

Wissenstransfer und Anforderungen an technische Vermeidungsmaßnahmen

Herausforderungen für die Anwendung von
Antikollisionssystemen in der Praxis (AKS-Praxis)

Elke Bruns und Maik Pommeranz

BfN-Schriften

754

2025





Bundesamt für
Naturschutz

Wissenstransfer und Anforderungen an technische Vermeidungsmaßnahmen

**Herausforderungen für die Anwendung von
Antikollisionssystemen in der Praxis („AKS-Praxis“)**

Elke Bruns

Maik Pommeranz

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	6
Abstract	7
1 Einleitung	9
2 Anforderungen an den Wirksamkeitsnachweis.....	11
2.1 Bisherige Anforderungen	11
2.1.1 Evaluierung „Anforderungsprofil Erprobung“ (KNE 2019)	11
2.1.2 Fazit	13
2.2 Spezifische Anforderungen im Prüfraumen AKS Schleswig-Holstein	14
2.2.1 Berechnung der Reaktionsdistanz	15
2.2.2 Erfassungsbereich	15
2.2.3 Durchführung der Erprobung und Datenerhebung	16
2.2.4 Anforderungen an die Datenauswertung	16
2.2.5 Gesamt- bzw. Schutzrate	16
2.2.6 Nachweis der Wirksamkeit der Vogelerkennung	17
2.2.7 Nachweise während der Betriebsphase	19
3 Parameter zur Bemessung der Reaktionsdistanz (Auswahl)	20
3.1 Mittlere Fluggeschwindigkeit.....	20
3.1.1 Horizontale und vertikale Fluggeschwindigkeit	20
3.1.2 Studienlage zur Ermittlung der Fluggeschwindigkeit.....	21
3.1.3 Mittlere Fluggeschwindigkeit nach MEKUN u. LfU SH (2024) als neuer Standard ...	23
3.2 Reaktionszeit: Trudelbetrieb und Trudelzeiten	24
3.2.1 Abschaltung als Schutzmaßnahme	24
3.2.2 Trudelbetrieb im BNatSchG	25
3.2.3 Ermittlung der Trudelzeit	27
4 Antikollisionssysteme im BNatSchG	29
4.1 AKS als Schutzmaßnahme im BNatSchG	29
4.2 Wirksamkeit von AKS: Entwicklungsstand	30
4.2.1 Entwicklungsstand der Systeme	30
4.2.2 Erfordernis eines Wirksamkeitsnachweises.....	30
4.3 Anerkennung von Systemen	31
4.3.1 Ebene der Anerkennung	32
4.3.2 Zuständigkeiten und Rollen der beteiligten Akteure	33

4.3.3	Anforderungen an den Wirksamkeitsnachweis	34
4.3.4	Bundesweite Anerkennung	36
5	Wirtschaftliche Aspekte des AKS-Einsatzes	39
5.1	Zumutbarkeit von Antikollisionssystemen	39
5.1.1	Berechnung der Zumutbarkeit	39
5.1.2	Höhe der prozentualen Zumutbarkeitsschwelle	40
5.1.3	Investitionsspielräume	41
5.1.4	Unzumutbarkeit	41
5.2	Investitionskostenrahmen	43
5.2.1	Definition der Investitionskosten (IK)	43
5.2.2	Kostenaufteilung auf mehrere WEA	44
5.2.3	Senkung der Anschaffungskosten für AKS	44
5.2.4	Fallweise Zulässigkeit der Überschreitung	44
5.3	Tatsächliche Ertragsverluste bei bedarfsgerechter Abschaltung	45
5.3.1	Potenziale zur Senkung von Ertragsverlusten	45
5.3.2	Prognose realer Ertragsverluste	50
6	AKS-Anwendung und Untersetzungsbedarf	52
6.1	Stand der Anwendung	52
6.2	Betriebszeiten des AKS	53
6.3	Anwendung und Einsatzbereiche von AKS	54
6.4	Nicht-Verfügbarkeit von AKS	54
7	Beauflagung von AKS in der Genehmigung	55
7.1	Abschaltkonzept für nachweislich wirksame Systeme	55
7.2	Erläuterungen	56
7.2.1	Einflussanalyse und Erklärung der Übertragbarkeit	56
7.2.2	Sichtfeldanalyse am Standort	56
7.2.3	Betriebs-Handbuch und Inbetriebnahme-Protokoll	57
7.3	Nachweis im Testbetrieb	57
8	Detektion von Bewirtschaftungsereignissen	58
8.1	Rechtlicher Hintergrund (Neugenehmigungen)	58
8.2	Detektion landwirtschaftlicher Ereignisse und Abschaltsteuerung	58
8.2.1	Komponenten der Detektion	59
8.2.2	Nachweis der Wirksamkeit automatisierter Bewirtschaftungsabschaltung	60
9	Fazit, Ausblick und Forschungsfragen	62

Literaturverzeichnis	64
Abbildungsverzeichnis	68
Tabellenverzeichnis	69
Abkürzungsverzeichnis.....	70
A Anhang.....	72

Zusammenfassung

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt (FuE) „AKS-Praxis“ knüpft an die vorausgehenden Arbeiten zur Vereinheitlichung der Anforderungen an die Validierung von Antikollisionssystemen (AKS) durch Feldstudien zur Erprobung an. Eingangs evaluiert das Projekt die bisherigen Anforderungen an die Durchführung von Erprobungen (KNE 2019) sowie die im Rahmen des FuE Projektes (Bruns et al. 2021) formulierten Kriterien und Maßstäbe für die Beurteilung der Wirksamkeit von AKS (vgl. Kapitel 2). Ergänzt wird die Evaluation durch die im Rahmen eines parallelen Forschungsprojektes des Landes Schleswig-Holstein¹ erarbeiteten Konventionsvorschläge für eine einheitliche statistische Datenauswertung. Kapitel 3 fokussiert sich auf die Bemessung der Reaktionsdistanz, deren Bemessung für eine rechtzeitige Abschaltung von zentraler Bedeutung ist. Der Fokus liegt auf der Nachschärfung der Parameter Fluggeschwindigkeit und Trudelzeit.

Aufgrund der 2022 vorgenommenen Rechtsänderungen befasst sich Kapitel 4 eingehend mit dem neuen Regelungsregime für die Anwendung von Schutzmaßnahmen, insbesondere AKS. AKS wurden als Schutzmaßnahme neu eingeführt. Als Voraussetzung für ihre Anwendung in Genehmigungsverfahren ist ein Nachweis erforderlich, dass die Systeme wirksam sind. Dass eine derartige Anerkennung bisher nur für ein System formell attestiert ist, schränkt die Anwendung bzw. die Rechtssicherheit der Anwendung ein. Als weitere Restriktion kommen die Regelungen zur Begrenzung der wirtschaftlichen Zumutbarkeit von Schutzmaßnahmen hinzu.

Das FuE-Projekt hat sich in Kapitel 5 eingehend mit den wirtschaftlichen Aspekten des AKS-Einsatzes befasst. Durch eine beispielhafte Berechnung der Zumutbarkeit von AKS konnte gezeigt werden, dass die anfallenden Investitionskosten für AKS die Spielräume für deren Einsatz begrenzen, selbst wenn die Ertragsverluste durch bedarfsgerechte Abschaltung begrenzt sind. Eine hinreichende Leistungsfähigkeit vorausgesetzt, kann den wirtschaftlichen Restriktionen begegnet werden, in dem ein System mehrere WEA überwacht und die Kosten pro WEA aufgeteilt werden. Auch eine Klarstellung der im Rahmen der Zumutbarkeit anrechenbaren Investitionskosten wäre hilfreich.

Da die rechtlichen Regelungen einige Fragen offenlassen, werden in Kapitel 6 Ansatzpunkte aufgezeigt, die die AKS-Anwendung befördern könnten. Hierzu gehören eine Festlegung der Mindest-Betriebszeit pro Jahr, die Spezifizierung von konstellationsspezifischen Einsatzbereichen und die Klärung der „Nicht-Verfügbarkeit“ von AKS.

Kapitel 7 wendet sich der Beauflagung von nachweislich wirksamen AKS in der Genehmigung zu. Für die Beurteilung der Vermeidungswirksamkeit im Einzelfall ist ein Abschaltkonzept zu erstellen, in dem die Übertragbarkeit der ermittelten Gesamt- bzw. Schutzrate in Anbetracht der Abdeckung am Standort darzulegen ist. Zur fortlaufenden Dokumentation des AKS-Betriebs ist ein Betriebs-Handbuch zu führen. Es beinhaltet ein Inbetriebnahme-Protokoll, das die Referenz für die Genehmigung bildet, gegenüber der alle Änderungen und Anpassungen zu dokumentieren sind.

Abschließend befasst sich das Projekt mit Analogien und Unterschieden der Vogeldetektion im Vergleich zur automatisierten Detektion von landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignissen (vgl. Kapitel 8).

¹ Finanziert durch das Ministerium für Energiewende Klimaschutz Umwelt und Natur (MEKUN), Laufzeit 09/2022 bis 12/2023, verlängert bis 08/2024.

Abstract

The research and development project (R&D) "AKS-Praxis" builds on previous work aimed at standardizing the requirements for the validation of anti-collision systems through fieldtests for an effective shutdown on demand. Initially, the project evaluates the existing requirements for conducting tests (KNE 2019) as well as the criteria and standards formulated within the scope of the R&D project (Bruns et al. 2021) for assessing the effectiveness of anti-collision systems (see Chapter 2). This evaluation is complemented by the proposals for uniform statistical data analysis developed within a parallel research project by the state of Schleswig-Holstein. Chapter 3 focuses on assessing the reaction distance, which is crucial for timely deactivation. The emphasis is placed on refining the parameters of flight speed and spin time.

Due to the legal changes made in 2022, Chapter 4 discusses in detail the new regulatory framework for the application of protective measures, particularly collision avoidance systems, as they were introduced as a protective measure. As a prerequisite for their application in licensing procedures, proof is required that the systems be effective. The fact that such recognition has only been formally attested for one system so far limits the application and the legal certainty of its use. As an additional restriction, the regulations regarding the limitation of the economic feasibility of protective measures come into play. The R&D project has thoroughly addressed the economic aspects of using anti-collision systems in Chapter 5. Through a sample calculation of the feasibility of anti-collision systems, it has been demonstrated that the incurred investment costs restrict the scope for their deployment, even if the loss of revenue due to demand-based shutdown is limited.

Assuming sufficient performance capacity, economic restrictions can be addressed by monitoring multiple wind energy plants with a system that distributes costs per wind energy plant. Additionally, a clarification of the investment costs that can be accounted for within the framework of what is considered reasonable would be helpful. Since the legal regulations leave some questions open, Chapter 6 presents approaches that could promote the application of. These include determining a minimum operating time per year, specifying constellation-specific operational areas, and clarifying the "non-availability" of these systems. Chapter 7 addresses the approval of demonstrably effective anti-collision systems. For assessing the effectiveness of avoidance measures in individual cases, a shutdown concept must be developed, detailing the transferability of the assessed overall or protection rate considering the coverage at the site.

An operations manual must be maintained for the ongoing documentation of the effectiveness of the anti-collision system. It contains an operational commissioning protocol which serves as the reference for the approval, against which all changes and adjustments must be documented.

Finally, the project addresses analogies and differences in bird detection compared to the automated detection of agricultural management events (cf. Chapter 8).

1 Einleitung

Antikollisionssysteme (AKS) sind eine wirksame Schutzmaßnahme, die jedoch aus vielfältigen Gründen bisher in sehr begrenztem Umfang in der Praxis Anwendung finden. Das Arbeitsprogramm des Forschungs- und Entwicklungsprojektes (FuE) „AKS-Praxis“ sah zur Unterstützung der Anwendung drei inhaltliche Arbeitsschwerpunkte vor:

- Die Evaluation bisheriger Erprobungserfahrungen mit dem Ziel, die Umsetzbarkeit bisheriger Anforderungen zu ermitteln (AP 2). Dadurch sollte die Erprobung weiterer Systeme unterstützt werden.
- Die Aktualisierung der Annahmen zur rechtzeitigen Abschaltung unter Auswertung veröffentlichter Fachliteratur (AP 3). Hier sollte u. a. untersucht werden, inwieweit vorsorgliche Annahmen durch neue Erkenntnisse ersetzt werden können.
- Die Aufbereitung und die Vermittlung des Erkenntnisstandes über AKS an die betroffenen Fachkreise und die interessierte Öffentlichkeit (Wissenstransfer, AP 4), mit dem Ziel, die Sicherheit bei der Anwendung dieser Maßnahme in der Genehmigungspraxis zu erhöhen.

Nach Projektstart im Herbst 2023 wurde das Arbeitsprogramm in Abstimmung mit dem Forschungsgeber überarbeitet und erweitert, um den zwischenzeitigen Entwicklungen (parallele Forschungsarbeiten, Beschleunigungsgesetzgebung) gerecht werden zu können:

Nachdem im Herbst 2022 die Arbeiten an einem Forschungsprojekt des Landes Schleswig-Holstein begonnen hatten¹, zeichnete sich ab, dass es inhaltliche Überschneidungen zwischen den Projekten geben würde. Daher wurde entschieden, die Arbeiten an AP 2 zunächst zurückzustellen und die Veröffentlichung des Prüfrahmen AKS abzuwarten. Es erschien nicht zielführend, „konkurrierende“ bzw. ggf. voneinander abweichende Anforderungen und Prüfvorgaben zu erarbeiten.

Das AP 3 wurde um die Befassung mit den seinerzeit neuen Vorgaben der BNatSchG-Novelle und des Windenergieflächenbedarfsgesetzes (hier: § 6 WindBG) erweitert. Der Fokus lag in der Folge auf der Klärung der Anwendungsbedingungen für AKS im Rahmen der Zulassungsregime nach § 45b BNatSchG und § 6 Windenergieflächenbedarfsgesetz (WindBG). Dazu gehörte

- eine Analyse der Schutzmaßnahme AKS im Vergleich zu anderen Schutzmaßnahmen (Gleichwertigkeit, relative Vorzugswürdigkeit, vgl. Kapitel 4.1),
- die Analyse und Konzeption der aus den rechtlichen Vorgaben abzuleitenden Anforderungen an die Anerkennung von AKS mit Fokus auf der Option der Anerkennung auf Bundesebene (vgl. Kapitel 4.3);
- die Analyse der Anwendbarkeit unter den (restriktiven) Zumutbarkeitsgrenzen mit Fokus auf den verfügbaren Investitionskostenrahmen (vgl. Kapitel 5.1 und 5.2; KNE 2024c),
- die Möglichkeiten zur Minimierung von Ertragsverlusten durch Optimierung von Abschalthäufigkeit und -dauer (vgl. Kapitel 5.3; Steinkamp et al. 2024).

¹ Das Projekt wurde durch das Ministerium für Energiewende Klimaschutz Umwelt und Natur (MEKUN) des Landes Schleswig-Holstein finanziert. Die Federführung hatte das Landesamt für Umwelt Schleswig-Holstein (LfU SH). Die finale Fassung wurde am 08.08.2024 als Erlass in Schleswig-Holstein eingeführt.

In Kapitel 6 sind Änderungs- und Untersetzungsvorschläge für rechtliche Regelungen zusammengefasst, die eine Anwendung von AKS erleichtern bzw. fördern könnten.

Der Forschungsnehmer befasste sich außerdem eingehend mit den aus Behördensicht wichtigen Fragen der Beauftragung von AKS in der Genehmigung (vgl. Kapitel 7).

Darüber hinaus recherchierte das Forschungsteam, welche Detektionssysteme für die Steuerung der Bewirtschaftungsabschaltung in der Entwicklung bzw. teils bereits in der Anwendung sind (vgl. Kapitel 8). Diese Arbeiten (vgl. auch KNE-Paper 2025) können als Ausgangspunkt für die Formulierung von Anwendungsbedingungen bei der Bewirtschaftungsabschaltung genutzt werden.

In der letzten Phase des FuE-Projektes stand die Befassung mit dem Prüfrahmen AKS Schleswig-Holstein im Vordergrund. Das Projektteam kam zu der Einschätzung, dass der Prüfrahmen an bisherige Anforderungen und Grundprinzipien zum Nachweis der Vermeidungswirksamkeit anknüpft und diese sinnvoll und fachlich begründet ergänzt. Die Anforderungen an die Datenermittlung wurden konkretisiert mit dem Ziel, mögliche Fehlerquellen zu reduzieren. Neu hinzugekommen sind Standards für die Datenauswertung mit statistischen Methoden, die die empirische Belastbarkeit der ermittelten Raten absichern sollen. Aus Sicht des Forschungsnehmers bilden die Methoden im Prüfrahmen einen neuen Stand der Wissenschaft für die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von AKS (Detektionsrate²) ab.

Von einer Aktualisierung der Anforderungen des KNE-Anforderungsprofils Erprobung (KNE 2019) und der Fortschreibung der Maßstäbe zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit (Bruns et al. 2021) wurde daher abgesehen.

Im Projektverlauf führte das Projektteam zwei Workshops mit Vertretern und Vertreterinnen der Landesnaturschutzverwaltungen durch. Diese dienten dem Wissenstransfer und der gegenseitigen Information über Anwendungsperspektiven und -hemmnisse. Für den Wissenstransfer (AP 4) organisierte das Projektteam im Verlauf des Jahres 2024 drei Online-Veranstaltungen, eine Präsenz-Veranstaltung und die Abschlusskonferenz.

² Der Begriff Detektionsrate wird als Oberbegriff für die Erfassungs- und Klassifizierungsleistung (Gesamtrate) sowie die Schutzrate verwendet.

2 Anforderungen an den Wirksamkeitsnachweis

Um als fachlich anerkannte Schutzmaßnahme eingesetzt zu werden, müssen AKS für die automatisierte Abschaltsteuerung einen Wirksamkeitsnachweis erbringen. Dieser soll zeigen, dass eine Grundanforderung erfüllt ist, nämlich dass das System mit hoher Zuverlässigkeit in der Lage ist, eine Zielart zu erkennen und bei deren Annäherung „rechtzeitig bei Unterschreitung einer vorab artspezifisch festgelegten Entfernung zur Windenergieanlage per Signal die Rotordrehgeschwindigkeit bis zum ‚Trudelbetrieb‘ zu verringern“ (Anlage 1 Abschnitt 2 zu § 45b BNatSchG).

2.1 Bisherige Anforderungen

Mit dem „Anforderungsprofil Erprobung“ (KNE 2019) wurden in einem ersten Schritt Anforderungen an die Durchführung eines Feldversuchs adressiert. Es sollte dazu beitragen, die wissenschaftliche Belastbarkeit und Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die aus einem FuE-Projekt resultierenden Veröffentlichungen (Bruns et al. 2021; KNE 2021) formulierten Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von Systemen vor dem Hintergrund der Annahme, dass diese einen Großteil der Flüge einer Zielart durch rechtzeitige Abschaltung schützen sollten.

Im Zeitraum zwischen 2019 und 2024 wurden einige Erprobungen von Systemen durchgeführt. Aus der Systemübersicht (KNE 2024b) ist zu entnehmen, zu welchen Systemen auch Erprobungsberichte bzw. Validierungsberichte veröffentlicht wurden. Ziel des Projekts war es, die bei den Erprobungen gesammelten Erfahrungen als Grundlage für die Fortschreibung von Anforderungen zu nutzen. Die Erkenntnisse sind im folgenden Kapitel zusammengefasst.

