezogen werden. Hier steht der Nachweis im realen Anwendungskontext im Vordergrund: Das System zeigt, wie es unter den tatsächlichen Sicht-, Entfernungs- und Anfahrtsbedingungen arbeitet. Der Prüfansatz sollte dabei bewusst schlank bleiben: Er soll die Funktionsfähigkeit unter praxisrelevanten Bedingungen belegen, ohne in fein abgestufte Mengenvorgaben auszuufern. In geeigneten Fällen kann auch eine stichprobenhafte Plausibilisierung genügen, sofern sie hinreichend transparent dokumentiert ist.

Zugleich ist zu beachten, dass Ergebnisse aus einem einzelnen Standort notwendig standortspezifisch sind und daher nur eingeschränkt Aussagen über die generelle Eignung des

Gesamtsystems zulassen. Unterschiede in Topografie, Vegetation, Fruchtfolgen, Maschinenflotten (Farb- und Formvarianten, Anbaugeräte), Wegestrukturen sowie in Beleuchtungs- und Witterungslagen können zu ausgeprägten Domänenunterschieden führen, die das Erkennungsverhalten wesentlich beeinflussen. Um die Übertragbarkeit auf beliebige Standorte zu stützen, sollte die Feld-Validierung, wenn sie die generelle Eignung des Systems dokumentieren soll, daher nicht auf einen Standort verengt werden, sondern an mindestens einem weiteren, möglichst deutlich unterschiedlichen Standorttyp wiederholt werden (z. B. unterschiedlicher Landschaftsrahmen, Nutzungen, Gerätezuschnitt). Die genauere Ausgestaltung einer Feld-Validierung sollte in einem gesonderten Standard definiert und präzisiert werden.

4.3.2.5 Prüfaufbau und Durchführungsprinzipien

Ein prüffähiger Aufbau beginnt mit der plausiblen Abdeckung des relevanten Umfelds. Für optische Systeme bedeutet dies, die Sichtfelder so zu wählen und zu dokumentieren, dass im praxistypischen Einsatz keine blinden Zonen an entscheidenden Zugangslinien verbleiben. Zudem ist eine stringente Zeitbasis unabdingbar: Detektion, Bewertung und Reaktion müssen auf konsistenten Zeitstempeln beruhen, um die Kausalität der Kette nachvollziehen zu können.

Mit Blick auf die abschaltrelevante Wirkung ist ein kurzes Reaktionsfenster zu betrachten: Die genaue Ausprägung ergibt sich aus dem Kontext und aus entsprechenden fachlichen Empfehlungen (siehe 1.2.2.3). Wichtig ist hier nicht die Benennung einer starren Zeit, sondern die Nachvollziehbarkeit der Kette: Wann wurde ein Ereignis erkannt, wann klassifiziert, wann (sofern automatisiert) ein Abschaltsignal ausgelöst oder (sofern halbautomatisiert) eine menschliche Entscheidung herbeigeführt? Hier ist im Rahmen der Validierung die gesamte Signalkette, vom Beginn der Tätigkeit bis zur tatsächlichen Abschaltung, vollständig und zeitlich konsistent zu betrachten.

Die Ground-Truth-Erfassung orientiert sich am gewählten Anerkennungspfad. Beim Referenzkorpus beruhen die Wahrheiten auf geprüften Annotationen (Tätigkeits-Beschriftung) der Sequenzen. Im Feld stützen Begleitprotokolle, einfache visuelle Belege und, wo sinnvoll, Fahr- bzw. Trajektorienprotokolle die Zuordnung. Für eine spätere, belastbare Beurteilung der Leistungsfähigkeit ist darüber hinaus vergleichbares Datenmaterial in ausreichender Bildgüte erforderlich, dass einer unabhängigen Stelle die prüfende Sichtung ermöglicht, einschließlich der Feststellung korrekt erfasster Tätigkeiten sowie der Fehldetektionen und übersehenen Abschaltfälle. Da nicht alle Sensortypen bei einer Feldvalidierung Daten in einer Form liefern, die sich menschlich verlässlich interpretieren lassen (z. B. optisch/thermisch mit ungeeigneter räumlicher und zeitlicher Auflösung), kann die Erhebung ergänzender RGB-Kamera Aufnahmen notwendig werden um nachgelagert die Systementscheidungen auswerten zu können. Dies erhöht Aufwand, Komplexität und Kosten, was bei der Planung der Validierung sachlich zu berücksichtigen ist. Auch die Auswertung selbst ist anspruchsvoll: Eine hinreichend genaue Aussage zur Güte der Erkennung setzt eine vollständige, zeitlich konsistente Sichtung der relevanten Zeiträume voraus, was einen erheblichen manuellen Prüfaufwand nach sich ziehen kann. Dies verdeutlicht die zusätzlichen Hürden und praktischen Schwierigkeiten einer feldnahen Begutachtung, wenn sie hinreichend genau erfolgen soll.