2.1.1 Evaluierung „Anforderungsprofil Erprobung“ (KNE 2019)

Um die Praktikabilität der Anforderungen und Maßstäbe vor dem Hintergrund der Erprobungserfahrungen zu evaluieren, führte der Forschungsnehmer zwischen August und Oktober 2023 leitfadengestützte Befragungen von Gutachtern und Gutachterinnen³ durch, die an Erprobungsvorhaben von AKS⁴ beteiligt waren und entsprechende Berichte verfasst haben.

Zum einen wurde nach der Praktikabilität der Anforderungen bezüglich der Durchführung von Feldversuchen gefragt (Aufwand, Realisierbarkeit). Zum anderen standen die zur Datenerfassung angewendeten Methoden und die Bestimmung der Erfassungs- und Erkennungsrate im Fokus. Die untenstehenden qualitativen Ergebnisse erheben nicht den Anspruch, den Ergänzungs- und Fortschreibungsbedarf für die Durchführung von Feldversuchen („Erprobung“) und die Validierung vollständig abzubilden. Jedoch sind wertvolle Hinweise enthalten, die für die Qualität der Datenerhebung bedeutsam sind.

2.1.1.1 Hinweise zur Datenerfassung

Das Setup der Erprobung zur Datenerfassung (Einrichtung, Vorgehensweise), insbesondere den Einsatz von **Laser Rangefindern (LRF)**⁵ als Kontrollsystem, sahen die Befragten als geeignete Methode für die Ermittlung der Referenzdaten an. Es habe sich bewährt, **jeweils zwei**

³ Gutachter und Gutachterinnen von ARSU, OekoFor, der energy consult GmbH und der VSW Sempach.

⁴ IdentiFlight (IDF), AVES und BPS Long Range (Bioseco).

⁵ Zur Funktionsweise vgl. KNE (2024f).

Personen pro LRF einzusetzen, die sich Beobachtung und Aufzeichnung der Daten teilen. Dies sei wesentlich für die Vollständigkeit und Genauigkeit der Dokumentation.

Die Gutachter betonten, dass valide Referenzdaten essenziell für die Belastbarkeit der AKS-Validierung sind. Die **LRF-Referenzdaten** müssten eine hohe Qualität aufweisen, damit die AKS-Ergebnisse nicht verfälscht werden. So sollte ausgeschlossen sein, dass sich etwaige Messfehler der beiden abzugleichenden Systeme aufaddieren. Um **zeitliche Messungenauigkeiten** bei den LRF-Daten zu reduzieren, sollte darauf geachtet werden, dass die Zeiteinstellungen der verwendeten Geräte (LRF, Smartphone, Laptop) synchronisiert sind und alle denselben Bezugspunkt (z.B. NTP-Zeitserver) haben. Zur Reduzierung **räumlicher Messungenauigkeiten** sollte das LRF während der Erprobung regelmäßig durch die Messung georeferenzierter Messpunkte kalibriert werden. Die Kontrollmessungen und Abweichungen sollten dokumentiert werden. Messungenauigkeiten im Gelände ließen sich nach Aussage der Experten aber nicht vollständig reduzieren, daher sei festzulegen, welche **Abweichungen** bei der LRF-Messung toleriert werden (**Fehlertoleranz**). Nicht zuletzt sei festzulegen, ob und wie Messfehler bei den aufgenommenen Daten korrigiert werden können.

Um die Daten des Kontrollsystems LRF mit den vom AKS aufgezeichneten Daten hinsichtlich Position des Vogels, Verlauf und Länge vergleichen zu können, müssen die LRF-Datenpunkte zu Tracks (Flugwegen) verbunden werden. Dies sollte zum Standard gehören. Die Flugwege können grafisch dargestellt und verglichen werden⁶.

Der Untersuchungszeitraum und die Anzahl der Untersuchungstage muss gewährleisten, dass eine ausreichende Zahl an Kontroll-Datenpunkten und -tracks aufgezeichnet werden kann. Im „Anforderungsprofil“ sei die Erfassung von mindestens 100 LRF-Tracks vorgesehen. Diese Anforderung sei hilfsweise gerechtfertigt, man sei damit auf der „sicheren Seite“. Bei Arten mit geringer Flugaktivität könne es aber schwierig sein, innerhalb der Beobachtungsperiode eine so hohe Zahl von Tracks zu erreichen. Alternativ zur Festlegung einer bestimmten Zahl von Tracks könne die benötigte Datenmenge auch statistisch abgesichert werden. Diese Überlegung wurde im Prüfraum AKS Schleswig-Holstein durch die Ermittlung eines Konfidenzintervalls aufgegriffen. Liegt die ermittelte Erfassungsrate in einem Konfidenzintervall, dessen unterer Wert z. B. bei 75 Prozent liegt, sei die ermittelte Rate hinreichend abgesichert.

2.1.1.2 Datenauswertung

Das „Anforderungsprofil Erprobung“ (KNE 2019) enthält keine Anforderungen an eine standardisierte Datenauswertung. Wie belastbare Daten erhoben werden, sei beschrieben, wie sie ausgewertet werden sollen, wurde offengelassen. Wenn die Auswertung (Datenpunkt- bzw. Track-Abgleiche) nicht einheitlich erfolge, seien die Ergebnisse weniger aussagekräftig. Auch ließen sich die Ergebnisse der Erprobung verschiedener AKS dann nicht vergleichen. Hier sollte nachgebessert werden. Bisher gebe es mit den Erprobungsberichten für IDentiFlight (IDF) eine „gute fachliche Praxis“. Ob diese den Standard bildet oder andere statistische Methoden anzuwenden sind, müsse im Wege einer Konventionsbildung geklärt werden.

⁶ Das Büro OekoFor hat eine Applikation entwickelt, mit der die aufgenommenen Datenpunkte zu Tracks verbunden werden können. Sie wurde in allen Erprobungen von IDF angewandt und hat sich als hilfreich erwiesen.

2.1.1.3 Reichweite

Die Reichweite der Kameras kann durch Messungen nachgewiesen werden. Die Messungen belegen, bis zu welcher Entfernung ein Objekt einer definierten Größe von der Kamera als relevantes Zielobjekt erfasst wird. Die Reichweite als solches ist aber kein separates Anforderungskriterium. Sie ist vielmehr in die Erfassungsrate (die sich auf einen durch die Reaktionsdistanz bestimmten Bereich beziehen muss) integriert. Das Kamerasystem muss einen Erfassungsbereich abdecken, dessen Entfernung durch den artspezifischen Reaktionsbereich definiert ist (innerer Radius). Ist die Reichweite des Kamerasystems gering, wird die Erfassungsrate im relevanten Bereich niedrig ausfallen. Eine Angabe zur Reichweite hat für sich genommen also nur einen informatorischen Charakter und gehört daher nicht zu den „Anforderungen im eigentlichen Sinne“. Dies gelte im Kontext von Erprobungen auch für die Abdeckungsrate (siehe unten).

2.1.1.4 Erfassungsrate/Erkennungsrate

Im Anforderungsprofil Erprobung wurden Anforderungen an die Erfassungsrate und an die Erkennungsrate unterschieden. Die Gutachter hielten es für fachlich vertretbar, nicht zwischen einer Erfassungs- und Erkennungsrate zu unterscheiden. Es seien voneinander abhängige Variablen. Erfassung eines Vogels und seine Erkennung („Klassifizierung“) seien eng miteinander verschränkt. Es wäre daher zielführend, stattdessen eine **Gesamtrate** zu ermitteln. Diese habe keine geringere Aussagekraft, eine Standardabsenkung bzw. Qualitätsverlust sei nicht zu befürchten. Allerdings bestehe ein Unterschied zwischen einer Gesamtrate eines Systems, das die Zielarten auf Grundlage einer Größenklassifizierung erkennt, und einer Gesamtrate eines artselektiven Systems. Es sollte geprüft werden, ob die Angabe einer Gesamtrate für eine der beiden Klassifizierungsarten vorteilhafter ist oder ob sie beiden gleichermaßen gerecht wird.

2.1.1.5 Abdeckungsrate

Die Gutachter wiesen darauf hin, dass im Rahmen der Erprobung darauf zu achten sei, das System und LRF so zu positionieren, dass der fragliche Erfassungsbereich von beiden Systemen gut einsehbar ist. Ausschlaggebend dürften hier die technischen Merkmale der Kameras (Öffnungswinkel, Brennweite, Sichtfeld) sein. Es sei aber fraglich, ob eine bestimmte Abdeckungsrate ein sinnvolles Kriterium für den Nachweis der Leistungsfähigkeit im Rahmen der Erprobung ist. Ist die Abdeckung im Erfassungsbereich gering, wird das System keine hohe Gesamt- oder Schutzrate erreichen. Der Parameter „Abdeckungsrate“ könne für die Erprobung also entfallen. Gleichwohl sei die Abdeckung zu ermitteln (und zu dokumentieren) denn sie sei ein wichtiger Einflussfaktor und spiele für die Standortprüfung eine Rolle. Von der Abdeckung (bzw. Einsehbarkeit) hängt ab, ob die an Erprobungsstandorten ermittelte Raten auch im konkreten Anwendungsfall angewendet werden können. Dazu müsse eine dem Erprobungsstandort vergleichbare Abdeckung erreicht werden. Dieser Aspekt spielt eine wichtige Rolle, vor allem wenn das System den Erfassungsbereich von mehr als einer Windenergieanlage (WEA) abdecken soll.

2.1.2 Fazit

Die Befragungen ergaben, dass das Anforderungsprofil Erprobung bis dato eine gute Grundlage für die einheitliche Durchführung von Feldstudien bot. Nicht umsonst sei es auch in die Erarbeitung des Prüfrahmens eingeflossen. Einzelne Hinweise, die der Qualitätssicherung dienen, sollten noch ergänzt werden. Im Interesse der einheitlichen Datengewinnung sind

Präzisierungen, etwa zur Festlegung des Erfassungsbereichs, sinnvoll. Die Einschätzung, welche Werte für den Nachweis der Wirksamkeit erforderlich sind und welche nicht, unterstützt die im Prüfraumen AKS Schleswig-Holstein vorgenommene Zusammenfassung zu einer Schutzrate. Die einzelnen Werte sollten nachvollziehbar angegeben werden, ausschlaggebend für die Anerkennung ist jedoch nur ein Wert, der diese Faktoren integriert.

2.2 Spezifische Anforderungen im Prüfraumen AKS Schleswig-Holstein

Nahezu zeitgleich mit dem FuE-Projekt startete das Ministerium für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur (MEKUN) unter Federführung des Landesamtes für Umwelt Schleswig-Holstein (LfU SH) ein Forschungsprojekt mit dem Ziel, Anforderungen an die Entwicklung, Validierung und Prüfung von AKS für WEA an Land zu formulieren. Die interdisziplinär besetzte Arbeitsgruppe und die Form der Erarbeitung zielten darauf ab, eine tragfähige Konvention zu entwickeln und die Anwendungsbedingungen von AKS in Schleswig-Holstein zu klären. Der Ergebnisbericht wurde am 1.7.2024 als „Prüfraumen AKS Schleswig-Holstein“ (MEKUN u. LfU SH 2024) veröffentlicht und am 8.8.2024 per Erlass für das Land Schleswig-Holstein eingeführt.

In dem Projekt erarbeitete die Arbeitsgruppe weitergehende Anforderungen an die Erprobung von Systemen. Hierbei knüpften sie an das Anforderungsprofil Erprobung (KNE 2019) und die im Rahmen eines FuE-Projektes entwickelten Empfehlungen für Maßstäbe und Mindeststandards (Bruns et. al 2021, KNE 2021) an. Ziel war es, die Kriterien und bisher formulierten Anforderungen hinsichtlich ihrer Aussagekraft zu überprüfen. Denn diese basierten zum damaligen Zeitpunkt im Wesentlichen auf Annahmen und Experteneinschätzungen.

Im Zuge des MEKUN-Projektes wurden die Bausteine für den „grundsätzlichen Wirksamkeitsnachweis“ durch Erprobung und Validierung weiterentwickelt. Das KNE war nicht am Erarbeitungsprozess beteiligt. Inhalt und Richtung der Weiterentwicklungen (vgl. Kapitel 2.2.1 bis 2.2.5) sowie das vorgeschlagene Prozedere für den Wirksamkeitsnachweis als Voraussetzung für die Anwendung der AKS in der Genehmigung (vgl. Kapitel 2.2.6) konnten erst in der Schlussphase (Frühjahr 2024) bzw. nach der Veröffentlichung ausgewertet werden⁷.

Vorwegzunehmen ist, dass mit dem Prüfraumen AKS (MEKUN u. LfU SH 2024) ein neuer Stand des Wissens vornehmlich im Hinblick auf die Datenauswertung zur Ermittlung einer Detektionsrate als zentralem Kriterium für die Wirksamkeit erarbeitet wurde, auf den sich neu startende Erprobungen beziehen sollten. Die Forschungsnehmer begrüßen, dass für den Prüfraumen eine Evaluierung vorgesehen ist.

Eine Weiterentwicklung besteht auch darin, dass der Prüfraumen das Spektrum der bisher formulierten Anforderungen an eine Systemerprobung erweitert hat und einzelne relevante Fragestellungen vertieft hat. Zu nennen sind

- die Normensetzung bei Hard- und Software Entwicklung und Erfordernisse bei Modifikationen von AKS (vgl. ebd. ab S. 24),
- die Ermittlung der Einflussfaktoren auf die Detektionsrate und damit auf die Wirksamkeit des AKS und die Forderung nach einer Einfluss- und Wirkungsanalyse. Diese dient auch zur Nachvollziehbarkeit der Erprobungsergebnisse und zur Übertragbarkeit derer auf

⁷ Der „Prüfraumen AKS Schleswig-Holstein“ wurde am 1. Juli 2024 veröffentlicht und am 8. August 2024 per Erlass in Schleswig-Holstein eingeführt. Für Erprobungen im Jahr 2025 gibt es noch Übergangsregelungen. Nach dem 31.12.2025 sind die Festlegungen des Prüfraumens verpflichtend anzuwenden. Eine Evaluierung ist nach drei Jahren vorgesehen.

andere Standorte (vgl. ebd. S. 27 ff),

- ein Leitfaden für LRF-Bedienung (vgl. ebd. S. 78 ff) zur Reduzierung von Fehlerquellen,
- statistisch berechnete mittlere Fluggeschwindigkeiten von 14 der 15 nach § 45b Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) als kollisionsgefährdet eingestuften Brutvogelarten (vgl. ebd. S. 73 f) und
- die Verpflichtung zu fortlaufender Dokumentation der Systementwicklung und -anwendung (Stichwort Betriebsprotokoll).

2.2.1 Berechnung der Reaktionsdistanz

Für die Berechnung der Reaktionsdistanz (vgl. MEKUN u. LFU SH 2024, S. 17f.) wurde die **mittlere Fluggeschwindigkeit** von 14 der 15 kollisionsgefährdeten Arten neu berechnet. Dadurch sind in die Formel einzusetzenden Werte für die artspezifische mittlere **Fluggeschwindigkeit** besser abgesichert (vgl. weitergehend Kapitel 3.1).

Sowohl das Kontrollsystem (Laser Rangefinder) als auch die zu erprobenden AKS können **Messfehler** bei der Positionsbestimmung im Raum nicht ausschließen. Die Berücksichtigung eines „relativen örtlichen Messfehlers“ in der Formel trägt dem Rechnung. Sie lautet nun:

$$r_{\text{Reaktionsdistanz}} = (v_{\text{Fluggeschwindigkeit}} \cdot t_{\text{Abschaltzeit}} + c_{\text{Rotorblattlänge}}) \cdot (1 + c_{\text{Messfehler}}).$$

In der Regel liegen etwaige Messfehler im einstelligen Bereich. Der Reaktionsbereich kann sich dadurch vergrößern. Die Berücksichtigung von Messfehlern erhöht den Anreiz, die Messgenauigkeit (Entfernungs- bzw. Positionsbestimmung) zu verbessern und die Geräte beim Einsatz zu kalibrieren.

Da der Vogel nicht immer senkrecht, sondern aus verschiedenen Winkeln auf das Rotorblatt zufliege, sei für den Faktor Rotorblattlänge ein Mittelwert einzusetzen, der die Anflugwinkel berücksichtigt. Die Rotorblattlänge ist dafür mit dem Faktor 0,64 (gerundet) zu multiplizieren (ebd. S. 21).

2.2.2 Erfassungsbereich

Wie groß dieser sein muss, hängt auch von der mittleren horizontalen und vertikalen Fluggeschwindigkeit der Art ab. Welche Form der Erfassungsbereich hat (kuppelförmig oder zylindrisch), hängt auch davon ab, wo die Kamera positioniert ist (am Boden oder an der WEA). Die verschiedenen Optionen wurden im Prüfraumen AKS (MEKUN u. LFU SH 2024, S. 19) durch mehrere Abbildungen illustriert, von denen hier zwei exemplarisch herausgegriffen sind:

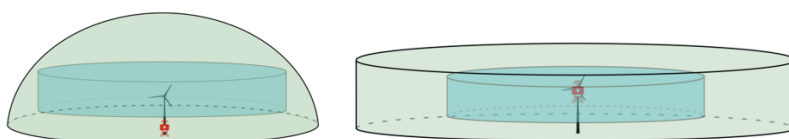


Abb. 1: Erfassungsbereiche für Flugaktivitäten der Zielvogelarten (nach MEKUN u. LFU SH 2024, S. 19)

2.2.3 Durchführung der Erprobung und Datenerhebung

Im Rahmen der Erarbeitung des „Konventionsvorschlags Prüfraahmen AKS“ in Schleswig-Holstein wurden die Anforderungen des KNE-Anforderungsprofils (KNE 2019) an die Durchführung von Erprobungen ergänzt und konkretisiert. Zur Durchführung der Erprobung („Feldversuch“, MEKUN u. LFU SH 2024, S. 30f.) wurden Hinweise zum Umgang mit dem **Laser Range-finder (LRF)** für die Erhebung der Kontrolldaten ergänzt. Darüber hinaus wurde festgelegt, dass die **Einflussfaktoren** am Erprobungsstandort auf die Erfassungsleistung (Topografie, Strukturen, Landnutzung, Positionierung) zu dokumentieren sind. Diese Dokumentation dient als Referenz für die Beurteilung der Übertragbarkeit. Aus fachlicher Sicht tragen die Ergänzungen zur Qualitätssicherung bei.

Der Prüfraahmen Schleswig-Holstein formuliert konkrete Anforderungen an eine **valide Datenerhebung und -aufbereitung** (vgl. MEKUN u. LFU SH 2024, S. 30f.). So wurden Standards für den Abgleich der zu Kontrollzwecken erhobenen LRF-Daten und „Systemdaten“ gesetzt. Diese beziehen sich auf die Auswahl der abzugleichenden Datenpunkte. Danach darf es „keine Vorselektion von Flügen oder LRF-Punkten“ geben, „weder bei der LRF-Erfassung noch bei der anschließenden Datenaufbereitung“ (ebd., S. 32). Diese Anforderung soll sicherstellen, dass nicht nur die „besten“ bzw. die am besten übereinstimmenden Daten für den Abgleich ausgewählt werden. So soll sichergestellt sein, dass alle Datenpunkte eines Tracks berücksichtigt werden und die Daten nicht bereits vorselektiert werden. „Dieser Aspekt ist zentral dafür, dass sich die gegebenenfalls eingeschränkte Abdeckung auch in der Gesamt- bzw. Schutzrate widerspiegelt“ (ebd.).

2.2.4 Anforderungen an die Datenauswertung

Die Anforderungen an die Methoden zur Datenauswertung tragen zur empirischen Absicherung und Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei. Der Prüfraahmen Schleswig-Holstein stellt auf **statistische Auswertungsmethoden** für die Ermittlung der Gesamt- bzw. Schutzrate ab (vgl. MEKUN u. LFU SH 2024, S. 340ff.). Die Erprobung (Feldversuche) liefere Daten, die keine Normalverteilung aufweisen. Zudem seien die Variablen, die in die Auswertung eingehen, nicht unabhängig voneinander. Statistische Methoden (logistische Regressionsmodelle) würden jedoch die Auswertung auch solcher Datensätze ermöglichen (ebd.). Durch die Anwendung statistischer Methoden und die Angabe eines Konfidenzintervalls (siehe unten) wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse und deren empirische Belastbarkeit verbessert.

2.2.5 Gesamt- bzw. Schutzrate

Die grundsätzliche Wirksamkeit eines AKS wird entweder durch die Gesamtrate oder die Schutzrate repräsentiert (MEKUN u. LFU 2024, S. 15). Die Unterscheidung zwischen Gesamtrate und Schutzrate ist neu. Sie soll der unterschiedlichen Arbeitsweise der Systeme Rechnung zu tragen.

Gesamt- und Schutzrate fassen jeweils Raten der Erfassung- und Erkennung (Klassifizierung) zusammen. Sie integrieren auch Faktoren wie die Abdeckung und Reichweite. Zwar sind die Parameter nicht im Einzelnen relevant, dennoch sollten sie im Validierungsbericht dokumentiert und somit nachvollziehbar sein.

Die Raten geben an, zu welchem Anteil eine Zielvogelart im Erfassungsbereich korrekt identifiziert bzw. durch Abschaltung geschützt wird. Ein AKS muss dabei keine „vollständige oder nahezu vollständige Erfassung“ gewährleisten. Zur Senkung eines signifikant erhöhten

Tötungsrisikos reicht es aus, wenn ein hoher Anteil der Flüge einer Zielart im Erfassungsreich erkannt wird, sodass rechtzeitig abgeschaltet werden kann.

Gesamt- bzw. Schutzrate müssen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit oberhalb eines definierten Mindestwertes liegen. Um diesen zu bestimmen, wurde ein **Konfidenzintervall** eingeführt. Die untere Grenze des Konfidenzintervalls der Gesamtrate wurde auf ≥ 70 Prozent festgelegt. Die untere Grenze des Konfidenzintervalls der alternativ analysierbaren Schutzrate wurde auf ≥ 75 Prozent festgelegt (ebd., S. 16)

Damit der Mindestwert der unteren Grenze des Konfidenzintervalls für realistische Stichprobengrößen die 70 Prozent überschreitet, muss die mittlere Gesamtrate i. d. R. bei deutlich über 75 Prozent liegen (ebd.). Laut Fischer (2024, mdl.) entsprechen die im Prüfraumen formulierten Anforderungen dem im FuE-Projekt (Bruns et al. 2021) formulierten Mindest-Anforderungsniveau (vgl. Tab. 1).

Tab. 1: Vergleich der Anforderungen zum Nachweis der Wirksamkeit der Vogelerkennung (eigene Zusammenstellung)

Kriterien	FuE-Projekt „Empfehlungen für Anforderungen“ (Bruns et al. 2021)	Prüfraumen AKS Schleswig-Holstein (MEKUN u. LfU SH 2024)
Erfassungsreichweite	Artspezifische Reaktionsdistanz Rotmilan: Rd. 350m plus Puffer (500m) Seeadler: Rd. 550m plus Puffer (750m)	Mittlere Gesamtrate⁸ (untere Grenze Konfidenzintervall mind. 70%) alternativ:
Erfassungsrate	75 - 90% Mindest-Mittelwert 80%	Mittlere Schutzrate⁹ (untere Grenze Konfidenzintervall mind. 75%)
Klassifizierungsrate	Mindest-Mittelwert 90%	
Räumliche Abdeckung	Mindestens 75%	

Das Konfidenzintervall dient der empirischen Absicherung des Erprobungsergebnisses. Systeme mit sehr hoher Leistungsfähigkeit können bereits mit wenigen aufgezeichneten Tracks ein Ergebnis erzielen, das im Konfidenzintervall liegt. Der Zeit- und Arbeitsaufwand für die Ermittlung der Leistungsfähigkeit würde sich entsprechend verringern.

2.2.6 Nachweis der Wirksamkeit der Vogelerkennung

Für den Nachweis einer zuverlässigen Detektionsleistung ist ein Bericht über die Durchführung des Feldversuchs und seiner Ergebnisse zu erstellen. Der Bericht wurde bis dato als „Erprobungsbericht“ bezeichnet. Alternativ bezeichnen ihn einzelne Systemanbieter als „Validierungsbericht“: Der unabhängige Gutachter überprüfe und bestätige, dass ein System festgelegte Anforderungen erfüllt, was einer Validierung entspreche. Dieses Verständnis erscheint

⁸ Die Gesamtrate (empirischer Mittelwert) bildet die Erfassungs- und Klassifizierungsrate im (artspezifischen) Erfassungsbereich ab.

⁹ Die Schutzrate (empirischer Mittelwert) bildet den Anteil der Zielvogelarten im Erfassungsbereich, die theoretisch vor einer Kollision geschützt sind, ab.

den Forschungsnehmenden plausibel¹⁰. Angesichts der nunmehr vorliegenden Anforderungen erscheint es gerechtfertigt, im Folgenden von Validierung bzw. Validierungsbericht zu sprechen. Allerdings ist das Vorliegen eines Validierungsberichtes nicht mit einer Anerkennung gleichzusetzen. Es können – wie im Prüfraumen AKS Schleswig-Holstein – weitere Prüferfordernisse und Nachweispflichten bestehen.

Der **Validierungsbericht** ist durch einen unabhängigen Gutachter zu erstellen, der vom Systemanbieter beauftragt wird.

Der Bericht legt nachvollziehbar dar, dass und wie

- der Feldversuch aufgebaut und die am Standort oder den Standorten herrschenden Einflussfaktoren dokumentiert sind,
- die Anforderungen an Durchführung, Datenerhebung und -auswertung umgesetzt wurden.

Nach dem Prüfraumen Schleswig-Holstein ist die Einhaltung der Anforderungen durch einen **Prüfbericht** zu bestätigen. Ein solcher Bericht soll von einer unabhängigen technischen Prüforganisation (z. B. TÜV) erstellt werden. Der Prüfbericht soll sich

- auf den Wirksamkeitsnachweis (Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Detektion) und
- auf die Einhaltung der Anforderungen zur Gewährleistung der technischen Sicherheit (Zertifizierung) beziehen.

Zu klären ist, ob der Prüfbericht eine zeitlich begrenzte oder fortlaufende Aufgabenstellung ist. Nach Auffassung der Forschungsnehmer sollte sich die Validierung der Detektionsleistung nicht allein auf Prüfung des Erprobungsberichtes beziehen, sondern auf den gesamten Prozess – von der Durchführung der Feldstudie über die Datenauswertung bis hin zu den Ergebnissen.

Der Zeitraum für die Prüfung der technischen Sicherheit kann unter Umständen eine fortlaufende Aufgabe sein, die sich auf die Anwendung der bedarfsgerechten Abschaltsteuerung im Betrieb erstreckt.

Aus Sicht des KNE sollten die Ergebnisse der Prüfberichte aus Transparenzgründen öffentlich zugänglich sein. Mit dem Vorliegen eines Prüfberichts sind die Voraussetzungen für eine Anwendung in der Genehmigung erfüllt. Im Genehmigungsverfahren kann sich die Behörde auf die im Prüfbericht grundsätzlich bestätigte Wirksamkeit des Systems beziehen. Der Fokus der Behörde kann dann auf standortbezogene Fragen der vermeidungswirksamen Implementierung des Systems gelegt werden (vgl. weitergehend Kapitel 7).

Hervorzuheben ist, dass ein AKS eine Erprobung mittels Feldtest nur einmal durchlaufen muss., um seine Leistungsfähigkeit bezogen auf Vögel einer bestimmten Größenklasse oder Art nachzuweisen. Die Qualitätssicherung (Zertifizierung) der technischen Komponenten durch die Prüfung der Entwicklungsschritte und ihre Dokumentation ist hingegen ein fortlaufender Prozess. Technische Änderungen oder Änderungen der Software müssen fortlaufend geprüft werden. Die Anwendung des Systems für weitere Arten (außer den im Feldtest vorkommenden Arten kann „virtuell“ durch ein Training der Bildauswertungssoftware erfolgen.

¹⁰ Als der Begriff 2019 etabliert wurde, bezog sich der Erprobungsbericht inhaltlich auf die nachvollziehbare Darlegung des Feldversuchs. Seitdem Anforderungen formuliert sind, deren Einhaltung durch Erprobung geprüft werden kann, bildet „Validierung/Validierungsbericht“ den Sachverhalt angemessen ab.

Optionen für ein bundesweit einheitliches Vorgehen bei der Anerkennung der Wirksamkeit von AKS werden in Kapitel 4.3 erörtert.

2.2.7 Nachweise während der Betriebsphase

Die Befragten wiesen drauf hin, dass sich man sich vor allem auf die Durchführung der Feldstudie und auf das Erfüllen der Maßstäbe für die Validierung konzentriert hätte. Es sei aber auch von Bedeutung, die Vermeidungswirksamkeit während der Betriebsphase, also über einen langen Zeitraum abzusichern. Dazu sei im Genehmigungsfall eine betriebsbegleitende Dokumentationspflicht zu verankern. Wichtig seien eindeutige Verantwortlichkeiten und eine Klarstellung von Art und Umfang der fortlaufend zu dokumentierenden Sachverhalte (Veränderungen). Nicht zuletzt sei das Vorgehen im Fehlerfall zu klären. Die Bagatellgrenzen für Abschaltungen sollten überdacht und ggfs. gesenkt werden. Wichtiger sei es, dafür zu sorgen, dass der Fehler nicht wieder auftrete.

3 Parameter zur Bemessung der Reaktionsdistanz (Auswahl)

Ziel des FuE-Projektes war es, den Wissensstand über Faktoren, die für die Vermeidungswirksamkeit relevant sind, zu aktualisieren und wenn möglich, zu vertiefen. Sowohl die Fluggeschwindigkeit als auch die Annahmen zur **Dauer der Reaktionszeit** („Trudelzeit“) beeinflussen die Reaktionsdistanz.

Die Recherche ergab, dass für die Erprobung keine weiteren Parameter ergänzt werden müssen. Durch ein Projekt mit umfangreicher Auswertung von Telemetriedaten lag hingegen ein neuer Wissensstand zur **mittleren Fluggeschwindigkeit** kollisionsgefährdeter Arten vor (vgl. Kapitel 3.1).

Das FuE-Projekt befasste sich darüber hinaus mit der Frage, inwieweit sich die **Reaktionszeit** (auch Trudelzeit genannt) genauer bestimmen ließe. In dem Zuge griffen die Autoren auch Fragen zur Definition des Trudelbetriebs auf (vgl. Kapitel 3.2).

3.1 Mittlere Fluggeschwindigkeit

Die Fluggeschwindigkeit eines Vogels hat Einfluss auf die Reaktionsdistanz. Je höher die (mittlere) Fluggeschwindigkeit, desto größer muss der Abschaltzylinder bemessen sein. Je größer die Reaktionsdistanz, desto größer muss die Erfassungsreichweite der Kameras sein. Entsprechend erhöhen sich die Anforderungen an die zuverlässige Erkennung einer Zielart in größerer Entfernung.

3.1.1 Horizontale und vertikale Fluggeschwindigkeit

Die mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit ist ein zentraler Faktor für die Berechnung der kritischen Reaktionsdistanz¹¹ (vgl. Reichenbach et al. 2021, S. 113; MEKUN u. LfU SH 2024). In früheren Veröffentlichungen (KNE 2019; Bruns et al. 2021) wurden die von Bruderer u. Boldt (2001, Tab. 4) ermittelten Werte für die Berechnung genutzt. Hierbei handelte es sich um art-spezifische Mittelwert-Spannen für unterschiedliches Flugverhalten von Thermikseglern. Diese wurden seinerzeit unter Einsatz eines Radarsystems nach wissenschaftlichen Standards ermittelt.

Ausschlaggebend für die horizontale Fluggeschwindigkeit ist die effektive Geschwindigkeit über Grund. Im Rahmen der AKS-Erprobung wurde vielfach diskutiert, ob es erforderlich sei, zwischen „lokalem Flug“ und „Streckenflug“ zu differenzieren¹². Der Grund ist, dass sich die Geschwindigkeiten beim Such- bzw. Jagdflug unterscheiden. In der Realität treten beide Verhaltensweisen zu unterschiedlichen Anteilen auf.

Auch beim Über- und Unterfliegen des Rotors können die Vögel einem Kollisionsrisiko ausgesetzt sein. Um dieses Risiko zu begrenzen, ist eine **vertikale Reaktionsdistanz** zum oberen bzw. unteren Rotorrand zu bestimmen. Das Maß wird durch die **vertikale Fluggeschwindigkeit** (Steig- und Sinkgeschwindigkeit) bestimmt. Diese ist ebenfalls artspezifisch.

Die Steig- und Sinkgeschwindigkeit ist in den untersuchten Erprobungsfällen für Rotmilan und Seeadler höhenabhängig. In Flughöhen von 200 bis 250 m beträgt die Steig- und Sink-

¹¹ Vgl. Formel in Kap. 2.2. Je höher die Fluggeschwindigkeit und je länger die Trudelzeit, desto größer ist die kritische Reaktionsdistanz.

¹² Flugwege im lokalen Flug sind überwiegend kreisend oder geschlängelt bis kurvig. Der Streckenflug ist hingegen überwiegend gerade und gerichtet.

geschwindigkeit des Rotmilans im Mittel $> 1 \text{ m/s}$. In niedriger Höhe – unter 50 m Flughöhe – gewinnen die Vögel hingegen nur langsam an Höhe (0,5 m/s; Reichenbach et al. 2021, S. 113f. und S. 118). Die Reaktionsdistanz zum oberen Rotorrand fällt daher etwas größer aus als zum unteren Rand.

Für die Erprobung von Systemen werden gemittelte Werte bzw. Medianwerte der vertikalen Fluggeschwindigkeit herangezogen. Da die Varianz in erster Linie durch die Flughöhe erklärt wird, besteht im Anwendungsfall (standortbezogene Prüfung) kein Anlass, andere Werte heranzuziehen. Gleichwohl kann erwogen werden, die Annahmen für die untere Reaktionsdistanz zu modifizieren, wenn ein rotorfreier Bereich vorliegt.

3.1.2 Studienlage zur Ermittlung der Fluggeschwindigkeit

Im Rahmen des FuE-Projektes hat der Forschungsnehmer recherchiert, inwieweit sich die Datenbasis inzwischen verbessert hat, so dass die Annahmen empirisch besser abgesichert werden können. Folgende Studien wurden ausgewertet.

Tab. 2: Studienlage zur Ermittlung der Fluggeschwindigkeit

Studie	Studienergebnisse
Kollisionsrisiko-Modell (RKR-Modell, Mercker et al. 2023)	Im Zuge der Entwicklung eines Kollisionsrisikomodells (RKR-Modell ¹³) haben Mercker et al. (2023) die Daten telemetrierter Rotmilane und optischer Flugwegaufzeichnungen herangezogen. Diese Daten wurden in verschiedenen Forschungsprojekten gesammelt und den Autoren zur Verfügung gestellt. Die Auswertung (empirische Schätzung) ergab eine mittlere Fluggeschwindigkeit von 8,33 m/s.
Erprobungsvorhaben AKS	Auch durch die Aufzeichnung von Flugwegen beim Einsatz von Detektionssystemen hat sich die Datenbasis für die Ermittlung von Fluggeschwindigkeiten verbessert. Die Ergebnisse zeigen allerdings standortabhängig eine beträchtliche Spanne. <ul style="list-style-type: none"> Im Rahmen der Erprobung des AKS Identiflight für den Seeadler an vier Standorten haben Reichenbach et al. (2023a) für diese Art einen Medianwert der horizontalen Fluggeschwindigkeiten ermittelt. Er liegt auf der Basis von 23.938 Messungen bei 10,7 m/s, bei einer Standardabweichung von 4 m/s. An einem Erprobungsstandort in Brandenburg haben Reichenbach et al. (2023b) die Flugdaten für Rotmilan und Seeadler ausgewertet. Die Autoren geben hier die horizontale Fluggeschwindigkeit des Seeadlers mit 12,2 m/s und die des Rotmilans mit 8,5 m/s an (ebd., S. 27).
Flugverhalten des Rotmilans (Reichenbach et al. 2023c)	Im Rahmen eines Forschungsprojektes für das Land Hessen haben Reichenbach et al. das Flugverhalten des Rotmilans in einem Windpark mit Hilfe des Systems Identiflight untersucht. Im Zentrum stand die Frage nach dem Ausweichverhalten. Die aufgezeichneten Datenpunkte ermöglichten auch eine Auswertung der Fluggeschwindigkeit (ebd., S. 44). Berechnet wurde ein so genannter gleitender Mittelwert ¹⁴ . Der Mittelwert der gemessenen horizontalen Fluggeschwindigkeit liegt bei 9,2 m/s, in Rotorhöhe liegt er mit 9,5 m/s geringfügig höher (ebd. S. 64). Diese Werte liegen über den durch statistische Auswertung ermittelten Werten (8,5 m/s; siehe weiter unten).

¹³ Informationen zum RKR-Modell finden sich unter KNE (2024d, online).

¹⁴ Bei der Berechnung wird die Fluggeschwindigkeit jeden Punktes mit den zwei Punkten davor und den zwei Punkten danach ermittelt und daraus ein Mittelwert gebildet.