4.3.2.6 Betriebsrobustheit und Ausfallsicherheit

Für die technische Eignung genügt nicht allein die korrekte Erkennung unter Idealbedingungen. Das System muss seine Funktionsfähigkeit über längere Zeiträume nachweislich aufrechterhalten und Störungen so behandeln, dass die Schutzwirkung gewahrt bleibt. Plausibel dargestellt werden muss daher, dass Ausfälle (z. B. Sensorausfall, Kommunikationsunterbrechung, gravierende Zeitabweichungen, Verschmutzungen mit Bilduntauglichkeit) zeitnah erkannt, eindeutig ausgewiesen und in einen sicheren Zustand überführt werden. Im Rahmen der Validierung ist darzulegen, dass die Signalkette kontinuierlich und zeitlich konsistent arbeitet (Wiederanlauf nach Unterbrechungen eingeschlossen) und dass degradierte Betriebsarten oder kurzzeitige Störungen nicht zu unbemerkten Erkennungsverlusten führen. Die Prüfung zielt dabei nicht auf betriebliche Wartungsregime ab, sondern auf die funktionale Robustheit: Erkennbarkeit von Beeinträchtigungen (etwa durch Qualitätsschwellen oder Plausibilitätsprüfungen) und angemessene Reaktion bis zur Wiederherstellung der vollen Erkennungsleistung.

4.3.2.7 Randfälle: Komplexität sichtbar machen

Neben den Standardszenarien ist es sinnvoll, die Komplexität der Praxis anhand einiger weniger ausgewählter Randfälle sichtbar zu machen, etwa teil- oder vollverdeckt auftretende Maschinen, Situationen mit starkem Gegenlicht, kurze oder unterbrochene Sequenzen, parallel ablaufende Tätigkeiten oder Randbearbeitungen nahe des Prüfradius. Diese Beispiele beanspruchen keine Vollständigkeit. Sie markieren vielmehr jene Bereiche, in denen Validierungen besonders sensibel sind und in denen ein späterer, detaillierter Standard differenzierte Vorgaben entwickeln kann.

4.3.2.8 Änderungen am System: Versionen und Nachweise

Für die Nachvollziehbarkeit ist es wesentlich, den geprüften Systemstand eindeutig zu benennen. Dazu gehören die maßgeblichen Hardwarekomponenten und die eingesetzte Software einschließlich ihres Modells oder ihrer Softwareversion.

Ändert sich das System, so bietet sich ein abgestufter Umgang an: geringfügige Änderungen, insbesondere an Erkennungskomponenten ohne Geometrie- oder Sensorikwechsel, könnten durch vergleichende Offlinetests belegt werden. Wesentliche Änderungen, etwa an Sensorik, Kamerageometrie oder Abdeckungslogik, bedürfen hingegen einer gezielten Nachprüfung im Sinne der zuvor beschriebenen Prinzipien. In beiden Fällen gilt: Maßstab ist die Transparenz der Herleitung, nicht die starre Erfüllung eines Zahlenrasters.

4.3.2.9 Unabhängige Mitwirkung

Der Eignungsnachweis gewinnt an Glaubwürdigkeit, wenn er von einer unabhängigen Instanz begleitet wird. Gemeint ist keine aufwändige Zertifizierung, sondern eine schlanke, fachkundige Audit- oder Aufsichtsrolle, die sicherstellt, dass Durchführung und Auswertung nachvollziehbar sind und die dokumentierten Ergebnisse eine belastbare Grundlage für behördliche Entscheidungen bilden. Es muss definiert werden, wer als geeignete Instanz für diese Prüfung angesehen wird. Aus Sicht der Autor*innen kann dies z. B. ein Gutachterbüro o.ä. sein. In diesem Sinne ist Unabhängigkeit ein Bestandteil methodischer Qualitätssicherung, nicht Selbstzweck.

4.3.2.10 Transparentes Berichtswesen

Ein prüffähiger Bericht beschreibt den Systemstand, den Prüfaufbau (einschließlich des gewählten Anerkennungspfads), die Szenarien sowie die Auswertung mit ihren Kenngrößen in einer Weise, die Dritte ohne Spezialwissen in die Lage versetzt, die Schlussfolgerungen nachzuvollziehen. Formale Vorgaben können aus Sicht der Autor*innen dabei bewusst zurückhaltend bleiben: Entscheidend ist, dass die Herleitung der Aussagen deutlich wird, also wie aus Ereignissen, Wahrheiten und Systemausgaben jene Aussagen entstanden sind, die für Anerkennungsentscheidungen maßgeblich sind.

4.3.2.11 Eignungsnachweise für GPS-gestützte Systeme

Besondere Eignungsnachweise für GPS-gestützte Systeme sind aus Sicht der Autor*innen nicht notwendig, da die Funktionsfähigkeit von GPS-Trackern bei korrekter Definition des Geofences außer Zweifel steht. Bei diesen Systemen ist ein möglicher Schwachpunkt die Zuverlässigkeit: Alle relevanten Landmaschinen müssen zu den entscheidenden Zeiten immer mit Trackern ausgestattet sein. Ob dies tatsächlich gegeben ist, liegt in der Verantwortung der Landwirte und ist kaum überprüfbar, es sei denn, es wird eine zusätzliche Sicherheitsstufe wie ein Parkwächter vorgesehen. Damit haben diese Systeme ein mit der konventionellen Methode vergleichbares Fehlerpotenzial.