Studie	Studienergebnisse
Fluhr et al. (2021)	Im Rahmen des französischen MAPE-Projektes ¹⁵ wurde eine Datenbank zur Fluggeschwindigkeit von 163 Vogelarten aufgebaut. Die Datenbank basiert auf Daten bereits publizierter Untersuchungen (überwiegend Radar- und Telemetriedaten), unveröffentlichter Daten aus GPS-Trackings und theoretischer Fluggeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Morphologie der Tiere. Eine Webapplikation ermöglicht es, mit Hilfe der Angabe der Zielart und Leistungskennwerten der WEA die Reaktionsdistanz anzugeben (EolDist 2021). Die Fluggeschwindigkeit wird jeweils in die Flugbewegungen „lokal“ und „migrierend“ unterschieden. Den ermittelten Werten liegt ein größerer Datensatz zugrunde, offenbar lässt dieser aber vorwiegend Aussagen über Flugverhalten während des Zuges (Streckenflug) zu. Insofern sind die Werte tendenziell höher als die bei Feldstudien ermittelten Daten.
Standortspezifische Fluggeschwindigkeit (Masden et al. 2021)	Masden et al. (2021) hoben hervor, dass die Fluggeschwindigkeit standort-variabel ist und von unterschiedlichen Faktoren - Verhalten der Tiere vor Ort, Windgeschwindigkeit oder Windrichtung - abhängen kann. Sie leiten daraus ab, dass dieser Einflussfaktor bei der modellbasierten Ermittlung von Kollisionsrisiken differenziert betrachtet werden sollte ¹⁶ . Die Erkenntnisse über Verhaltensunterschiede (Streckenflug, Nahrungsflug) und den Einfluss des Umfeldes (Offenland, Wald) rechtfertigten es, zu prüfen, ob die zugrunde gelegte Fluggeschwindigkeit bei einer standortbezogenen Prüfung der Vermeidungswirksamkeit eines AKS verändert werden muss. Die Einzelfallspezifika könnten eine Abweichung vom Mittelwert rechtfertigen. Die Abweichung von einem mit einem hohen Konfidenzintervall abgesicherten Mittelwert kann statistisch betrachtet jedoch nur sehr gering ausfallen.
Fluggeschwindigkeit im Prüfraumen AKS (MEKUN & LfU SH 2024, Anhang)	Für den „Prüfraumen AKS“ (MEKUN u. LfU SH 2024) wurde die artspezifische Fluggeschwindigkeit für 14 der 15 kollisionsgefährdeten Vögel ¹⁷ jeweils einzeln und auf Grundlage unterschiedlicher Datenquellen (GPS-Trackingdaten, LRF-Erfassungen sowie kamera- und radarbasierten Erfassungen) ¹⁸ berechnet. Die Auswertung, also die Ermittlung von realen Fluggeschwindigkeiten, erfolgte unabhängig vom Flugverhalten. Die Ergebnisse einschließlich der jeweiligen Datenquellen und Stichprobengrößen, sind für jede Art nachvollziehbar dargestellt (ebd., S. 59 ff.). Zur Absicherung der Angaben zur mittleren Fluggeschwindigkeit wird ein 95 Prozent-Konfidenzintervall ¹⁹ angegeben. Der im Konfidenzintervall liegende artspezifische Mittelwert der horizontalen und vertikalen ²⁰ Fluggeschwindigkeit ist in einer Tabelle (ebd., S. 73 f.) dargestellt. Die Autoren der Studie stellen fest, dass die statistisch ermittelten Werte nicht wesentlich von den bis dato aus der Literatur bekannten Werten abweichen (ebd., S. 57). Sie können bei einzelnen Arten teils etwas höher, teils etwas niedriger ausfallen

¹⁵ Projekt-Akronym für „Réduction de la Mortalité Aviaire dans les Parcs Éoliens en exploitation“.

¹⁶ So sollte nach Masden et al. (2021, S. 8) zum Beispiel zwischen einer standort- und einer verhaltensspezifische Fluggeschwindigkeit unterschieden werden. Dadurch könnten Unterschiede im Offenland bzw. über Wald und beim Flugverhalten (Streckenflug/Nahrungsflug) berücksichtigt werden.

¹⁷ Für die Sumpfohreule lagen keine Daten vor.

¹⁸ Diese Daten wurden in einer Vielzahl von Projekten erhoben und umfassen insgesamt 34.589.963 Datenpunkte (MEKUN u. LfU 2024, S. 52).

¹⁹ Ein Konfidenzintervall von 95 Prozent bedeutet, dass man zu 95 Prozent sicher sein kann, dass der wahre Wert des Parameters innerhalb dieses Intervalls liegt.

²⁰ Die vertikale Fluggeschwindigkeit (ebd., Tabelle C1) wird für alle 15 kollisionsgefährdeten Arten vereinfacht mit 1 m/s („steigend“ und „sinkend“) angenommen. Die vertikale Fluggeschwindigkeit ist für die Ermittlung der horizontalen Reaktionsdistanz nicht ausschlaggebend.

3.1.3 Mittlere Fluggeschwindigkeit nach MEKUN u. LfU SH (2024) als neuer Standard

Die im Kontext des Prüfrahmens AKS Schleswig-Holstein ermittelten Mittelwerte für die Fluggeschwindigkeit beruhen auf einer großen Datenbasis. Die Mittelwerte sind mit einem 95 Prozent Konfidenzintervall abgesichert. Die Daten stammen aus unterschiedlichen Landschaftsräumen, so dass sie bundesweit Geltung beanspruchen können. Allerdings bilden die Mittelwerte nicht das unterschiedliche Flugverhalten (lokaler Flug oder Streckenflug) der Arten ab. Die für den **Rotmilan** ermittelte horizontale Fluggeschwindigkeit beträgt **8,54 m/s**. Dies decke sich mit der Größenordnung der bisher bekannten Mittelwerte aus bisher durchgeführten Untersuchungen, der bei 8,65 m/s liege. Für den **Seeadler** liegt sie bei **13,79 m/s**. Dieser Wert liegt im Vergleich zu anderen Studien, in denen 12,3 m/s angegeben wurden, höher.

Tab. 3: Horizontale Fluggeschwindigkeiten der nach § 45b BNatSchG kollisionsgefährdeten Brutvogelarten nach (Bruderer u. Boldt (2001), EoIDist (2021) und MEKUN u. LfU SH (2024) in m/s.

Art	Bruderer u. Boldt (2001) ²¹ [m/s]	EoIDist (2021) [m/s]	MEKUN u. LfU SH (2024, S. 73f.); [m/s]
Seeadler	13,1	lokal: k. A. ²² / migrierend: 14 ± 1,1	13,79
Fischadler	12,5	lokal: 9,7 ± 1,4 / migrierend: 12,1 ± 1,8	12,35
Schreiadler	-	lokal: k. A. / migrierend: 13,1 ± 3,2	10,81
Steinadler	14,05	lokal: 15,1 ± 1,7 / migrierend: n. a.	14,1
Wiesenweihe	10,5	lokal: 6,3 ± 0,2 / migrierend: 10,6 ± 1,7	7,35
Kornweihe	11,55	lokal: 6,5 ± 0,2 / migrierend: 10 ± 1,3	9,01
Rohrweihe	11,4	lokal: 7,1 ± 0,5 / migrierend: 10,9 ± 2,1	9,36
Rotmilan	10,1	lokal: 8,2 ± 0,5 / migrierend: 13,4 ± 1,6	8,54
Schwarzmilan	12,37	lokal: 7,6 ± 0,5 / migrierend: 12,2 ± 1,9	9,36
Wanderfalke	12,3	lokal: 23,8 ± 8 / migrierend: 12,1 ± 3,5	11,19
Baumfalke	11,55	lokal: k. A./ migrierend: 11,3 ± 2,2	8,49
Wespenbussard	10,2	lokal: 7,8 ± 0,6 / migrierend: 12,2 ± 2,3	10,77

²¹ Mittelwerte

²² Keine Angabe

Art	Bruderer u. Boldt (2001) ²¹ [m/s]	EolDist (2021) [m/s]	MEKUN u. LfU SH (2024, S. 73f.); [m/s]
Weißstorch	11,83	lokal: $10,5 \pm 0,7$ / migrierend: $12,2 \pm 2,4$	10,77
Sumpfohreule	8,4	lokal: $8,4 \pm 1,4$ / migrierend: $8,4 \pm 1,4$	-
Uhu	-	lokal: $10,2 \pm 0,5$ / migrierend: k. A.	10,61

In Schleswig-Holstein sind die Werte **bei der Erprobung** von AKS verbindlich zur Berechnung der Reaktionsdistanz zu nutzen. Aus Sicht des KNE können die Werte bundesweit angewendet werden. Einheitlich bemessene Reaktionsdistanzen stellen sicher, dass die Leistungsfähigkeit (Gesamt- oder Schutzrate) verschiedener AKS-Typen vergleichbar ermittelt wird und sich auf einen ähnlich großen Erfassungsbereich bezieht.

Bei der Anwendung eines AKS als Schutzmaßnahme, das heißt für die standortbezogene Prüfung **im Genehmigungsverfahren** und die Einrichtung am Standort sind die statistisch ermittelten Werte als bestverfügbare fachliche Grundlage heranzuziehen. Folgt man der oben dargelegten Argumentation von Masden et al. (2021), können Abweichungen in begründeten Fällen erforderlich sein.

Da die Mittelwerte das unterschiedliche Flugverhalten bei lokalem Flug und Streckenflug nicht abbilden, wäre zu prüfen, ob hinreichend belegt werden kann, dass eine dieser beiden Verhaltensarten am Standort deutlich vorherrscht. Nur in diesem Falle wären graduelle Abweichungen zu rechtfertigen.

3.2 Reaktionszeit: Trudelbetrieb und Trudelzeiten

3.2.1 Abschaltung als Schutzmaßnahme

Wenn ein signifikant erhöhtes Tötungsrisiko vorliegt, ist dieses durch geeignete Maßnahmen zu mindern. Hier sieht § 45b Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) Anlage 1, Abschnitt 2 u.a. Abschaltungen als fachlich geeignete Maßnahmen zur Senkung eines signifikant erhöhtes Tötungsrisikos vor. Zu unterscheiden sind die

- bedarfsgerechte Abschaltung mittels Antikollisionssystem,
- bewirtschaftungsbedingte Abschaltung,
- phänologiebedingte Abschaltung.

Durch Abschaltung (synonym: Abregelung) der WEA soll ein Betriebszustand erreicht werden, bei dem vom Rotor kein erhöhtes Kollisionsrisiko mehr ausgeht.

Die Abschaltungen unterscheiden sich nach Anlass, Häufigkeit und Dauer. Kennzeichnend für bedarfsgerechte Abschaltung mittels Antikollisionssystem sind – je nach Flugaktivität vor Ort – mehrmalige kurzfristige Abschaltungen pro Tag. Betriebs- und Nichtbetriebsphasen wechseln sich ab. Bei bewirtschaftungsbedingten und phänologiebedingten Abschaltungen werden

die WEA dagegen über einen längeren Zeitraum²³ „außer Betrieb“ genommen. Bei einer bedarfsgerechten – also durch Flugaktivität und Annäherung induzierten Abschaltung – kommt es darauf an, dass der kollisionsrisikogeminderte Betrieb innerhalb kurzer Zeit („rechtzeitig“) erreicht wird. Bei den anderen Formen der Abschaltungen kommt es nicht in selbem Maße auf die Zeitspanne zwischen Abschaltung (Signal) und kollisionsgemindertem Betrieb an. Bei der bewirtschaftungsbedingten Abschaltung kommt es darauf an, dass die Abschaltmaßnahme ab Beginn des Bewirtschaftungsereignisses vorgenommen wird.

Allen Abschaltungsformen ist gemein, dass ein Rotor mit gepitchten Rotorblättern nicht stillsteht, sondern sich weiter leicht drehen kann. Hierfür hat sich der Begriff „Trudeln“ etabliert. Ein arretierter Stillstand, wie er etwa bei Wartungsarbeiten aus Sicherheitsgründen erforderlich ist, ist nicht verlangt.

3.2.2 Trudelbetrieb im BNatSchG

Der Begriff Trudelbetrieb taucht im Kontext von Abschaltungen erstmals bei Antikollisionssystemen im BNatSchG auf: Laut Anlage 1 Abschnitt 2 zu § 45b BNatSchG soll die Rotorgeschwindigkeit einer Windenergieanlage (WEA) bei AKS-Einsatz bis zum „Trudelbetrieb“ verringert werden. Der Begriff „verringern“ legt nahe, dass der Trudelbetrieb durch eine im Vergleich zum Lastbetrieb **niedrigere Drehzahl** gekennzeichnet ist.

3.2.2.1 Indikatoren für den Trudelbetrieb: Produktionszweck und Einspeisung

Im Rahmen der Rechtsprechung hat sich das Oberverwaltungsgericht (OVG) Lüneburg in seinem Beschluss vom 29.04.2019 - 12 ME 188/18 mit dem **Trudelbetrieb** befasst. Er wird dort als Betriebszustand „mit aus dem Wind gedrehten Rotorblättern und aktivierter Windnachführung der Rotorgondel“²⁴ bezeichnet. Der Trudelbetrieb diene im strittigen Fall nicht dem Produktionszweck der Stromabgabe und stelle insofern **keinen Betrieb im Sinne des § 4 Abs. 1 BImSchG** dar²⁵. Vielmehr beschreibe er den „**Ruhe- und Normalzustand** einer [...] Windenergieanlage, welche gegenwärtig nicht zur bezweckten Stromproduktion für das Netz in Betrieb ist“, weil sie abgeregelt ist (vgl. OVG Lüneburg, Beschluss vom 29. April 2019 – 12 ME 188/18, Rn 32 bei juris)²⁶.

Ein Trudelbetrieb liegt danach also vor, sobald die Anlage abgeschaltet ist, so dass sie keinen Strom mehr produziert bzw. einspeist. Wie schnell sich der Rotor nach Abschaltung dreht, ist hier nicht relevant.

3.2.2.2 Indikatoren für kollisionsarmen Trudelbetrieb

Das Oberverwaltungsgericht (OVG) Lüneburg hat sich im selben Beschluss auch mit der Frage befasst, wann ein Kollisionsrisiko vorliegt. Es hat dafür die Geschwindigkeit der Rotorblattspitzen als Maßstab herangezogen. Die Geschwindigkeit als Maßstab für das Kollisionsrisiko heranzuziehen, beruht auf der Annahme, dass das Risiko bei Bewegung steigt. Objekten, die sich mit hoher Geschwindigkeit im Luftraum bewegen, können Vögel (oder Fledermäuse) nicht oder nicht gut ausweichen.

²³ Betriebsbedingt je nach Betroffenheit von Brutpaaren entweder 24 oder 48 Stunden, phänologiebedingt je nach Zumutbarkeit max. vier bis sechs Wochen.

²⁴ OVG Lüneburg, Beschluss vom 29. April 2019 – 12 ME 188/18. Rn. 24 bei juris.

²⁵ Andere Gerichte, wie das VG Gelsenkirchen, bezeichnet den Trudelbetrieb als „eingestellten Betrieb“, Urteil vom 23. März 2022 – 8 K 1199/19, Rn. 246 bei juris.

²⁶ eitergehend vgl. KNE (2024e), KNE-Antwort 361 („Trudelbetrieb“).

Da bis dato keine fachwissenschaftlich fundierten Untersuchungen über das Ausweichvermögen bei bestimmten Geschwindigkeiten vorlagen, hat sich das Gericht mit einer Analogie aus dem Bereich des Straßenverkehrs beholfen und argumentiert, von einer Blattspitzengeschwindigkeit, die sich im Bereich des innerörtlichen Verkehrs Üblichen (30 bis 50 km/h) bewegt, gehe kein erhöhtes Kollisionsrisiko aus.

Das KNE hatte sich seinerzeit auf den Beschluss des OVG Lüneburg bezogen und die **Blattspitzengeschwindigkeit** als Indikator für das betriebsbedingte Kollisionsrisiko benannt. Im Folgenden wird begründet, warum die Bezugnahme auf die Blattspitzengeschwindigkeit revidiert werden muss:

Die Blattspitzengeschwindigkeit ist anlagenspezifisch. Sie nimmt mit dem Rotordurchmesser zu. Aufgrund dieses Zusammenhanges ist eine Geschwindigkeitsangabe als Bezugspunkt nicht tauglich. Moderne WEA können aufgrund der zunehmenden Rotorblattlänge maximale Blattspitzengeschwindigkeiten zwischen 30 und 50 km/h schon aus technischen Gründen nicht einhalten. Es spricht, wie im Folgenden dargelegt, einiges dafür, anstelle der Blattspitzengeschwindigkeit die **Rotordrehzahl** als Maßstab für den kollisionsarmen Betrieb heranzuziehen.

Die Rotordrehzahl hat nach den Kollisionsrisikomodellen (Band 2012, Mercker et al. 2023) einen großen Einfluss auf das Kollisionsrisiko. Die Hypothese ist, dass das Kollisionsrisiko umso geringer ist, je länger die Zeitspanne dauert, die dem Vogel für einen unbeschadeten Durchflug durch den Rotor zur Verfügung steht. Diese Zeitspanne wird umso kürzer, je schneller der Rotor dreht. Umgekehrt steht rechnerisch mehr Zeit für einen Durchflug zur Verfügung, je langsamer der Rotor dreht. Mit zunehmender Länge der Rotorblätter vergrößert sich die Strecke, welche die Rotorblattspitzen zurücklegen. Die Zeitspanne für die Passage eines Vogels ist aber gleich groß, unabhängig davon, ob der Vogel den Rotor nahe an der Nabe oder im Randbereich des Rotors passiert (vgl. KNE 2024e).

3.2.2.3 Kollisionsarme Rotordrehzahl

Außer der Drehzahl haben die folgenden Variablen Einfluss auf das Kollisionsrisiko pro Durchflug. Relevant sind

- der Anteil Gegenwind vs. Rückenwind,
- die Rotorblattlänge,
- die maximale Blatattiefe und
- der Pitch-Winkel.

Im Rahmen eines Unterauftrags haben Steinkamp et al. (2024, S. 26) mit Hilfe eines Kollisionsrisikomodells simuliert, wie die Faktoren im Zusammenwirken mit der Rotordrehzahl das Kollisionsrisiko beeinflussen würden. Die Berechnung erfolgte exemplarisch an einer WEA mit einer Rotorblattlänge von 80 m, einer maximalen Blatattiefe von 3,5 m, einem Anteil von Gegenwind von 50 Prozent sowie einem Pitchwinkel von 30°.

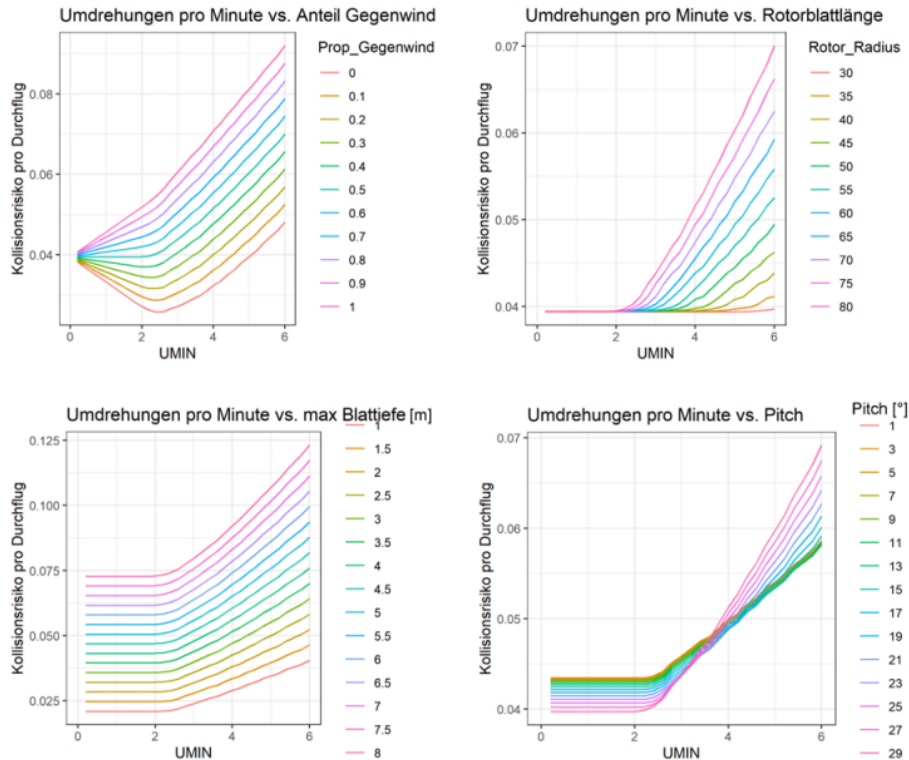


Abb. 2: Änderung des Kollisionsrisikos in Abhängigkeit von der Anzahl der WEA-Umdrehungen pro Minute (UMIN - x-Achse) und verschiedenen weiteren Variablen (Steinkamp et al. 2024).

Das Ergebnis – der Verlauf einer so genannten „qualitativen Kollisionskurve“ ist Abb. 2 zu entnehmen. Danach steigt das Kollisionsrisiko in allen Fällen nach einer Plateauphase erst ab einer Drehzahl von mehr als 2 Umdrehungen/Minute [U/min] an. Im Hinblick auf die Frage, ab welcher Drehzahl der Rotor in einem kollisionsarmen Betrieb ist, könnte man sagen: Das Kollisionsrisiko sinkt mit abnehmender Drehgeschwindigkeit, bis sich ab einer Drehgeschwindigkeit von 2 U/min ein „Plateau“ auf niedrigem Niveau einstellt (vgl. Steinkamp et al. 2024, S. 27). Unter der gegebenen Streubreite und in Kenntnis der Vielzahl der zusammenwirkenden Faktoren erscheint der Wert von 2 U/min als vertretbarer Orientierungswert, der zur Bemessung der Reaktionsdistanz herangezogen werden kann.

3.2.3 Ermittlung der Trudelzeit

Mit dem Pitchen der Rotorblätter verlangsamt sich augenblicklich die Drehgeschwindigkeit durch das Abreißen der Anströmung. In den ersten (zehn) Sekunden nach dem Pitchen ist der Bremseffekt besonders stark und die Drehzahl sinkt innerhalb weniger Sekunden stark ab. Je langsamer der Rotor wird, desto geringer wirkt der Verlangsamungseffekt durch das Pitchen. Eine Kurve der Geschwindigkeitsabnahme wäre zunächst steil und flacht dann ab, bis dann nach Ablauf einer bestimmten Zeit die minimale Drehgeschwindigkeit (bei modernen Anlagen meist größer als 1 U/min.) erreicht ist.

Die Zeitspanne zwischen Abschaltung und Erreichen einer Trudel-Drehzahl mit geringem Kollisionsrisiko; (siehe unten) kann insgesamt je nach Anlage und Windgeschwindigkeit zwischen 20 und 40 Sekunden dauern. Die Zeitspanne wird auch als Trudelzeit bezeichnet. Obwohl der Wert für die Berechnung der Reaktionsdistanz eine wichtige Rolle spielt, liegen derzeit

weiterhin keine empirisch auswertbaren anlagenspezifischen Daten über das Trudelverhalten verschiedener Anlagentypen vor²⁷.

Für die Erprobung von AKS ist daher weiterhin ein Wert festzulegen. Er beträgt in der Regel 30 Sekunden (vgl. KNE 2019; MEKUN u. LfU SH 2024). Erst im konkreten Anwendungsfall bestünde die Möglichkeit, diese Annahme mit Hilfe der typenspezifischen Drehzahl bei den am Standort ermittelten, vorherrschenden Windgeschwindigkeiten zu konkretisieren²⁸.

Um im konkreten Einzelfall abweichende (geringere) Trudelzeiten annehmen zu können, müsste ein standort- und anlagenspezifischer Mittelwert ermittelt und hinreichend abgesichert sein. In der Regel können WEA-Hersteller Angaben zur Drehgeschwindigkeit des Rotors bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten und verschiedenen Betriebsmodi (bei Volllast-, Teillast- und Trudelbetrieb) machen. Ausgehend von der Rotordrehzahl im Volllastbetrieb sollte ermittelt werden, wie lange der Rotor braucht, um durch Pitchen aus dem Volllastbetrieb auf eine Umdrehungszahl von 2 U/min zu kommen. Diese Zeitspanne entspräche einer Worst case-Betrachtung. Die Verringerung der Drehzahl auf 2 U/min aus dem Teillastbetrieb dürfte weniger Zeit benötigen, dieser Fall wäre also von der Worst case-Betrachtung immer abgedeckt.

Sofern kürzere Trudelzeiten plausibel hergeleitet werden können, würde dies Einfluss auf die Reaktionsdistanz haben: Sie fällt bei kürzeren Trudelzeiten geringer aus. Je geringer die Reaktionsdistanz, desto geringer auch der Flächenanteil des Reaktionsbereiches. Durch eine Verkleinerung des Reaktionsbereiches kann sich die Abschalthäufigkeit verringern, da der Bereich bei geringerer Größe seltener durchflogen oder tangiert würde (vgl. Kapitel 5.3.1).

²⁷ Aus den technischen Datenblättern der WEA-Typen sind keine belastbaren Daten zu gewinnen. Für die Analyse müssten die Betreiber Betriebsprotokolle, aus denen die Rotordrehzahl bei Abschaltereignissen sowie die Windgeschwindigkeiten hervorgehen, zur Verfügung stellen.

²⁸ Kürzere Trudelzeiten führen zu einer geringeren Reaktionsdistanz. Verkleinert sich der Reaktionsbereich, kann dies die Abschalthäufigkeit verringern.

4 Antikollisionssysteme im BNatSchG

Mit der Einführung von § 45b BNatSchG hat der Gesetzgeber abstandsbezogene Regelvermutungen eingeführt, wann ein signifikant erhöhtes Tötungsrisiko vorliegt. Diese Regelvermutung kann durch geeignete Methoden widerlegt werden. Gelingt dies, ist das Vorhaben ohne Schutzmaßnahme zulässig. Gelingt dies nicht und es besteht weiterhin ein signifikant erhöhtes Tötungsrisiko, steht dies der Genehmigung einer WEA trotzdem nicht entgegen: Das Vorhaben ist zulässig, wenn eine fachlich geeignete Schutzmaßnahme beauftragt wird und dabei die wirtschaftliche Zumutbarkeitsgrenze eingehalten wird. Überschreiten die zur Vermeidung notwendigen Schutzmaßnahmen die Zumutbarkeitsgrenze, kann das Vorhaben durch eine Ausnahmeerteilung zugelassen werden. In diesem Fall sind Schutzmaßnahme (in vermindertem Umfang) oder Zahlungen zu leisten²⁹.

In Anlage 1 Abschnitt 2 zu § 45b BNatSchG ist ein Katalog von Schutzmaßnahmen aufgeführt. Sie sind – allein oder in Kombination – zur Vermeidung der Tötung oder Verletzung von Exemplaren europäischer Vogelarten [...] fachlich anerkannt. Zu diesen Maßnahmen gehören seit 2022 auch Antikollisionssysteme. Die Neuerung ist angesichts der Fortschritte bei der Anwendung technischer Hilfsmittel zur optischen oder akustischen Erfassung sowie der Entwicklung KI-basierter Software für die Steuerung automatisierter Schaltprozesse zu begrüßen.

4.1 AKS als Schutzmaßnahme im BNatSchG

Die bedarfsgerechte Abschaltung mittels AKS begrenzt die Abschaltzeiten auf das unbedingt notwendige Maß. Im Falle der bedarfsgerechten Abschaltung zum Schutz von Vögeln erfolgen Erfassung und Abschaltsteuerung automatisiert. AKS, deren Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit nachgewiesen ist, gewährleisten zugleich ein hohes Schutzniveau. Insofern haben sie einen Doppelnutzen: Sie ermöglichen es, zugleich ein hohes Schutzniveau und das Erreichen der Ertragsziele in Einklang zu bringen.

Während der Diskussion um Anforderungen und Einsatzmöglichkeiten von AKS wurde darauf hingewiesen, dass AKS keine „Allzwecklösung“ für alle Fälle sind. Vielmehr solle die Schwere des Konflikts berücksichtigt werden. Ein „einfaches“ signifikant erhöhtes Tötungsrisiko kann ggf. auch durch eine andere Schutzmaßnahme, die im Vergleich zu AKS ein „milderes Mittel“ darstellt, wirksam gesenkt werden. Außerdem wurde darauf hingewiesen, dass der Einsatz in solchen Fällen besonders vorteilhaft ist, in denen die zu schützende Aktivität auf wenige Zeitpunkte pro Tag konzentriert ist.

Aktuell ist die Anwendung von AKS kein Selbstläufer. Vielmehr bestehen Hemmnisse und Unsicherheiten, die ihre Anwendung in der Praxis erschweren. Das folgende Kapitel 4.2 befasst sich schwerpunktmäßig mit dem Wirksamkeitsnachweis für AKS.

Aus rechtlicher Sicht kann eine Maßnahme nur beauftragt werden, wenn sie erforderlich ist. Kommt die artenschutzrechtliche Prüfung für kollisionsgefährdete Vogelarten nach § 45b BNatSchG zu dem Ergebnis, dass ein signifikant erhöhtes Tötungsrisiko für die relevanten kollisionsgefährdeten Brutvogelarten besteht bzw. nicht widerlegt werden kann, sind Schutzmaßnahmen erforderlich. Der Antragsteller lässt ein Maßnahmenkonzept erarbeiten und legt es der Behörde zur Prüfung vor.

²⁹ Zu den Regelungen des § 45b BNatSchG (Regelgenehmigung und Ausnahme) vgl. weitergehend KNE (2025a).

Bei Neuzulassung von WEA innerhalb rechtskräftig ausgewiesener Windenergiegebiete ist mit Stand 2024 eine modifizierte artenschutzrechtliche Prüfung nach § 6 WindBG durchzuführen. Deren Auswirkungen auf die Anwendung von AKS als Schutzmaßnahme wird hier nicht betrachtet, da sich zudem auch die Folgen der nationalen Umsetzung der Neufassung der europäischen Erneuerbare-Energien-Richtlinie 2018/2001 durch die Richtlinie (EU) 2023/2413 (Renewable Energy Directive – RED III) noch zeigen müssen.

Soweit sich ein Maßnahmenkonzept zur Senkung des signifikant erhöhten Tötungsrisikos auf eine Abschaltung bezieht, kann auch die Bezeichnung „Abschaltkonzept“³⁰ verwendet werden. Entsprechend wird im Weiteren der Begriff Abschaltkonzept verwendet.

4.2 Wirksamkeit von AKS: Entwicklungsstand

4.2.1 Entwicklungsstand der Systeme

Der Entwicklungsstand verschiedener Systemtypen wird in der AKS-Systemübersicht (letzte Aktualisierung 2025) dokumentiert. Die Übersicht enthält Systeme, deren Entwicklung und Erprobung in den letzten Jahren mit Blick auf die Anwendungsanforderungen in Deutschland vorangetrieben wurden. Seit 2022 hat sich der Anteil „aktiver“ Systemanbieter, vor allem solcher aus dem europäischen Ausland, jedoch verringert.

Die Systemübersicht (KNE 2024b) wird in regelmäßigen Abständen aktualisiert. Der Fokus lag zuletzt auf der Klärung, welchen Erprobungsstand die jeweilige Systemversion erreicht hat. Stand Januar 2025 liegen zu drei Systemen Erprobungs- bzw. Validierungsberichte vor (IdentiFlight, AVES, BPS Long range). Für das System BirdVision ist ein Validierungsbericht „in Erarbeitung“. Das System Bird Recorder ist noch in der technischen Weiterentwicklung und wird derzeit erprobt. Für DTBird, ProBird und SafeWind haben die Systemanbieter keine neuen Informationen über Erprobungen bzw. Validierungsberichte bereitgestellt. Die nächste Aktualisierung der AKS-Übersicht ist für Herbst 2025 geplant.

Seit Herbst 2024 gibt es eine neue Version des IDF-Systems (V5). Der Systemanbieter hat eine Methode entwickeln lassen, mit der die neue Erkennungssoftware „digital“ validiert werden kann (Reichenbach et al. 2024). Eine Erprobung im Gelände zum Nachweis einer Schutzrate für weitere Arten wäre dann nicht mehr erforderlich. Das System soll für acht, perspektivisch für elf der 15 kollisionsgefährdeten Arten einsetzbar sein (Schuster 05.03.2024, mdl.).

4.2.2 Erfordernis eines Wirksamkeitsnachweises

Ein AKS kommt laut Abschnitt 2 der Anlage 1 zu § 45b BNatSchG nach dem seinerzeitigen Stand der Technik für den Rotmilan in Frage. Für diesen stehe (Stand 2022) ein nachweislich wirksames kamerabasiertes System zur Verfügung. Bei diesem System kann es sich nur um IdentiFlight (IDF) handeln. Der veröffentlichte Erprobungsbericht (Reichenbach et al. 2021) attestierte dem an sechs Standorten erprobten System eine nach den damaligen

³⁰ Das VG Mannheim (Urteil vom 11.12.2023, AZ. 10 S 1914/22) verwendet im Kontext einer Änderungsgenehmigung den Begriff „prüffähiges Abschaltkonzept“. Es sei vorzulegen als Voraussetzung dafür, dass die Behörde die Vermeidungswirksamkeit einer Abschaltmaßnahme beurteilen kann.

Anforderungen (KNE 2019; KNE 2021) hinreichende Leistungsfähigkeit³¹. Das KNE hatte dem System nach einer fachlichen Prüfung und Plausibilitätskontrolle „Praxisreife“ attestiert³².

In Abschnitt 2 der Anlage 1 heißt es weiter, es erscheine grundsätzlich möglich, die Anwendung von AKS zukünftig auch für weitere kollisionsgefährdete Großvögel wie Seeadler³³, Fischadler, Schreiadler, Schwarzmilan und Weißstorch einzusetzen. Diese exemplarische Nennung schließt weitere Arten (hier z. B. Wespenbussard, Weihenarten) nicht aus.

„Nachweislich wirksam“ stellt klar, dass es eines Nachweises der Vermeidungswirksamkeit für die Systeme bedarf. In welcher Form und durch wen dieser zu erbringen ist, wurde offengelassen. Die Bezugnahme auf den „Stand von Wissenschaft und Technik“ lässt darauf schließen, dass an den Nachweis a) fachwissenschaftliche Maßstäbe anzulegen sind und man sich b) an einem sich weiterentwickelnden Kenntnisstand orientieren soll.

Die Forderung nach einem Wirksamkeitsnachweis unterscheidet diese Maßnahme von anderen Schutzmaßnahmen. Der Unterschied liegt in der Automatisierung der Maßnahme begründet: Während die Schutzmaßnahme läuft, werden Erfassung und Abschaltsteuerung nicht durch Personen kontrolliert. Entsprechend muss belegt werden, dass das System in der Lage ist „bei Annäherung der Zielart rechtzeitig bei Unterschreitung einer vorab artspezifisch festgelegten Entfernung zur Windenergieanlage per Signal die Rotordrehgeschwindigkeit bis zum „Trudelbetrieb“ zu verringern“. Antikollisionssysteme, deren Wirksamkeit noch nicht belegt ist, können den Wirksamkeitsnachweis durch eine Validierung der Detektionsleistung des Systems auf Basis einer Feldstudie erbringen. Nach Anlage 1 Abschnitt 2 BNatSchG können AKS im Einzelfall auch im Testbetrieb angeordnet werden, wenn begleitende Maßnahmen zur Erfolgskontrolle angeordnet werden.

Durch wen und in welcher Form die Anerkennung der Erprobungsergebnisse erfolgt, hat der Bundesgesetzgeber nicht geregelt. Die folgenden Kapitel gehen den Kernfragen nach.

- Wo soll der Anerkennungsprozess angesiedelt sein (Ebene und Zuständigkeit)?
- Welche Instanzen sind am Anerkennungsprozess beteiligt?
- Welche Form hat die Anerkennung?

4.3 Anerkennung von Systemen

Der Gesetzgeber spricht von „einem anerkannten System“. Er hat damit implizit eine Anwendungsvoraussetzung formuliert, aber keine weitergehenden Regelungen getroffen, wie diese Voraussetzung – eine (erstmalige) Anerkennung bzw. eine Anerkennung für weitere Arten – erfolgen soll. Im Zuge des FuE-Projektes hat der Forschungsnehmer klärungs- bzw. regelungsbedürftige Fragen identifiziert. Vor dem Hintergrund erster Erfahrungen bei der Anwendung des Prüfraumens AKS in Schleswig-Holstein werden Vorschläge unterbreitet, wie und wodurch eine Anerkennung erfolgen kann.

³¹ Die Erprobung an sechs Standorten belegte für den Rotmilan eine Erfassungsreichweite von 750 Metern, eine mittlere Erfassungsrate von 92 Prozent und eine Erkennungsrate von bis zu 97,5 Prozent (vgl. Reichenbach et al. 2021).

³² Vgl. Pressemitteilung des KNE vom 8. Juli 2021. Eine darüberhinausgehende „formelle“ Anerkennung durch eine dazu legitimierte Institution erfolgte nicht.

³³ Ein Erprobungsbericht (Reichenbach et al. 2023a) belegt, dass das System IDF auch die Anforderungen für den Seeadler erfüllt. Entsprechend könnte IDF auch für den Seeadler eingesetzt werden.

4.3.1 Ebene der Anerkennung

Die Frage, auf welcher Ebene die Anerkennung von AKS erfolgen solle, wurde mit Ländervertretern (vgl. Kapitel 4.3.1.1) und aus Bundesperspektive (vgl. Kapitel 4.3.1.2) diskutiert.

4.3.1.1 Anerkennung auf Länderebene

Einer der beiden Länder-Workshops³⁴ hatte zum Ziel, den Handlungsbedarf der Länder bezüglich der AKS-Anwendung und ihre Rolle bei der Anerkennung von AKS zu klären. Grundsätzlich sprachen sich die Beteiligten für eine **Prüfung der Systeme nach einheitlichen Maßstäben** aus. Die Mehrzahl der Ländervertreter würde es begrüßen, wenn die Anerkennung auf Bundesebene erfolgt. Nicht zuletzt sprächen pragmatische Gründe für diese Lösung, denn es seien in den meisten Ländern weder die Kapazitäten noch ein vertieftes Know-how über die Spezifika einer Wirksamkeitsprüfung vorhanden. Die Mehrzahl der Ländervertreter schätzten die Dringlichkeit, Standards und ein Prozedere für die Anerkennung zu entwickeln, jedoch nicht als hoch oder gar prioritär ein. Lediglich der Vertreter des Landes Schleswig-Holstein stellte klar, dass man an einer *schnellen* Anerkennung von AKS interessiert sei und nicht auf die Etablierung eines Prüfprozesses auf Bundesebene warten wolle³⁵.

Der Workshop endete mit einem Appell der Ländervertreter an die Bundesebene, Regelungen zur Klärung der Zuständigkeit bzw. des Prozederes zu treffen. Dies sei wichtig, damit keine unterschiedlichen Anerkennungsregime entstehen, die sich als kontraproduktiv für eine breite Anwendung von AKS erweisen könnten. Die Mehrzahl der Ländervertreter war angesichts der nicht unerheblichen Komplexität der Prüfaufgabe an einer Entlastung interessiert. Als „unabhängige Prüfinstanzen“ für die Anerkennung auf Bundesebene wurden der TÜV, das KNE und das BfN vorgeschlagen.