4.3.2.12 Schlussbemerkung

Das hier beschriebene Konzept soll keinen anwendungsreifen Standard darstellen. Es hat den Zweck, die prüfungsrelevanten Punkte zu ordnen, Komplexität sichtbar zu machen und gangbare Wege der Nachweisführung zu benennen, ohne sie zu verengen. Aus ihm lässt sich nach Auffassung der Autor*innen in einem nächsten Schritt und unter Einbindung der maßgeblichen Akteure ein tragfähiges Standardkonzept entwickeln, das einerseits die Vergleichbarkeit stärkt und andererseits die Schwelle für innovative Systeme nicht unnötig erhöht. In diesem Verständnis sind die skizzierten Anerkennungspfade, Auswertungsprinzipien und Metriken als Fundament zu lesen, nicht als strikte Vorgaben.

Für assistierte und halbautomatische Systeme, die bereits am Markt verfügbar sind, sollte die Funktionsfähigkeit übergangsweise auch über anderweitige Belege wie insbesondere die technischen Merkmale der eingesetzten Kameras nachweisbar sein, um einen zunehmenden Einsatz der Systeme nicht auszubremsen. So könnte die Genehmigungsbehörde die sichere Überwachung des 250-Meter-Radius fordern und der Systemhersteller die Erfüllung der entsprechenden Funktion plausibel darlegen.

4.4 Evaluierung der Funktionserfüllung / Monitoring

Wird eine Nebenbestimmung zu einer Genehmigung nach BImSchG erlassen, so besteht in der Regel auch die Pflicht, der Genehmigungsbehörde – in der Regel jährlich – Nachweise zur sachgerechten Umsetzung der Nebenbestimmung zu erbringen. Im Zusammenhang mit der Abschaltung bei Ernte, Pflügen oder Mahd ist hier normalerweise eine Dokumentation der Logeinträge der Windenergieanlagen zu Starts und Stopps im Zusammenhang mit dieser Maßnahme zu erbringen. Wie häufig auch eine Dokumentation der entsprechenden Meldungen der Feldbewirtschafter verlangt wird, ist nicht bekannt. Diese bestünde aus dem Zeitpunkt der Meldung, dem angekündigten Beginn sowie der Art der Bewirtschaftung. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei den Behörden bislang in der Regel lediglich ein Plausibilitätscheck der Daten vorgenommen wird, der sich im Wesentlichen auf die Anzahl

und Dauer der Abschaltungen sowie gegebenenfalls auf allgemeine Kenntnisse über die angebauten Feldfrüchte bezieht.

Bei automatischen Systemen dürfte es regelmäßig notwendig sein, zur Dokumentation der Umsetzung der Nebenbestimmung die Logeinträge der Anlagenstopps und -starts mit Bildbelegen zu unterfüttern. Dies dürfte auch für alle Grade der Automatisierung des eingesetzten Systems gelten, da bei optischen und thermo-optischen Systemen alle Abschaltungen auf Bildanalysen beruhen, unabhängig davon, ob die Abschaltentscheidung durch Personen oder KI erfolgt. Inwieweit es darüber hinaus erforderlich ist, für die Zeiträume, in denen keine (relevanten) Bewirtschaftungen erfolgten, Bildbelege vorzuhalten, die dies belegen, hängt vom Ermessen der jeweiligen Genehmigungsbehörde ab. Dies kann bspw. dadurch erfolgen, dass zeitlich aufeinander folgende Bilder keine sichtbaren Veränderungen der Bodenoberflächen zeigen. Die Autor*innen empfehlen, bei Systemen, die einen Eignungsnachweis erbracht haben bzw. standarderprobt sind (siehe Kap. 4.3), darauf zu verzichten. Ggf. können aber Bildbelege für solche Bewirtschaftungen vorgesehen werden, die als nicht-relevant eingestuft wurden.

Inwieweit im Falle der Anwendung GPS-gestützter Systeme über die dokumentierten Anlagenstopps- und -starts weitere Nachweise zu erbringen sind, liegt ebenfalls im Ermessen der Genehmigungsbehörde.

4.5 Anschaffungs- und Betriebskosten

Vor dem Hintergrund der Zumutbarkeitsschwelle nach der Novelle des BNatSchG 2022 sind bei der Umsetzung von Vermeidungsmaßnahmen Kostenaspekte noch stärker in den Fokus gerückt. Der wichtigste Kostenpunkt bei der Abschaltung bei landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignissen dürften die Ertragsverluste sein, die durch die Stillstandzeit der Anlagen entstehen. Diese hängen neben der installierten Leistung der Anlagen vor allem von der Häufigkeit der Abschaltung und deren Dauer ab. Die installierte Leistung wirkt sich dabei nur absolut auf die Kosten aus, nicht jedoch relativ, d.h. nicht auf die prozentualen Ertragsverluste. Die Häufigkeit der Abschaltungen und damit die relativen Ertragsverluste wiederum hängen maßgeblich von der Anzahl der abschaltrelevanten Flurstücke im 250-Meter-Radius um die WEA ab, die unterschiedlichen Bewirtschaftungen unterliegen. In flurbereinigten Gebieten mit großen Flurstücken dürfte i. d. R. eine deutlich geringere Anzahl an Abschaltungen anfallen als in Gebieten, in denen die WEA von zahlreichen kleinteiligen Flurstücken umgeben sind, die oftmals mit einer ebenso großen Anzahl verschiedener Bewirtschafter verbunden sind. Entsprechend fließen die Anzahlen der relevanten Flurstücke auch in die Berechnungsformel der Zumutbarkeitsschwelle nach Anlage 2 zu § 45 b bzw. d BNatSchG ein. Für die Praxis und im Zusammenhang mit der Detektion von Bewirtschaftungsereignissen sachgerechter dürften jedoch zusammenhängende, einheitliche Bewirtschaftungseinheiten (Schläge) sein.

In der Regel dürften Systeme zur automatischen Abschaltung für Betreiber insbesondere im Falle sehr kleinteiliger Flurstücke interessant sein, da hierdurch eine entsprechend große Zahl vertraglicher Vereinbarungen mit Flurstückeignern bzw. -bewirtschaftern vermieden werden kann. Eingeschränkt wird der Vorteil allerdings ggf. dann, wenn mit einem hohen Anteil dieser Landwirte bereits ohnehin Verträge aus anderen Gründen – wie Pacht für die Anlagenflächen oder Maßnahmen zur Senkung der Attraktivität von Habitaten im Turmfußbereich – getroffen werden müssen. In diesen Fällen entsteht für die Vereinbarung der Meldung von

Bewirtschaftungsereignissen nur wenig zusätzlicher – administrativer wie monetärer – Aufwand.

Die Anschaffungs- und Betriebskosten für die derzeit am Markt verfügbaren Systeme sind nicht unerheblich und unterscheiden sich zudem deutlich zwischen den verschiedenen Anbietern bzw. Systemen. Es sind für Betreiber deshalb zum einen sowohl die organisatorischen Vor- und Nachteile automatischer Systeme sowie deren Kosten im Vergleich zur konventionellen Umsetzungsmethode der Maßnahme abzuwägen. Zum anderen sind auch die konkret einsetzbaren Systeme nicht nur hinsichtlich ihrer technischen Vor- und Nachteile, sondern auch bezüglich ihrer Kosten, die ggf. von der spezifischen Windparkkonstellation abhängen, untereinander zu vergleichen.

4.5.1 Beispielhafte Kostenberechnungen automatischer Systeme

Die nachfolgend beispielhaft und anonymisiert dargestellten Kostenschätzungen verschiedener Systeme auf der Grundlage von Interviews mit den Systemanbietern verdeutlichen, dass sich die Kosten für die Anwendung automatischer Systeme in einer sehr großen Spannbreite bewegen. Die Kostenunterschiede beruhen dabei nicht nur auf Unterschieden zwischen einzelnen Anbietern, sondern auch auf der Art des eingesetzten Systems sowie dem jeweiligen Integrations- und Ausstattungsgrad. Maßgebliche Kostenfaktoren sind insbesondere die Anzahl und Art der Sensorik (Kameras, Wärmebildkameras), der Standort, die technische Einbindung in die Windenergieanlage sowie der erforderliche Installations- und Betriebsaufwand.

- Beispiel 1

Anbieter 1 ruft abhängig von der Zahl der zu überwachenden WEA Investitionskosten zwischen rund 30.000 und 35.000 € pro WEA auf. Hinzu kommen jährliche Servicekosten zwischen 1.600 und 2.100 € pro WEA. Für einen Windpark mit drei WEA ergeben sich damit Kosten von rund 200.000 € über einen Zeitraum von 20 Jahren Betriebsdauer entsprechend etwa 10.000 € pro Jahr.

- Beispiel 2

Anbieter 2 ruft vergleichsweise günstige Investitionskosten von 10.000-15.000 € pro WEA auf, wobei das System über die Lebensdauer der WEA voraussichtlich einmal ersetzt werden muss. Hinzu kommen Servicekosten zwischen 750-1.500 € pro Park und Jahr. Damit ergeben sich Kosten für einen Windpark mit drei Anlagen über einen Zeitraum von 20 Jahren – einmaligen Hardwareersatz vorausgesetzt – von rund 100.000 € entsprechend etwa 5.000 € pro Jahr.

- Beispiel 3

Anbieter 3 ruft vergleichsweise hohe Investitionskosten für sein System auf, die für eine einzelne WEA bei 95.000 € liegen. Bei aus mehreren WEA bestehenden Parks reduzieren sich die Kosten je nach konkreter Konstellation. Genauere Angaben werden hierzu nicht gemacht. Hier werden unterschiedliche Wartungspakete angeboten, da ein Teil der routinemäßigen Arbeiten auf Wunsch auch vom Betreiber selbst übernommen werden kann. Ein Komplettpaket ruft Kosten von maximal 500 € pro Monat für den Windpark auf, wobei dies nur für die überwachungsrelevanten Monate gilt, so dass diese bei 5 Überwachungsmonaten (April – August) bei maximal 2.500 € pro Jahr liegen. Die Gesamtkosten dieses Systems sind pauschal schwer abzuschätzen, dürften aber für einen aus 3 WEA bestehenden Windpark über

eine Betriebszeit von 20 Jahren bei mindestens 250.000 € entsprechend mindestens 12.500 € pro Jahr liegen.