4.3.1.2 Anerkennung auf Bundesebene

Für eine zentrale Zuständigkeit spräche, dass für die Anerkennung bundesweit einheitliche Maßstäbe angelegt würden. Alle Systemanbieter müssten – unabhängig davon, in welchem Bundesland sie ansässig sind – dieselben Anforderungen erfüllen. Auch bei der Beurteilung, wann die Voraussetzungen für eine „offizielle“ Anerkennung erfüllt sind, wäre Einheitlichkeit gewahrt.

Aus Sicht des KNE sollten die Anforderungen, Maßstäbe und Vorgaben zu Prüfnachweisen auf dem „Prüfrahmen AKS Schleswig-Holstein“ (MEKUN u. LfU SH 2024) aufbauen. Aktuell stellt die Mitte 2024 veröffentlichte Fassung den aktuellen Stand des Wissens³⁶ dar (vgl. Kapitel 2.2). Auch aus pragmatischen Gründen liegt es nahe, hierauf aufzubauen und in der jetzigen Phase keine neuen oder abweichenden Vorgaben zu erarbeiten. Allerdings sollte der Bund stärker als bisher in die Fortschreibung und die nach drei Jahren vorgesehene Evaluation des Prüfrahmens eingebunden sein.

Neben den Anforderungen und Prüferfordernissen für den Wirksamkeitsnachweis könnten auch Hinweise für die Anwendung in der Genehmigung (vgl. Kapitel 7) ergänzt werden. Das

³⁴ Zweiter Länder-Workshop, 30. Januar 2024. Teilgenommen haben Ländervertreter Brandenburg, Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Thüringen.

³⁵ In der Anwendung von AKS sehe man ein großes Potenzial für einen wirkungsvollen Vogelschutz beim Windenergieausbau. Daher habe man einen landeseigenen Prüfrahmen auf den Weg gebracht. Ziel des Prüfrahmens sei es, die Voraussetzungen für die Anerkennung von AKS in Schleswig-Holstein zu schaffen.

³⁶ Eine Fortschreibung, u.a. zur Reduzierung von Fehlerquellen bei der Datenermittlung, ist angekündigt.

KNE könnte diesen Prozess flankieren und durch die Bereitstellung von Informationen sowie die Veröffentlichung der Prüfergebnisse unterstützen.

4.3.2 Zuständigkeiten und Rollen der beteiligten Akteure

Die Anerkennung der Wirksamkeit von Maßnahmen liegt aus Sicht der Forschungsnehmenden eigentlich in der Verantwortung der **staatlichen Naturschutzverwaltung**. Diese kann die damit verbundenen Prüfaufgaben jedoch auch delegieren.

Die Regelungen zu AKS im BNatSchG (Anlage 1 Abschnitt 2) legen nahe, dass die Anerkennung von AKS als Anwendungsvoraussetzung einer gewissen Form bedarf. Da die Entwicklung dynamisch ist, sollte eine Form gewählt werden, die eine kurzfristige Aktualisierung ermöglicht. Daher bietet es sich nicht an, die Anerkennung einzelner Systeme im Rahmen von abstim-mungsbedürftigen Handreichungen oder Leitfäden vorzunehmen, deren Fortschreibungszyklus meist länger als drei Jahre dauert³⁷.

Zudem ist zu bedenken, dass die Wirksamkeit von AKS mit einer Reihe von technischen und elektronischen Spezifika (Sicherheit und Zuverlässigkeit der zur Abschaltsteuerung eingesetzten Systemkomponenten, neuronale Netze) verbunden ist. Aus diesem Grund kann man sich nicht allein auf die Einschätzung einer Fachbehörde verlassen. Vielmehr muss in die Anerkennung darüber hinaus auch technisches Know-how eingebunden werden. Hierfür bietet sich eine unabhängige technische Prüfinstitution wie der Technische Überwachungsverein (TÜV) an.

Der Prüfrahen AKS Schleswig-Holstein (2024) sieht vor, dass der TÜV Nord als unabhängige Prüfinstitution eingebunden wird. Der TÜV wird aufgrund der Relevanz seiner Prüfberichte für die Anerkennung als wirksames System zu einem zentralen Akteur.

In Schleswig-Holstein wurde geregelt, dass der Systemanbieter die notwendigen Unterlagen für die Anerkennung beibringt: Der Systemanbieter beauftragt einen unabhängigen Gutachter mit der Durchführung der Feldstudie und der Ermittlung der Schutz- bzw. Gesamtrate. Zugleich beauftragt er den TÜV, die Einhaltung der Prüfrahen-Anforderungen während der Erprobung und bei der Datenauswertung durch einen Prüfbericht zu bestätigen. Dadurch wird die ermittelte Schutz- oder Gesamtrate bestätigt. Darüber hinaus wird der TÜV beauftragt, die Einhaltung technischer Sicherheitsstandards und die lückenlose Dokumentation der Hard- und Softwareentwicklung zu prüfen. Auch hierfür ist ein Prüfbericht zu erstellen, der die Einhaltung der Anforderungen bestätigt.

Liegt der Naturschutzverwaltung der vollständige Prüfbericht des TÜV über die Erprobung des AKS an mindestens zwei Standorten vor, ist die Wirksamkeit des AKS bestätigt. Die Genehmigungsbehörde kann sich bei der Beauftragung des Systems auf das Prüfergebnis stützen.

Die Naturschutzverwaltung des Landes Schleswig-Holstein hat bisher darauf verzichtet, offiziell und unabhängig von Genehmigungsverfahren bekannt zu geben, welche Systeme als wirksam anerkannt sind. Vielmehr sind die Vorhabenträger aufgefordert, für die Genehmigung geeignete Unterlagen (hier z. B. Prüfberichte des TÜV) beizubringen, aus denen die Wirksamkeit des AKS hervorgeht. Um die Transparenz zu erhöhen, wäre es aus Sicht des Forschungsnehmers allerdings wünschenswert, den Anerkennungsstatus systembezogen zu veröffentlichen.

³⁷ Die bisherige Praxis, die fachliche Eignung und Wirksamkeit von AKS in artenschutzrechtlichen Leitfäden der Länder vorzunehmen, würde sich möglicherweise als zu statisch erweisen.

4.3.3 Anforderungen an den Wirksamkeitsnachweis

Der Prüfrahmen AKS Schleswig-Holstein (2024) bietet eine geeignete Referenz für die Erprobung und Validierung von bisher nicht als wirksam anerkannten Systemen.

4.3.3.1 Erstmalige Anerkennung eines Systems

Feldstudien (Erprobung)

Für ein bisher nicht erprobtes System ist eine Erprobung (**Feldstudie**) für den Nachweis der artspezifischen Wirksamkeit (hier: Detektionsrate) durchzuführen. Laut MEKUN u. LfU SH (2024, S. 31) soll die Feldstudie an **mindestens zwei Standorten** mit unterschiedlich ausgeprägten Einflussfaktoren durchgeführt werden. Dadurch soll eine **Übertragbarkeit** der Ergebnisse gewährleistet sein. Es ist nicht erforderlich, in jedem Bundesland eine oder mehrere Feldstudien durchzuführen, um die grundsätzliche Wirksamkeit zu belegen.

Erprobungsbericht

Zur Dokumentation des Feldversuchs und der Ermittlung der erzielten Detektionsrate (Gesamt- oder Schutzrate) ist ein Bericht zu erstellen. Ein vom Systemanbieter beauftragter unabhängiger Gutachter sollte das Untersuchungskonzept der Feldstudie und das Zustandekommen der Ergebnisse darlegen. So ist beispielsweise von Interesse, wie und in welchem Bereich die Datenermittlung (Referenzdaten und AKS-Daten) erfolgte, welche Maßnahmen zur Begrenzung von Messfehlern vorgenommen wurden und welche Faktoren die Erfassung am Standort beeinflussen. Darüber hinaus sind die (statistischen) Methoden oder Tools der Datenauswertung, mit denen die Detektionsrate ermittelt wurde, darzulegen. Die ermittelte Detektionsrate ist mit den Mindestanforderungen (Angabe eines Mittelwertes der Detektionsrate und Angabe der „Sicherheit“ dieses Mittelwertes durch ein Konfidenzintervall) abzugleichen. Mit der Vorlage des Erprobungsberichtes und hinreichenden Ergebnissen ist noch keine Anerkennung der Wirksamkeit verbunden.

Die dem KNE vorliegenden Erprobungsberichte³⁸ haben einen unterschiedlichen Umfang (zwischen 30 und 150 Seiten) und eine unterschiedliche Detailtiefe. Die formulierten Anforderungen reichen hier offenbar nicht aus, um einen einheitlichen Standard zu etablieren. Aus Sicht des KNE wäre es sinnvoll, eine **Mustergliederung** für den Erprobungsbericht zu erstellen. Die Systemanbieter könnten sich bei der Auftragsvergabe an den Gutachter daran orientieren und das Leistungsbild danach ausrichten.

Prüfbericht

Bisher ist dem Forschungsnehmer kein Prüfbericht bekannt. Zukünftig sollte der Austausch zwischen der prüfenden Instanz (hier: TÜV) und der Naturschutzverwaltung (hier BfN; vgl. Kapitel 4.3.4) zur Vorgehensweise bei der Prüfung intensiviert werden. Aus Sicht des Forschungsnehmers sollte offengelegt werden, anhand welcher Maßstäbe die Erprobungsergebnisse überprüft werden, das heißt wann eine Anforderung als erfüllt gilt, wann teilweise und wann nicht. Ob die Anforderungen erfüllt sind, setzt auch voraus, dass eine Einigung über zulässige Abweichungen und Fehlertoleranzen erfolgt ist. Zudem sollte formuliert werden, welcher „Grad“ der Erfüllung erreicht werden muss, um eine Bestätigung des TÜV über die

³⁸ Auf der Grundlage der Anforderungen nach KNE (2019), Bruns et al. (2021) sowie MEKUN u. LfU SH (2024). Zum Spektrum der Erprobungsberichte vgl. „Erprobungsberichte zu Antikollisionssystemen“. KNE, online.

Detektionsleistung zu bekommen. Im Interesse der Transparenz wäre es hilfreich, sich auf einen Bewertungsrahmen zu verständigen.

Zur guten Praxis gehörte es bisher, die im Feldversuch erhobenen Flugdaten fälschungssicher auf einem Server des TÜV abzulegen. Es ist zu klären, ob ein AKS anerkennungsfähig ist, wenn dies nicht erfolgt ist. Aus Sicht des Forschungsnehmers ist es nicht zwingend erforderlich, zur Prüfung der ermittelten Detektionsrate jeweils eine Nach- oder Neuberechnung auf Basis der Rohdaten durchzuführen. Der TÜV sollte sich jedoch vorbehalten, auf die Rohdaten zugreifen zu können. Erfolgt keine Nach- oder Neuberechnung, sollte dann von einer Plausibilisierung statt einer Prüfung gesprochen werden.

4.3.3.2 Anerkennung für weitere Arten

Ist die Wirksamkeit eines AKS grundsätzlich anerkannt, stellt sich die Frage, in welcher Weise die erforderliche Gesamt- oder Schutzrate für weitere Arten nachgewiesen werden kann. Der Prüfraum AKS Schleswig-Holstein sieht dafür eine Ergänzungsprüfung vor. Wie bei einer Ergänzungsprüfung methodisch vorzugehen ist, ist nicht näher festgelegt.

Anerkennung durch Datenauswertung in einer Ergänzungsstudie

Laut Prüfraum AKS Schleswig-Holstein kann zum Nachweis der Wirksamkeit für **weitere Arten** auf eine Feldstudie und einen entsprechenden Erprobungsbericht verzichtet werden. Es geht vielmehr um den Nachweis, dass die Bilderkennung durch eine entsprechend trainierte Software für andere Arten zu einer zuverlässigen Klassifizierung führt. Dies kann durch eine Ergänzungsstudie nachgewiesen werden.³⁹

Virtuelles Training

Reichenbach et al. (2024) haben für die Anerkennung weiterer Arten eine „**virtuelle Prüfmethode**“ beschrieben. Sie soll geeignet sein, die Leistungsfähigkeit des zur Klassifizierung eingesetzten neuronalen Netzes durch ein virtuelles Training zu ermitteln. Ein bereits vorliegendes zur Klassifizierung genutztes neuronales Netz würde durch iteratives Hinzufügen neuer Bilddaten der weiteren Arten trainiert. Die Sicherheit der Klassifizierungsleistung hängt von der verfügbaren Bilddatenmenge ab. Die beschriebene Methode ermögliche einen schnellen Trainingsprozess des neuronalen Netzes (ebd., S. 17). Die Gutachter bezeichnen die Methode aufgrund der erzielten Klassifizierungsraten als grundsätzlich geeignet. Sie liegen für Rot- und Schwarzmilan sowie Seeadler und Schreiadler über 90 Prozent. Für Fischadler, Wespenbussard und Rohrweihe liegen sie über 80 Prozent, nur beim Weißstorch liegt die Rate mit 74 Prozent darunter (vgl. ebd., S. 11). Ist die Stichprobengröße der aufgenommenen Arten klein, zeigt sich dies durch ein größeres Konfidenzintervall (geringere Sicherheit). Für diese Arten müsste die Datengrundlage zum virtuellen Training des neuronalen Netzes noch ausgeweitet werden. Es sei davon auszugehen, dass die Klassifizierungsergebnisse im Feldeinsatz besser als die des virtuellen Trainings sind, da im Feldeinsatz auch Kontextinformationen berücksichtigt werden könnten (ebd., S. 18). Reichen die Detektionsraten des virtuellen Trainings bereits aus, ist bei der Anwendung im Feld demgegenüber also keine Verschlechterung der Raten zu erwarten.

Sollte sich die virtuelle Prüfmethode als valide erweisen, könnte sie die Anerkennung erprobter Systeme für weitere Arten sehr beschleunigen.

³⁹ Für das AKS „AVES“ konnte auf diese Weise auch eine Gesamtrate für den Seeadler nachgewiesen werden.

4.3.4 Bundesweite Anerkennung

Für eine Anerkennung auf Bundesebene müssten formelle Regelungen zur Festlegung der Zuständigkeit sowie zur Form (z. B. Veröffentlichung der Ergebnisse) getroffen werden.

4.3.4.1 Klärung der Zuständigkeit

Der Forschungsnehmer empfiehlt, dass – wie im Prüfrahen AKS Schleswig-Holstein vorgesehen – der TÜV von den Systemanbietern für den Prüfprozess (Validierung der Erprobung, „technische“ Prüfung) eingesetzt wird. Ein AKS gilt als anerkannt, wenn eine beauftragte Institution – hier zum Beispiel das Bundesamt für Naturschutz (BfN) – dem AKS die Anerkennung attestiert. Dies könnte durch eine Veröffentlichung auf der Internetseite des BfN erfolgen. Voraussetzung ist, dass der Systemanbieter (als Auftraggeber) dem BfN den Prüfbericht oder eine schriftliche Bestätigung des TÜV vorlegt, dass das System die gestellten Anforderungen erfüllt.

Eine Formulierung in Ergänzung der bisherigen Regelungen im BNatSchG könnte lauten:

„Als Voraussetzung für die Anerkennung von Systemen sind Erprobungen durchzuführen, deren Ergebnis durch einen Prüfbericht einer unabhängigen technischen Institution (z.B. TÜV) validiert bzw. geprüft werden. Darin wird bestätigt, dass das AKS eine den Anforderungen entsprechende Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit nachgewiesen hat. Die Anerkennung der Wirksamkeit erfolgt nach Vorlage des bzw. der Prüfberichte oder einer schriftlichen Bestätigung des TÜV, durch Bekanntgabe in einem Internetportal des Bundesamtes für Naturschutz.“

Das Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (KNE) könnte beauftragt werden, im Rahmen seiner satzungsgemäßen Aufgaben das BfN bei der Anerkennung zu unterstützen, indem es den Erprobungs- und Prüfprozess aus neutraler fachlicher Sicht begleitet, den Austausch mit der technischen Prüfinstanz organisiert und die online zu stellenden Informationen zur Anerkennung des AKS aufbereitet.

Das System und dessen grundsätzliche Wirksamkeit würde „formell anerkannt“ sein, wenn die Prüfberichte oder eine Bestätigung von einer unabhängigen technischen Organisation (TÜV) vorliegt und die Ergebnisse auf einer „offiziellen“ Plattform veröffentlicht sind.



Abb. 3: Vorschlag für eine vereinheitlichte Anerkennung von AKS – grundsätzliche Wirksamkeit (KNE, eigene Darstellung)

Abb. 3 zeigt die aus fachlicher Sicht zentralen Nachweise (hier: Erprobungsbericht, Prüfbericht), die Voraussetzung für eine Anerkennung sind.

4.3.4.2 Form der Anerkennung (Plattform)

Im Kontext der Diskussion um eine Zertifizierung von AKS haben Systemanbieter und Anwender den Wunsch nach einem „Prüfsiegel“ geäußert, das die Einhaltung bestimmter

Sicherheits- und Qualitätskriterien der technischen Komponenten und idealerweise auch zugleich die Wirksamkeit des AKS bescheinigt. Diese Option wurde jedoch aus verschiedenen, hier nicht näher ausgeführten Gründen nicht weiterverfolgt.

Der Forschungsnehmer hält es daher für vertretbar, ersatzweise die Veröffentlichung auf einer Internetseite der Obersten Fachbehörde als Form der Anerkennung zu wählen. Dort könnte eine „Plattform“ eingerichtet werden, die sowohl Vorhabenträgern als auch den Fachbehörden einen schnellen Überblick über den Stand der Wirksamkeitsprüfung ermöglichen.

Die Informationen könnten systemspezifisch („Steckbrief-Format“) aufbereitet werden. Ein solcher **Steckbrief** sollte folgende Angaben enthalten:

- Systembezeichnung, Systemversion
- Art(en)
- Anforderungen bzw. Maßstab
 - Anforderungsprofil oder Prüfraum (Verfasser, Stand)
- Erprobungsbericht (Feldstudie)
 - [optional: Bearbeitungsstand, falls nicht vorliegend:]
 - Falls vorliegend:
 - Verfasser (unabhängiger Gutachter)
 - Link zum Bericht
 - Nachgewiesene Raten
- Technische Zertifizierung (Komponenten, Dokumentation der Entwicklung)
 - Jahr, Titel, Verfasser
 - Link zum Bericht
- Prüfbericht(e) einer unabhängigen Institution
 - Bearbeitungsstand (falls fortlaufend/betriebsbegleitend erstellt)
 - Ergebnisse
 - Jahr, Titel, Verfasser.
 - Links zu Prüfberichten.
- Zusammenfassende Beurteilung/Wirksamkeitsnachweis

Durch eine farbige Kennzeichnung des Prüf- und Anerkennungsstatus (vier Stufen) würde auf den ersten Blick deutlich, in welcher Phase der bundesweiten Anerkennung sich ein AKS befindet:

Tab. 4: Farbschema zur Kennzeichnung des Anerkennungsstatus

Farbe	Bedeutung
Grün	Wirksamkeit durch Prüfbericht bestätigt.
Gelb	Prüfbericht in Arbeit, Wirksamkeit noch nicht anerkannt
Orange	Wirksamkeitsnachweis (Erprobung, Erprobungsbericht) laufend
Rot	Keine Arbeiten an einem Wirksamkeitsnachweis bekannt

Die grün gekennzeichneten Systeme können beauftragt werden, bei den gelb gekennzeichneten Systemen wäre eine Beauftragung unter dem Vorbehalt eines positiven Prüfnachweises zum Zeitpunkt der Genehmigungserteilung denkbar.