4.5.2 Vergleich der Kosten mit der konventionellen Methode

Die Kostenbeispiele im Kap. 4.5.1 zeigen, dass der Kostenfaktor voraussichtlich häufig nicht der maßgebliche Entscheidungsgrund für ein automatisches System sein dürfte, da die Gesamtkosten für die Systeme mindestens in derselben Größenordnung liegen wie die für die konventionelle Umsetzungsmethode über vertragliche Meldevereinbarungen mit den Landwirten zu kalkulierenden Kosten. Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist jedoch nicht allein auf die Höhe der Investitions- und Betriebskosten abzustellen. Vielmehr ist eine Lebenszyklusbetrachtung angezeigt, da technisch aufwendigere und in der Anschaffung teurere Systeme über die Laufzeit wirtschaftliche Vorteile bieten können, wenn sie Fehlabschaltungen reduzieren und geringen laufenden Serviceaufwand haben.

Die Kosten der konventionellen Methode hängen vornehmlich von der Anzahl Bewirtschaftenden ab, die vertraglich zu binden sind, sowie den jährlichen Vergütungen. Geht man beispielhaft von 5 vertraglich zu bindenden Bewirtschaftern und einer jährlichen Vergütung von 500 € pro Vertragspartner aus, summieren sich die Kosten über eine Betriebszeit von 20 Jahren lediglich auf 50.000 € entsprechend 2.500 € pro Jahr. Sind 10 Bewirtschafter vertraglich zu binden und liegt die jährliche Vergütung bei 1.000 € pro Vertragspartner, summieren sich die Kosten über eine 20-jährige Betriebsdauer schon auf 200.000 € bzw. 10.000 € pro Jahr. Dies dürfte ungefähr die Spannbreite sein, in der sich die Kosten in der Praxis bewegen und es ist ersichtlich, dass die Kosten im oberen Bereich der Spannbreite mit denen automatischer Systeme vergleichbar sind. Zudem kommt bei der konventionellen Methode noch der Aufwand für die Erstellung der Verträge sowie gegebenenfalls für Grundbuchbestellungen hinzu. Es sind also i. d. R. Einmalzahlungen für die Bewirtschaftenden für den Vertragsabschluss sowie den Besuch beim Notar sowie Rechtsanwaltskosten für die Erstellung der Verträge und ggf. für Grundbuchbestellungen sowie deren Notargebühren und die Gebühren des Grundbuchamts für die Grundbucheintragungen hinzuzurechnen.

4.6 Betrieb und Wartung

Bei den am Markt verfügbaren Systemen werden die Überwachung des ordnungsgemäßen Betriebs sowie Wartungen unterschiedlich gehandhabt. Naturgemäß gibt es noch keine Erfahrungen mit dem Langzeitbetrieb der Systeme insgesamt, da diese erst seit wenigen Jahren im (Pilot-)Einsatz sind. Alle, die mit Kameras arbeiten, setzen jedoch auf den Einsatz solcher, die sich bereits über zumeist längere Zeiträume in anderen Anwendungen bewährt haben. Zudem bringen die Kamerahersteller immer wieder Updates auf den Markt, für die aufgrund der zweifellos vorhandenen Erfahrung auf Seiten der Hersteller davon ausgegangen werden kann, dass sie in aller Regel eine verbesserte Funktion aufweisen. D.h. auch in den Fällen, in denen die Anbieter davon ausgehen, dass über die Betriebsdauer der Windenergieanlagen die Kameras einmal erneuert werden müssen, ist über die Betriebszeit keine Verschlechterung, sondern eher eine Verbesserung der Funktionalität zu erwarten.

In jedem Fall ist bei der Anwendung automatischer Systeme sicherzustellen, dass die ordnungsgemäße Funktion des Systems über Routinen ständig überprüft wird. Turnusgemäße Wartungen, die die uneingeschränkte Funktion bestätigen und im Folgenden sicherstellen, sind verpflichtend vorzunehmen. Der jeweilige Turnus sowie die durchzuführenden

Wartungsarbeiten sind durch den Hersteller festzulegen und an den Eignungsnachweis des Systems geknüpft. Die reguläre Durchführung ist zu dokumentieren und als Nachweis für die Genehmigungsbehörde vorzuhalten.

4.6.1 Umgang mit potenziellen Systemausfällen

Auch bei ordnungsgemäß betriebenen und gewarteten automatischen Systemen sind Systemausfälle nicht vollständig zu vermeiden. Neben Ausfällen einzelner Systemteile sind hier insbesondere Ausfälle der Stromversorgung oder auch der Datenübertragung zu nennen. Beim Betrieb der Systeme ist daher sicherzustellen, dass ihre Funktionstüchtigkeit täglich überprüft wird bzw. Ausfälle unmittelbar angezeigt werden, so dass die Betriebsführung dies jeweils unmittelbar überprüfen und den Betrieb wiederherstellen kann.

Für den Fall längerfristiger Systemausfälle, z. B. wenn die Beschaffung von Ersatz oder Ersatzteilen oder aufwändigere Reparaturen notwendig werden, ist eine Rückfallebene vorzusehen, mit der die Erkennung von Bewirtschaftungen über den Ausfallzeitraum ersatzweise sichergestellt wird. Dies kann beispielsweise der kurzzeitige Einsatz eines Parkwächters sein, der die relevante Fläche täglich auf Bewirtschaftungen kontrolliert oder auch ein telefonischer Kontakt zu den Landwirten, mit dem geplante Bewirtschaftungen abgefragt werden.

5 Fazit

Die temporäre Abschaltung von WEA bei landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignissen trägt als wirksame Schutzmaßnahme regelmäßig zur Senkung des Kollisionsrisikos von Vögeln bei. Automatische Systeme bieten zur vereinfachten Umsetzung dieser Schutzmaßnahme gegenüber der konventionellen Methode, wie etwa vertraglich zu sichernden Meldeketten, Vorteile. Sie können das Schutzniveau erhöhen und den organisatorischen Aufwand vermindern. In der assistierten und halbautomatisierten Variante sind automatische Systeme heute bereits marktverfügbar und technisch wie ökonomisch einsetzbar, autonome Varianten befinden sich bei den Anbietern bereits in Vorbereitung. Da technische Entwicklungen in den Bereichen Sensorik und KI aktuell rasant voranschreiten, ist die zeitnahe Verfügbarkeit weiter optimierter Systeme zu erwarten.

Insbesondere autonome Systeme bedürfen jedoch noch weiterer Entwicklungsarbeiten und für ihren Einsatz werden geeignete Nachweise der Leistungsfähigkeit notwendig sein. Es erscheint sinnvoll, hierfür Standarderprobungen zu entwickeln. Eine wichtige Grundlage ist die Vereinheitlichung der Vorgaben zur Umsetzung der Schutzmaßnahme nach BNatSchG in den Bundesländern. Die Entscheidung für oder gegen den Einsatz automatischer Systeme sollte weiterhin dem Einzelfall überlassen bleiben.

Literaturverzeichnis

ARSU, OekoFor & e3 (2023): Fachgutachten zur Ermittlung des Flugverhaltens des Rotmilans im Windparkbereich unter Einsatz von Detektionssystemen in Hessen - erstellt i.A. des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen. – Oldenburg (Arbeitsgruppe für regionale Struktur- und Umweltforschung GmbH): 193 S.

Aschwanden, J., Stark, H. & Liechti, F. (2025): Flight behaviour of Red Kites within their breeding area in relation to local weather variables: Conclusions with regard to wind turbine collision mitigation. – Journal of Applied Ecology 62: 1624-1635.

Berliner Beauftragte für Datenschutz und Informationsfreiheit: Checkliste für eine Videoüberwachung durch nicht-öffentliche Stellen. URL: https://www.datenschutz-berlin.de/fileadmin/user_upload/pdf/dokumente/2018-BlnBDI_Checkliste_Videoueberwachung.pdf (zugegriffen am 25.02.2025)

Dosovitskiy, A., et al. (2021). An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. ICLR.

Dürr, T. (2025): Vogelverluste an Windenergieanlagen in Deutschland. Dokumentation aus der zentralen Datenbank der Staatlichen Vogelschutzwarte im Landesamt für Umwelt Brandenburg (Stand 26.02.2025). – URL: https://lfu.brandenburg.de/lfu/de/aufgaben/natur/artenschutz/vogelschutzwarte/arbeitsschwerpunkt-entwicklung-und-umsetzung-von-schutzstrategien/auswirkungen-von-windenergieanlagen-auf-voegel-und-fledermaeuse/ (zugegriffen am 22.08.2025).

Geisen, F., Schmitt, R. & Grundwald, T. (2025). Arbeitshilfe Windenergie und Artenschutz. Modul IIa – Erfassungsmethodik und Bewertungsrahmen Avifauna. Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz Umwelt Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz. Mainz: 67.

Hagge, N., Nachtigall, W., Herrmann, S. & Stubbe, M. (2003). Habitatnutzung und Aktionsraumgrößen telemetrierter Rotmilane (Milvus milvus) und Schwarzmilane (Milvus migrans) im Nordharzvorland. Kurzzusammenfassung in: Schleucher, E.: Bericht über die 136. Jahresversammlung 1.-6. Oktober 2003 in Halberstadt. DO-G, Halberstadt, 44-45.

Heuck, C., Sommerhage, M., Stelbrink, P., Höfs, C., Geisler, K., Gelpke, C. & Koschkar, S. (2019): Untersuchung des Flugverhaltens von Rotmilanen in Abhängigkeit von Wetter und Landnutzung unter besonderer Berücksichtigung vorhandener Windenergieanlagen im Vogelschutzgebiet Vogelsberg – Abschlussbericht. Im Auftrag des Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen. – 125 S.

HMUKLV (2021). Verwaltungsvorschrift „Naturschutz/Windenergie“. Hessisches Ministerium für Umwelt Klimaschutz Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV): 40.

HMUKLV & HMWEVW (2020). Gemeinsamer Runderlass des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz und des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen - Verwaltungsvorschrift (VwV) „Naturschutz/Windenergie“: 99.

HMUKLV & HMWEVW (2023). Gemeinsamer Erlass - Neuregelungen zur Beschleunigung des Windenergieausbaus (u.a. Oster- und Sommerpaket, EU-NotfallVO). Hessisches Ministerium für Umwelt, K., Landwirtschaft und Verbraucherschutz und Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen: 43.