5 Wirtschaftliche Aspekte des AKS-Einsatzes

5.1 Zumutbarkeit von Antikollisionssystemen

Mit der Einführung von Zumutbarkeitsgrenzen für Schutzmaßnahmen kollisionsgefährdeter Vogelarten und Fledermäuse haben sich die Maßstäbe für die Auswahl von Schutzmaßnahmen verschoben. Wirtschaftliche Gesichtspunkte sind in den Vordergrund gerückt.

Kann der Vorhabenträger – bei gleicher Vermeidungswirksamkeit für die betroffene Art – zwischen Schutzmaßnahmen wählen, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass wirtschaftliche Aspekte ausschlaggebend sind. Fachliche oder standörtliche Kriterien treten dürften dahinter zurücktreten. Die Zumutbarkeitsschwellen wirken sich besonders auf die noch nicht etablierte Anwendung von AKS aus. Zum einen sind sie mit Investitionskosten verbunden, zum anderen verursacht die bedarfsgerechte Abschaltung Ertragsverluste. Beides ist bei der Zumutbarkeitsprüfung nur bis zu einem gewissen Grad anrechenbar.

Aufgrund der Relevanz der Zumutbarkeitsgrenzen für die Maßnahmenwahl hat sich das KNE während der Projektlaufzeit mit der Berechnung der Zumutbarkeit und den daraus resultierenden Einsatzbeschränkungen für AKS befasst (vgl. KNE 2024c). Der nachfolgende Text fasst die Eckpunkte zusammen.

5.1.1 Berechnung der Zumutbarkeit

Die Berechnung der Zumutbarkeit erfolgt sowohl bei der Artenschutzprüfung nach § 45b BNatSchG, als auch in der modifizierten Artenschutzprüfung nach § 6 WindBG nach den Vorgaben der Anlage 2 zu § 45b Absatz 6 und 9 BNatSchG.

Der Vorhabenträger legt ein Maßnahmenkonzept vor. Er stellt dar, inwieweit die Maßnahmen bzw. der Maßnahmenumfang im Rahmen der Zumutbarkeit liegt. Die Berechnung [eigentlich: Prognose] erfolgt mit Hilfe von drei Formeln. In diese werden pauschalisierte Werte und Annahmen für eine überschlägige Ermittlung eingesetzt, nämlich:

- Der „maximal zumutbare monetäre Verlust“ (Nr. 2.1 in Anlage 2 BNatSchG),
- der „prozentuale Anteil der Abschaltungen“ (Nr. 2.2 in Anlage 2 BNatSchG) sowie
- die „monetäre Zumutbarkeit der Maßnahmen“ (Nr. 2.3 in Anlage 2 BNatSchG)

Die einzusetzenden Werte und Annahmen stammen jeweils aus einem standortspezifischen Ertragsgutachten⁴⁰. Als Grundlage für die Berechnungen dienen

- die zu installierende Leistung (P) der WEA sowie der
- zu veranschlagende Gütefaktor,
- die Vollbenutzungsstunden (VBH) und
- der „anzulegende Wert“ (AW)⁴¹.

Die Abfolge der Berechnungsschritte ist in Abbildung 1 (KNE 2024c, S. 16) illustriert. Wulfert et al. (2024, S. 29, Abb. 14 und 15) illustrieren, wie die Höhe der maximal zumutbaren

⁴⁰ Ein Ertragsgutachten (syn: Standortspezifisches "Windgutachten") ist verpflichtend. Es wird von akkreditierten Gutachtern erstellt.

⁴¹ Der AW wird aus den durchschnittlichen, mengengewichteten Zuschlagswerten der letzten drei Ausschreibungsrunden der Bundesnetzagentur (BNetzA) ermittelt.

Investitionskosten für AKS mit der Zunahme der Leistung, der Vollbenutzungsstunden und des Gütefaktors steigt.

Eine Ausnahmeerteilung kommt für kollisionsgefährdete Vogelarten in Frage, jedoch nicht für Fledermäuse. Im Fall einer Ausnahmeerteilung, sind die Zumutbarkeitsschwellen im so genannten Basisschutz auf 4 bzw. 6 Prozent abgesenkt, entsprechend ist auch der Betrag der zumutbaren Investitionskosten niedriger (ebd., S.30, Abb. 16). Nach überschlägiger Berechnung dürften AKS als Schutzmaßnahme aufgrund der abgesenkten Zumutbarkeitsgrenzen im Basisschutz nicht zur Anwendung kommen.

Werden Schutzmaßnahmen für Fledermäuse beauftragt – was regelmäßig der Fall sein dürfte – beträgt die Höhe der anrechenbaren Ertragsverluste 2,5 Prozent. Durch Gutachten kann von diesem Pauschalwert abgewichen werden. Die 2,5 Prozent Ertragsverluste durch Fledermausabschaltungen wirken sich auf den Investitionskostenpielraum für AKS aus (vgl. ebd., S. 31, Abb. 17 und 18).

5.1.2 Höhe der prozentualen Zumutbarkeitsschwelle

Die Höhe der Zumutbarkeitsschwelle wird vom **Gütefaktor**⁴² des Standortes (größer oder kleiner als 90 Prozent des Referenz-Ertragswertes) bestimmt. An Standorten mit einem Gütefaktor < 90 Prozent des Referenzertrages liegt die Schwelle bei insgesamt 6 Prozent des Jahresenergieertrags. An Standorten mit einem Gütefaktor > 90 Prozent liegt sie bei insgesamt 8 Prozent. Bei Ausnahmeerteilung gelten abgesenkte Schwellen, nämlich 4 und 6 Prozent (siehe oben). In Verfahren nach § 6 WindBG liegen die Schwellen bei 6,3 und 8,3 Prozent.

Die Zumutbarkeitsschwelle hat den größten Einfluss auf die Höhe der jeweils zumutbaren Investitionskosten (vgl. KNE 2024c, S. 22 f.).

Die **Standort- oder Ertragsgüte** ist in Deutschland regional unterschiedlich verteilt. Im Norden ist eine Standortgüte ab 90 Prozent häufiger, auch kann eine höhere Anzahl an Vollbenutzungsstunden erreicht werden. Entsprechend dürfte in Norddeutschland die Zumutbarkeitsschwelle von 8 Prozent häufiger zum Tragen kommen.

Es ist anzunehmen, dass der überwiegende Teil der Vorhaben auf Standorten realisiert wird, bei denen die Schwelle von 6 Prozent anzulegen ist. Demzufolge ist davon auszugehen, dass auch die Spielräume für die Anwendung von AKS im Bundesgebiet unterschiedlich ausfallen.

Hier sind die Spielräume für Investitionskosten von vornherein begrenzt. In den betrachteten Fallkonstellationen (vgl. KNE 2024c) betragen sie zwischen 180.000 und 200.000 Euro. Bereits der Anschaffungspreis für ein validiertes und zertifiziertes AKS könnte die genannte Spanne überschreiten. Insofern wirkt dieser Kostenrahmen wie ein „Deckel“ – für die Preisgestaltung der Systemanbieter, aber auch für die Nachfrage.

An ertragsschwachen Standorten mit Gütefaktor kleiner 90 Prozent, geringerer Leistung bzw. weniger Vollbenutzungsstunden, wie sie in Süddeutschland anzutreffen sind, dürften AKS aktuell nur in Einzelfällen zur Anwendung kommen können.

Die Berechnung der Zumutbarkeit wird für jede WEA einzeln durchgeführt. Kann eine Maßnahme (z. B. AKS zur bedarfsgerechten Abschaltung) das Kollisionsrisiko für mehrere WEA

⁴² Der Gütefaktor bildet das Verhältnis des Standortertrags einer Windenergieanlage zum Referenzertrag in Prozent ab. Die Bestimmung des Gütefaktors ist in § 36h Abs. 1 S. 5 EEG geregelt.

wirksam senken, sind die Investitionskosten anteilig pro WEA zu ermitteln. Dadurch sinkt der anrechenbare Investitionskostenanteil pro Anlage.

Die Zumutbarkeitsschwelle kann bei eingeschränktem Investitionsspielraum eingehalten werden, wenn das AKS mehrere WEA (mindestens zwei) abdeckt. Die Investitionskosten können dann auf mehrere Anlagen aufgeteilt werden. Bei Einzelanlagen dürfte der AKS-Einsatz stark von der Bereitschaft des Vorhabenträgers abhängig sein, die Zumutbarkeitsschwelle freiwillig zu überschreiten.

5.1.3 Investitionsspielräume

An normal windhöffigen Standorten (6 bzw. 6,3 Prozent-Standorte) ohne Fledermausabschaltung läge das verfügbare Niveau maximal zumutbarer Investitionskosten ab WEA-Leistungen von mindestens 4 Megawatt (MW) und 2500 Vollbenutzungsstunden (VBH) über 500.000 Euro (vgl. Wulfert et al. 2023, Abb. 14). An besonders windhöffigen Standorten ohne Fledermausabschaltung (8 bzw. 8,3 Prozent-Standorte) sind die Investitionsspielräume noch größer. Unter denselben Voraussetzungen (Anlagenleistung 4 MW und mindestens 2500 VBH) betragen die maximal zumutbaren Investitionskosten bereits 600.000 Euro, mit zunehmender Leistung und VBH können auch eine Million Euro und darüber zumutbar sein (vgl. ebd., Abb. 15). Sinken Anlagenleistung und VBH, sinkt auch der Spielraum.

Maßnahmen zum Fledermausschutz, die regelmäßig beauftragt werden, schlagen mit mindestens 2,5 Prozent zu Buche. Das Niveau der Investitionskosten für Vogelschutzmaßnahmen ist bei insgesamt bis zu 5,5 Prozent zumutbaren Ertragsverlusten deutlich geringer.

Ausgehend von dieser Prämisse wurden die Spielräume verschiedene Fallkonstellationen an 6 und 8-Prozent-Standorten untersucht (KNE 2024c).

Für die Fallkonstellationen wurden unterschiedliche Annahmen zur Anlagenleistung und zu den VBH getroffen. Der anzulegende Wert (AW) bleibt gleich. Die Fallkonstellationen erlauben es, die jeweils verfügbaren Investitionssummen innerhalb der Zumutbarkeitsgrenze genauer zu bestimmen (vgl. ebd., Tabellen 3 und 4).

Wulfert et al. (2024, S. 31) haben dargestellt, wo die Untergrenzen der maximal zumutbaren Investitionskosten unter Annahme einer Fledermausabschaltung an „normal windhöffigen“ und „besonders windhöffigen“ Standorten liegen. In einer Grafik illustrieren die Autoren (ebd.), welche Spielräume jeweils bei geringen Anlagenleistungen und geringen VBH liegen und wie sie mit zunehmender Anlagenleistung und VBH ansteigen. Aufgrund der überschlägigen Preisinformationen für AKS ist ein Bereich zwischen 300.000 und 500.000 Euro markiert (ebd.). Nach heutigen Informationen erscheint es gerechtfertigt, ein etwas geringeres Preisniveau anzunehmen (250.000 bis 400.000 Euro). Dennoch wird deutlich, dass ein AKS-Einsatz zusammen mit Fledermausabschaltung an 6-Prozent-Standorten nur dann im zumutbaren Investitionskostenrahmen liegt, wenn eine hohe Anlagenleistung und eine hohe Zahl an Vollbenutzungsstunden gegeben sind. Eine Aussage darüber, an wie vielen Standorten geplanter Neuzulassungen das der Fall ist, können wir hier nicht treffen.

5.1.4 Unzumutbarkeit

Die aufsummierten Werte für den Ertragsverlust durch die jeweiligen Maßnahmen werden in einem ersten Schritt (vgl. Nummer 2.2 der Anlage 2 BNatSchG) mit der prozentualen Zumutbarkeitsschwelle von 6 Prozent bzw. 8 Prozent abgeglichen. Übersteigt der Ertragsverlust die Schwelle, liegt die Unzumutbarkeit der Schutzmaßnahmen vor.

Unterschreitet er die Zumutbarkeitsschwelle, wird in einem weiteren Schritt die „monetäre Zumutbarkeit“ (vgl. Nummer 2.3 der Anlage 2 BNatSchG) geprüft. Übersteigt der prognostizierte monetäre Ertragsverlust unter Berücksichtigung der anrechenbaren Investitionskosten den maximal zumutbaren monetären Ertragsverlust aus der Berechnung nach Nummer 2.1, ist wiederum die Zumutbarkeitsschwelle überschritten und die Maßnahmen gelten als unzumutbar (vgl. KNE 2024c, S. 16)

AKS in der Ausnahme

In **Verfahren nach § 45b BNatSchG** führt die Feststellung der **Unzumutbarkeit** dazu, dass eine Zulassung im Wege einer **Ausnahme** zu prüfen ist. Hier sind zwar ebenfalls Schutzmaßnahmen vorzusehen, allerdings sind die Zumutbarkeitsgrenzen für diese um jeweils 2 Prozent abgesenkt (also 4 und 6 Prozent). Eine Anwendung von AKS unter den restriktiven Bedingungen des sog. „**Basisschutzes**“ erscheint eher unwahrscheinlich. Vermutlich würden die Vorhabenträger stattdessen auf eine Ausgleichszahlung abstellen.

In **Verfahren nach § 6 WindBG** ist keine Ausnahmeerteilung vorgesehen. Die Genehmigungsbehörde prüft, welche Minderungsmaßnahmen geeignet und verhältnismäßig sind. Sofern entsprechende Maßnahmen nicht verfügbar⁴³ sind, hat die Genehmigungsbehörde nach § 6 Absatz 1 Satz 5 WindBG eine **Zahlung in nationale Artenhilfsprogramme** anzuordnen (3000 €/MW). Die Nicht-Verfügbarkeit verhältnismäßiger Maßnahmen führt also zu einem Übergang in den monetären Ausgleich. Sofern aber zugleich Schutzmaßnahmen für Vögel im Sinne von Abschaltungen angeordnet werden, reduziert sich der Betrag auf 450 €/MW jährlich.

Die Minderungsmaßnahmen müssen nach § 6 Absatz 1 Satz 3 WindBG insgesamt verhältnismäßig sein (BMWK u. BMUV, S. 14). Überschreiten die geeigneten Minderungsmaßnahmen die Zumutbarkeitsschwelle, hat die zuständige Behörde zu entscheiden, welche Minderungsmaßnahmen bis zur Grenze der Zumutbarkeitsschwelle angeordnet werden (ebd., S. 15). Die zuständige Behörde hat die verschiedenen geeigneten Minderungsmaßnahmen untereinander zu gewichten und die wirksamsten Maßnahmen zu priorisieren (ebd.).

AKS als Schutzmaßnahme können aufgrund ihrer Wirksamkeit priorisiert werden. Wenn dann aber ihr Anwendungszeitraum zur Einhaltung der Zumutbarkeitsgrenzen reduziert werden muss, wird ergänzend zum Einsatz des AKS eine Zahlung von 450 €/MW/Jahr fällig.

Freiwillige Überschreitung der Zumutbarkeit

Wenn die Zumutbarkeit überschritten wird, können AKS grundsätzlich dennoch auf Verlangen des Vorhabenträgers, also freiwillig, beauftragt werden. Dies ist denkbar in Fällen, in denen sich der Vorhabenträger dadurch Vorteile (z. B. höhere Akzeptanz) verspricht.

Verteilung der Investitionskosten auf mehrere WEA

Auch durch die Verteilung der Investitionskosten für ein System auf mehrere WEA kann der verfügbare Investitionsspielraum eingehalten werden. Dass eine hinreichende Abdeckung mehrerer Erfassungsbereiche möglich ist, muss in diesen Fällen durch ein **Standortgutachten** belegt werden.

⁴³ Nicht verfügbar sind geeignete Minderungsmaßnahmen, wenn sie aus tatsächlichen Gründen nicht durchführbar sind. (BMWK u. BMUV 2023, S. 12)

5.2 Investitionskostenrahmen

Nachfolgende werden Optionen beschrieben, die dazu beitragen können, die in Kapitel 5.1.3 beschriebenen Investitionsspielräume einzuhalten.

5.2.1 Definition der Investitionskosten (IK)

In Anlage 2 zu § 45b BNatSchG wurden Begriffsbestimmungen im Kontext der Zumutbarkeit vorgenommen. Zu den in die Berechnungsformel einzusetzenden Investitionskosten (IK) ist lediglich vermerkt: „Summe der Investitionskosten in Euro aller Schutzmaßnahmen“. Welche Kosten im Einzelnen den Investitionskosten zuzurechnen sind, wurde bisher nicht konkretisiert. Von seiner Definition hängt ab, welche der entstehenden Kosten auf die Zumutbarkeit anrechenbar sind. In der folgenden Tab. 5 sind verschieden „weite“ Definitionen zusammengestellt.

Tab. 5: Anrechenbarkeit von Investitionskosten für Schutzmaßnahmen

Autor/Quelle	Vorschlag	Einordnung
Wulfert et al. (2024, S. 15)	„finanzielle Mittel, die in eine Sachanlage (fixe Kosten für Anschaffung oder Installation von Schutztechniken) fließen und einmalig anfallen“	Diese enge Definition begrenzt die anrechenbaren Kosten auf die Anschaffung und (einmalige) Installationskosten. Eine solche enge Auslegung erleichtert es, die Zumutbarkeitsgrenze zu unterschreiten. Alle anderen auftretenden Kosten werden als zumutbar betrachtet.
FA Wind (2022, S. 5).	„sämtliche Kosten für Kauf, Betrieb und Wartung von Geräten. Sie müssen auf den Schutz betroffener Arten abzielen.“	Diese erweiterte Definition , würde es ermöglichen, auch laufende Kosten (Betrieb, Wartung der Systeme) in Anrechnung zu bringen. Bisher liegen dazu nur wenige Erfahrungswerte vor. Bei Anrechnung der laufenden Wartungskosten für Systeme wäre die Einhaltung des Investitionsrahmens nach Aussage einzelner Systemanbieter nicht darstellbar.
N.N.; Vertreter Genehmigungsbehörde	Kosten zur Anschaffung eines Sachgegenstandes sowie weitere Kosten, die bis zu dessen Inbetriebnahme anfallen. (Fischer, 2024, mündlich)	Diese Definition ist ebenfalls erweitert. Sie schließt Kosten bis zur Inbetriebnahme des Systems (z. B. Anbringen am WEA-Turm oder Bau eines Turms für das System einschließlich der Zuwegung zum Systemstandort und Kabelanschlüssen) ein. Auch Gutachterkosten (z.B. für Kampfmittelberäumung) könnten anzurechnen sein. Sollen die anrechenbaren Kosten im Zumutbaren Rahmen bleiben, müsste das Kostenspektrum hier noch deutlich eingegrenzt werden.
N.N.; Vertreter Windbranche	Zusätzlich zum Kauf, Betrieb und Wartung eines AKS auch etwaige zusätzliche Wartungskosten für die WEA	Die weiteste Definition , umfasst neben laufenden Systemwartungskosten auch noch die zusätzlichen Wartungskosten für die WEA. Die Einhaltung des zumutbaren Investitionsrahmens wäre hier unwahrscheinlich. Hinzu kommt, dass es keine verlässliche bzw. überprüfbare Grundlage für die Kostenprognose gibt.