Hötker, H., Krone, O. & Nehls, G. (2013): Greifvögel und Windkraftanlagen: Problemanalyse und Lösungsvorschläge. Schlussbericht für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. – Bergenhusen, Berlin, Husum (Michael-Otto-Institut im NABU; Leibniz-Institut für Zoo- und Wildtierforschung; BioConsult SH): 322 S.

Hou, H., Li, Y., Zhang, C., Liao, H., Zhang, Y., Liu, Y. (2021). Vehicle Behavior Recognition using Multi-Stream 3D Convolutional Neural Network. YAC.

KNE (2024): Detektionssysteme zur ereignisbezogenen Abschaltung von Windenergieanlagen zum Schutz von tagaktiven Brutvögeln - Systembericht Stand 15. Oktober 2024. – Berlin 32 S.

KNE (2025): Die Abschaltung von Windenergieanlagen bei Bewirtschaftungsereignissen – Fragen der Umsetzung der Schutzmaßnahme. – 19 S.

Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. NIPS.

LAG VSW (2017): Abschaltung von Windenergieanlagen (WEA) zum Schutz von Greifvögeln und Störchen bei bestimmten landwirtschaftlichen Arbeiten. – 3 S.

LUBW (2021): Hinweise zur Erfassung und Bewertung von Vogelvorkommen bei der Genehmigung von Windenergieanlagen. Ministerium für Umwelt Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Stuttgart, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg LUBW: 159 S.

LUNG MV (2016): Artenschutzrechtliche Arbeits- und Beurteilungshilfe für die Errichtung und den Betrieb von Windenergieanlagen (AAB-WEA) - Teil Vögel Stand: 01.08.2016. Landesamt für Umwelt Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern. Güstrow: 78 S.

MEKUN, LfU (2024): Fachkonventionsvorschlag "Prüfrahmen für Antikollisionssysteme" (Prüfrahmen AKS), Vollzugshilfe für die Bewertung als fachlich anerkannte Schutzmaßnahme. Stand 01.07.2024: 80 S.

MELUND & LLUR (2017). Integration artenschutzrechtlicher Vorgaben in Windkraftgenehmigungen nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG). Räume, M. f. E. L. U. N. u. D. S.-H. s. L. f. L. U. u. l. Kiel: 29.

MELUND & LLUR (2021). Standardisierung des Vollzugs artenschutzrechtlicher Vorschriften bei der Zulassung von Windenergieanlagen für ausgewählte Brutvogelarten - Arbeitshilfe zur Beachtung artenschutzrechtlicher Belange in Schleswig-Holstein. Ministerium für Energiewende Landwirtschaft Umwelt Natur und Digitalisierung Schleswig-Holstein sowie Landesamt für Landwirtschaft Umwelt und ländliche Räume. Kiel: 105 S.

Mercker, M., Liedtke, J., Liesenjohann, T. & Blew, J. (2023): Pilotstudie „Erprobung Probabilistik“: Erprobung probabilistischer Methoden hinsichtlich ihrer fachlichen Voraussetzungen mit dem Ziel der Validierung der Methode zur Ermittlung des vorhabenbezogenen Tötungsrisikos von kollisionsgefährdeten Brutvogelarten an Windenergieanlagen. Pilotstudie im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV). – Husum (BioConsult SH GmbH & Co. KG und Bionum GmbH): 113 S.

Mercker, M., Raab, R., Liesenjohann, T., Liedtke, J. & Blew, J. (2024): Fortsetzungsstudie Probabilistik - Das „Raumnutzungs-Kollisionsrisikomodell“ („RKR-Modell“): Fachliche Ausgestaltung einer probabilistischen Berechnungsmethode zur Ermittlung des Kollisionsrisikos von Vögeln an Windenergieanlagen in Genehmigungsverfahren mit Fokus Rotmilan. Im Auftrag des Bundesamts für Naturschutz. – Husum (BioConsult SH GmbH & Co.KG und Bionum GmbH): 100 S.

MLUK BB (2023). Erlass zum Artenschutz in Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen (AGW Erlass). Ministerium für Landwirtschaft Umwelt und Klimaschutz Brandenburg (MLUK BB). Potsdam: 23 S.

MULE (2018). Leitfaden - Artenschutz an Windenergieanlagen in Sachsen-Anhalt. Ministerium für Umwelt Landwirtschaft und Energie des Landes Sachsen-Anhalts. Magdeburg: 47.

MUNV & LANUV (2024). Leitfaden – Umsetzung des Arten- und Habitatschutzes bei der Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen in Nordrhein-Westfalen – Modul A: Genehmigungen außerhalb planerisch gesicherter Flächen/Gebiete. Ministerium für Umwelt Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen sowie Landesamt für Natur Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf: 96.

Musters, J. C. M., Noordervliet, M. A. W. & Ter Keurs, W. J. (1996): Bird casualties caused by a wind energy project in an estuary. – Bird Study 43: 124-127.

Nachtigall, W. (1999): Aktionsraum und Habitatnutzung des Rotmilans (Milvus milvus Linné, 1758) im nordöstlichen Harzvorland. Diplomarbeit. – Universität Halle-Wittenberg –), S.

Nachtigall, W. (2008): Der Rotmilan (Milvus milvus, L. 1758) in Sachsen und Südbrandenburg – Untersuchungen zu Verbreitung und Ökologie. Dissertation. – Universität Halle –), 137 S.

NMUEK (2016). Leitfaden Umsetzung des Artenschutzes bei der Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen in Niedersachsen. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt Energie und Klimaschutz: 15.

NMUEK (2024). Hinweise für die Genehmigung von Windenergieanlagen an Land in Niedersachsen basierend auf dem Windenergieerlass vom 20.7.2021. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt Energie und Klimaschutz. Hannover: 84.

ÖKOTOP & FÖA Landschaftsplanung (2023): Prüfung der Wirksamkeit von Vermeidungsmaßnahmen zur Reduzierung des Tötungsrisikos von Milanen bei Windkraftanlagen. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FKZ 3517 86 0200 im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz. Endbericht 2023. – 242 S.

Osborn, R. G., Higgins, K. F., Usgaard, R. E., Dieter, C. D. & Neiger, R. D. (2000): Bird mortality associated with wind turbines at the Buffalo Ridge Wind Resource Area, Minnesota. – The American Midland Naturalist 143: 41-52.

Pfeiffer, T. & Meyburg, B.-U. (2022): Flight altitudes and flight activities of adult Red Kites (Milvus milvus) in the breeding area as determined by GPS telemetry. – Journal of Ornithology https://doi.org/10.1007/s10336-022-01994-1: 24.

Richarz, K., Hormann, M., Braunberger, C., Harbusch, C., Süßmilch, G., Caspari, S., Schneider, C., Monzel, M., Reith, C. & Weyrath, U. (2013). Leitfaden zur Beachtung artenschutzrechtlicher Belange beim Ausbau der Windenergienutzung im Saarland betreffend die besonders relevanten Artengruppen der Vögel und Fledermäuse. Ministerium für Umwelt und Verbraucherschutz Saarland. Saarbrücken: 112.

Richarz, K., Hormann, M., Werner, M., Simon, L. & Wolf, T. (2012): Naturschutzfachlicher Rahmen zum Ausbau der Windenergienutzung in Rheinland-Pfalz - Artenschutz (Vögel, Fledermäuse) und NATURA 2000-Gebiete. – (Bericht im Auftrag des MULVWF, Rheinland-Pfalz): 145 S.

SMEKUL SN (2021). Leitfaden - Vogelschutz an Windenergieanlagen im Freistaat Sachsen. Sächsisches Staatsministerium für Energie Klimaschutz Umwelt und Landwirtschaft. Dresden: 73.

SMEKUL SN (2022). Leitfaden - Vogelschutz an Windenergieanlagen im Freistaat Sachsen - Fortschreibung (LVW II), Stand 3. November 2022. Sächsisches Staatsministerium für Energie Klimaschutz Umwelt und Landwirtschaft: 67.

SMEKUL SN (2023). Erlass naturschutzrechtliche Anforderungen im Zusammenhang mit Windenergieanlagen im Freistaat Sachsen. Sächsisches Staatsministerium für Energie Klimaschutz Umwelt und Landwirtschaft. Dresden: 25.

StMUV (2023). Hinweise zur Genehmigung von Windenergieanlagen für den Bereich Naturschutz - Bekanntmachung des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz vom 14. August 2023, Az. 62-R-U8685.2-2020/4-482. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV). München: 20.

TLUG (2017). Avifaunistischer Fachbeitrag zur Genehmigung von Windenergieanlagen (WEA) in Thüringen. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie – Abteilung 3 Naturschutz; Referat 31 Zoologischer Artenschutz – Vogelschutzwarte Seebach. Jena: 61.

Tran, D., Bourdev, L., Fergus, R., Torresani, L., & Paluri, M. (2015). Learning Spatiotemporal Features with 3D Convolutional Networks. ICCV.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
AKS	**A**nti**k**ollisions**s**ystem
BNatSchG.	**B**undes**nat**ur**sch**utz**G**esetz
CapEx	**Cap**ital **Ex**penditure (Investitionsausgaben)
ERP	**E**nterprise **R**esource **P**lanning (landwirtschaftliche Betriebsführungssysteme)
IR	**I**nf**r**arot
IT/OT	**I**nformation **T**echnology / **O**perational **T**echnology
OpEx	**Op**erating **Ex**penditure (Betriebsausgaben)
PTZ	**P**an-**T**ilt-**Z**oom (schwenk-/neigbare Zoomkamera)
REST	**R**epresentational **S**tate **T**ransfer
RGB	**R**ot**, G**rün**, B**lau
SCADA	**S**upervisory **C**ontrol **A**nd **D**ata **A**cquisition
TCO	**T**otal **C**ost of **O**wnership (Lebenszyklus-Gesamtkosten)
VPN	**V**irtual **P**rivate **N**etwork
WEA	**W**ind**E**nergie**A**nlage

Die „BfN-Schriften“ sind eine seit 1998 unperiodisch erscheinende Schriftenreihe in der institutionellen Herausgeberschaft des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) in Bonn. Sie sind kurzfristig erstellbar und enthalten u. a. Abschlussberichte von Forschungsvorhaben, Workshop- und Tagungsberichte, Arbeitspapiere oder Bibliographien. Viele der BfN-Schriften sind digital verfügbar. Printausgaben sind auch in kleiner Auflage möglich.

DOI 10.19217/skr783

Bundesamt für Naturschutz