Um hier mehr Entscheidungssicherheit für die Zumutbarkeitsprüfung zu schaffen, wäre eine Festlegung, was darunter zu verstehen ist, erforderlich.

Festzuhalten ist, dass bei einer „weiten Auslegung“ der Anrechenbarkeit (vorbereitende Maßnahmen, Installation, Wartungskosten über 20 Jahre) die zumutbaren Investitionskosten regelmäßig überschritten werden dürften. Das kann nicht im Sinne des Gesetzgebers sein.

Eine Beschränkung der Anrechenbarkeit auf die System-Anschaffungskosten (vgl. Tab. 5, Zeile 1) würde die Einhaltung der Zumutbarkeitsgrenze hingegen häufiger gewährleisten („enge Auslegung“).

Die Konkretisierung der Investitionskostendefinition ist eine wichtige Voraussetzung für mehr Entscheidungssicherheit. Es wäre zielführend, wenn AKS als Schutzmaßnahme mit hoher Vermeidungswirksamkeit häufiger zur Anwendung kommen können. Sie sollten auch in Verfahren nach § 6 WindBG nicht weniger attraktiv sein als Ausgleichszahlungen.

5.2.2 Kostenaufteilung auf mehrere WEA

Eine anteilige Anrechnung der Systemkosten auf mehrere WEA bietet die Möglichkeit, die Zumutbarkeitsschwelle einzuhalten. Voraussetzung dafür ist, dass eine ausreichend hohe Erfassungsrate in den Erfassungsbereichen mehrerer WEA erreicht werden kann. Im Einzelfall wird es von der Anordnung der WEA, der Topografie und der Lage relevanter Brutplätze und der Einsehbarkeit abhängig sein, ob ein System mehrere Anlagen abdecken kann. Nach Angaben von e3 IDF GmbH kann ein System „problemlos“ zwei WEA abdecken, in günstigen Fällen auch drei. Ab zwei Anlagen könnte die Zumutbarkeitsschwelle sicher eingehalten werden. Bisher konnte erst virtuell gezeigt werden, dass eine Abschaltsteuerung für mehrere WEA durch ein System möglich ist. Die sei lediglich eine Frage der Rechenleistung. In der Praxis wurde dies noch nicht umgesetzt.

5.2.3 Senkung der Anschaffungskosten für AKS

Die Anschaffungskosten für die markverfügbaren Systeme (vgl. KNE 2024b) unterscheiden sich beträchtlich. Die Preisunterschiede kommen teils durch die technische Ausstattung (Kameras, Hardware) sowie durch die Entwicklungskosten für spezifische Tracking und Erkennungssoftware zustande. Systeme, die Abschaltungen auf Grundlage einer Größenklassifizierung steuern, sind in der Anschaffung günstiger. Jedoch kann die Abschalthäufigkeit höher sein als bei Systemen, die artselektiv – also nur für die Zielart(en) und damit seltener – abschalten. Die Höhe der Ertragsverluste kann betriebswirtschaftlich stärker ins Gewicht fallen als die einmaligen Anschaffungskosten. Insofern ist hier sorgfältig abzuwägen.

Die Systemanbieter haben ihre Preiskalkulation bereits an die nach dem Gesetz zumutbaren Investitionsspielräume angepasst und nach eigenen Angaben „ausgereizt“. Der rechtliche Rahmen setzt durch die Zumutbarkeitsgrenzen deutliche Preissignale. Jedoch führt dies aktuell eher dazu, dass die Systemanbieter ihre Marktchancen negativ einstufen und sich abwartend verhalten.

5.2.4 Fallweise Zulässigkeit der Überschreitung

Eine weitere Option wäre es zu prüfen, ob eine fallweise Überschreitung der Zumutbarkeit von AKS eingeräumt werden könnte. Hierfür müssten Bedingungen formuliert werden, die in Anbetracht der Schwere des Einzelfalles (z.B. Seltenheit/Schutzbedürftigkeit der betroffenen Arten) den Einsatz eines AKS erfordern. Hier könnte auf die Dauer des Überwachungszeitraums (ganzjährig, Brut- und Fortpflanzungszeit) und zuverlässige bedarfsgerechte

Schutzwirkung) abgestellt werden. In diesen Fällen könnten höhere Zumutbarkeitsgrenzen (z. B. 8 bzw. 10 Prozent) zu Tragen kommen.

5.3 Tatsächliche Ertragsverluste bei bedarfsgerechter Abschaltung

Auf Seiten der Vorhabenträger besteht die Befürchtung, dass die tatsächlichen Ertragsverluste durch bedarfsgerechte Abschaltung höher sind als der rechnerisch in Anrechnung zu bringende zumutbare Ertragsverlust von 3 Prozent. Wie in KNE (2024c) dargelegt, ist dieser Wert keine „tatbestandliche“ Obergrenze, die den Vorhabenträger berechtigt, eine Schutzmaßnahme nach ihrer Festsetzung in der Genehmigung im Falle einer tatsächlichen Überschreitung im laufenden Betrieb zu begrenzen oder auszusetzen.

Dennoch liegt es im nachvollziehbaren Interesse der Vorhabenträger, den zumutbaren Ertragsverlust nach Möglichkeit nicht zu überschreiten. Ein (freiwilliges) Monitoring der Flugaktivität am Standort könnte die Prognosesicherheit der Abschalthäufigkeit und damit verbundener Ertragsverluste verbessern. Es ist jedoch fraglich, ob Vorhabenträger dies veranlassen, solange Alternativen (andere Schutzmaßnahme, Zahlungen) bestehen.

In Kapitel 5.3 wird daher der Frage nachgegangen, wie berechtigt die Befürchtung ist, dass die Ertragsverluste unkalkulierbar hoch ausfallen. Steinkamp et al. (in Vorbereitung) haben anhand einer Reihe von „realen“ Fällen untersucht, wie hoch die durch AKS ausgelösten Ertragsverluste ausgefallen sind.

5.3.1 Potenziale zur Senkung von Ertragsverlusten

Wie bereits erwähnt, hat die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme einen Einfluss auf die Maßnahmenauswahl und auf das Bestreben, die Ertragsverluste zu minimieren (vgl. Kapitel 5.3). Zu den wirtschaftlichen Abwägungen zählen auch die voraussichtlichen Ertragsverluste, die durch den Einsatz von AKS verursacht werden. Je mehr Abschaltungen durch das AKS ausgelöst werden, desto höher fallen die Ertragsverluste aus, was unter Wirtschaftlichkeitsaspekten für den Vorhabenträger nachteilig ist.

Steinkamp et al. (2024) haben untersucht, welche Möglichkeiten bestehen, etwaige Ertragsverluste durch bedarfsgerechte Abschaltung zu minimieren, ohne dass damit eine substantielle Reduzierung des Schutzniveaus einhergeht. Im Folgenden werden die Ansatzpunkte, beschrieben. Sie beziehen sich im Wesentlichen auf eine Optimierung der AKS-Funktionen und der für den vermeidungswirksamen Betrieb getroffenen Annahmen.

5.3.1.1 Reduzierung der Abschalthäufigkeit: Optimierung der Klassifizierungsleistung

AKS klassifizieren die Zielart derzeit auf Artebene oder auf Basis einer Größenklasse. Je besser die Klassifizierungsleistung ist, desto geringer ist die Falsch-Positiv-Rate (→ Glossar) und desto weniger „Fehlabschaltungen“ werden ausgelöst. Aus naturschutzfachlicher Sicht ist eine hohe Falsch-Positiv-Rate kein Nachteil, da eher zu viel als zu wenig abgeschaltet würde.

Für die realistische Ertragsverlustabschätzung sollte die Falsch-Positiv-Rate vom Systemanbieter ausgewiesen sein. Aus Sicht der Vorhabenträger kommt es – ergänzend zur Schutz- bzw. Gesamtrate – darauf an, diesen Wert zu kennen. Die Relevanz dieses Wertes sollte einen Anreiz für die Systemanbieter bieten, die Klassifizierungsleistung der AKS weiter zu verbessern (Steinkamp et al. 2024, S. 34).

Das KNE sieht bei den Systemen mit selektiver Arterkennung noch Optimierungsmöglichkeiten, allerdings sind die Möglichkeiten schon weitgehend ausgeschöpft. Bei Systemen mit

Größenklassen-Klassifizierung ist das Potenzial, Abschaltverluste durch eine bessere Klassifizierung zu reduzieren, noch höher.

5.3.1.2 Reduzieren der Abschalthäufigkeit: „Anheben“ des Reaktionsbereichs

Die „rechtzeitige“ Reaktion wird durch die Festlegung einer Reaktionsdistanz gewährleistet. Das System IDF hat zur Kennzeichnung des Reaktionsbereichs einen sog. „Abschaltzylinder“ um die WEA konzipiert. Dieser Zylinder wird zum einen durch seinen Radius definiert. Die Festlegungen zur vertikalen Ausdehnung (Unterkante und Oberkante des Zylinders) wurden in den Erprobungsvorhaben bisher vorsorgeorientiert gehandhabt.

An einem Standort in Hessen konnte gezeigt werden, dass etwa drei Viertel aller Flüge des Rotmilans unterhalb von 80 m über dem Grund stattgefunden haben (Reichenbach et al. 2023c). Je höher der Anteil der Flüge in geringer Höhe, desto vertretbarer erscheint es, die Unterkante des Abschaltzylinders „anzuheben“. Für die Bemessung, wo die Unterkante des Abschaltzylinders („vertikale Abschaltdistanz“) liegt, kommt es darauf an, wie groß der freie Bereich unterhalb der Rotorunterkante, also der Abstand zum Boden oder zur Vegetation, ist. In Abhängigkeit von der vertikalen Fluggeschwindigkeit kann die Reaktionsdistanz zum Rotor ermittelt werden.

Einordnung:

Durch ein Anheben des Abschaltzylinders führt ein nicht unerheblicher Teil der Flüge im rotorfreien Bereich unterhalb des Rotors nicht zu Abschaltungen. Dies kann zu einer deutlichen Reduzierung der Abschaltungen führen. Eine von der Erprobung abweichende Bemessung der vertikalen Abschaltdistanz zwischen Rotorunterkante und Unterkante des Zylinders bedarf der fachlichen Begründung und Plausibilisierung.

5.3.1.3 Reduzieren der Abschalthäufigkeit: Verkleinern des Reaktionsbereiches

Die Bemessung des Reaktionsbereichs geht davon aus, dass durch das Individuum der Zielart ein gerichteter Flug mit einer mittleren Fluggeschwindigkeit auf die WEA zu durchgeführt wird. Dies führt auch für nicht kollisionsgefährdende Flüge zu Abschaltungen. Aus dem Flugverhalten des Rotmilans kann vielmehr eine höhere Kollisionsgefährdung für langsame, nicht gerichtete Nahrungsflüge abgeleitet werden. Würde also eine niedrigere Fluggeschwindigkeit zur Bestimmung des Reaktionsbereichs angesetzt, könnte der Reaktionsbereich verkleinert werden. In einem Beispiel wird von einer Flächenverringerung von etwa 40 Prozent ausgegangen. Einen ähnlichen Effekt könnte die Reduzierung der Zeit zum Erreichen des Trudelbetriebs bewirken, da auch dieser Faktor zur Ermittlung der Größe des Reaktionsbereichs herangezogen wird. Im Binnenland dreht der Rotor der WEA etwa in zwei Dritteln der Zeit langsamer als mit Volllast, sodass der Trudelbetrieb bereits früher erreicht wird (ebd., S. 36 ff.).

Einordnung:

Eine Reduzierung des Reaktionsbereiches und damit Verringerung der Fläche, bei deren Überflug eine Abschaltung ausgelöst wird, erscheint in begründeten Fällen denkbar und realistisch. Ein Abweichen von der Erprobungs-Reaktionsdistanz muss sich fachlich herleiten lassen.

5.3.1.4 Geometrische Anpassung des Reaktionsbereichs (Ellipse statt Zylinder)

Der Reaktionsbereich bildet einen Raum, der durch eine horizontale und eine vertikale Reaktionsdistanz (ober- und unterhalb des Rotors) bestimmt ist. Daraus ergibt sich die Form eines Zylinders, der in alle Richtungen denselben Abstand zu den Rotorspitzen aufweist. Diese vereinfachende Annahme erfolgt, weil man nicht vorhersehen kann, aus welcher Richtung bzw.

in welchem Winkel ein Vogel auf den Rotor zufliegt. In seiner radialen Form deckt der Abschaltzylinder alle Möglichkeiten der Annäherung ab. Das führt dazu, dass der Abschaltzylinder eine große Flächenausdehnung hat. Auch bei „Vorbeiflügen“ im spitzen Winkel oder rotorparallel würde ein Abschaltsignal ausgelöst.

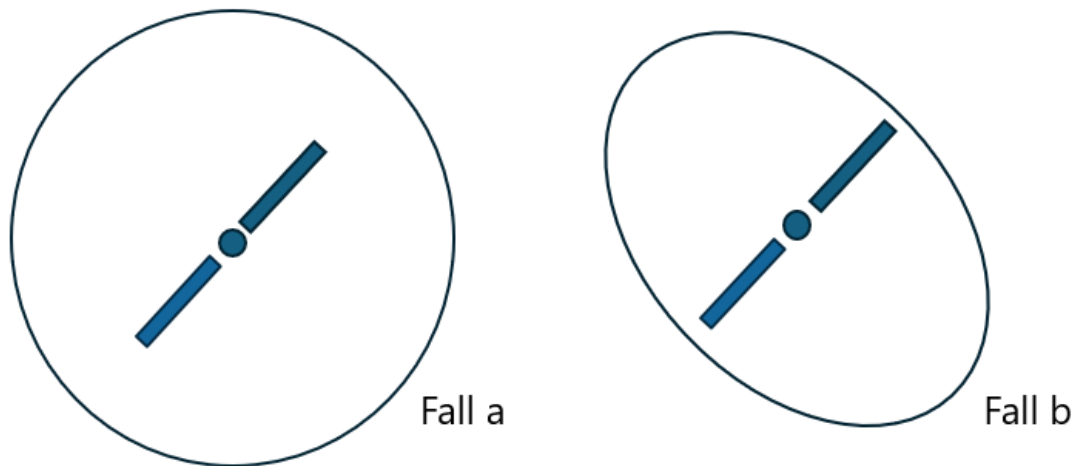


Abb. 4: Schematische Darstellung der Flächenausdehnung eines zylinderförmigen Reaktionsbereichs (Fall a) im Vergleich zur einer zu den Rotorspitzen ausgerichteten Ellipse (Fall b). Prinzipskizze nach Steinkamp et al. (2024, S. 39, verändert).

Der Reaktionsbereich könnte verringert werden, wenn man anstelle einer radialen Form eine elliptische Form wählen würde (vgl. Abb. 4, Fall b). Durch die elliptische Form wäre der äußere horizontale Abstand zu den Rotorblattpitzen verkleinert.

Die im Vergleich zum radialen Reaktionsbereich geringere Flächenausdehnung würde die Fläche des Reaktionsbereiches um etwa ein Fünftel reduzieren. Seitliche Vorbeiflüge wäre unkritisch, es würden weniger Abschaltungen ausgelöst, was die Ertragsverluste reduziert. (vgl. Steinkamp et al. 2024, S. 39)

Eine Herausforderung ist, dass sich der Rotor nach der Windrichtung ausrichtet. Die Abgrenzung und Lage des Reaktionsbereichs müssten sich entsprechend anpassen, damit die notwendigen Abstände für eine rechtzeitige Reaktion eingehalten werden können. Ein „dynamischer Reaktionsbereich“, der der Rotorstellung folgt, bringt jedoch neue Unsicherheiten und Herausforderungen mit sich, nicht zuletzt, weil die Variabilität eine hohe fortgesetzte Rechenleistung erfordert.

Einordnung:

Der Ansatz, von einem „starrten“ radialen Reaktionsbereich abzuweichen, ist bis dato nur eine „theoretische Überlegung“. Der Realisierungsaufwand für die fortlaufende Berechnung, wie die Ellipse bei sich verändernden Rotorstellungen ausgerichtet sein müsste, wäre beträchtlich und würde neue Herausforderungen mit sich bringen. Bisher werden für die Berechnung des Reaktionsbereichs keine Messdaten (Windrichtung, Rotorstellung) erfasst und einbezogen. Es wäre nachzuweisen, dass die Verkleinerung des Reaktionsbereichs die Vermeidungswirksamkeit (rechtzeitige Abschaltung) nicht einschränkt. Eine Umsetzung in absehbarer Zeit erscheint daher nicht realistisch.

5.3.1.5 Verkürzung der Abschaltdauer: Verzicht auf „Time to clear“

Wie hoch die Ertragsverluste ausfallen, hängt nicht nur von der Abschalthäufigkeit, sondern auch von der Dauer der Abschaltungen ab. Wenn man die Dauer pro Abschaltvorgang verkürzen könnte, böte dies die Möglichkeit, Ertragsverluste zu verringern.

In bisherigen Berechnungen wurde angenommen, dass es mindestens 10 Minuten dauert, bis die WEA nach einer Abschaltung wieder am Netz ist. Die benötigte Zeitspanne hängt von mehreren Faktoren ab:

- Der Aufenthaltszeit des Vogels innerhalb des Reaktionsbereichs,
- der Zeitspanne, die gewartet wird, bis das Signal zum Wiederanfahren gesendet wird, nachdem der Vogel den Reaktionsbereich verlassen hat („Time to clear“)⁴⁴ und
- der benötigten Zeit zum Wieder-Anfahren der WEA. Die Dauer ist anlagenspezifisch (technisch) bedingt

Die Aufenthaltszeit eines oder mehrere Vögel im Reaktionsbereich ist nur bedingt vorhersehbar.

Von den genannten Faktoren bietet die Bemessung der „Time to clear“ einen Ansatzpunkt zur Reduzierung. Eine bestimmte Zeitspanne verstreichen zu lassen soll verhindern, dass die WEA mehrmals hintereinander gestoppt und wieder angefahren wird. Um nachteilige On/Off-Effekte zu vermeiden, hat der Systemanbieter e3/IDF bisher 5 Minuten angesetzt. Inzwischen hält der Systemanbieter es für vertretbar, die Time to clear-Spanne auf 3 Minuten zu reduzieren, ohne dass dies der Funktionalität abträglich ist. Denkbar wäre es auch, ganz auf die „Time to clear“ zu verzichten. Dann müsste aber sichergestellt sein, dass der Wiederanfahrprozess ungestört ablaufen kann und nicht durch ein erneutes Abschaltsignal unterbrochen wird.

Auch der Wiederanfahrprozess dauert mehrere Minuten. Pauschal werden ebenfalls 5 Minuten genannt. Könnte er verkürzt werden, bestünde hier ebenfalls noch die Möglichkeit, Ertragsverluste zu reduzieren. Eine Angabe, welcher Mindestzeitraum die Untergrenze darstellen würde, liegt dem Forschungsnehmer nicht vor.

Einordnung:

Der Ansatz, die „Time to clear“ zu verkürzen, wird als eine **realistische Option** zur Reduzierung der Abschaltdauer angesehen. Eine Verminderung der Schutzwirkung ist nicht zu erwarten. Ob die Anlagenhersteller Anreize haben, die Wiederanfahrzeit zu verkürzen, wird von einer entsprechenden Nachfrage abhängen (siehe auch nachfolgenden Absatz).

5.3.1.6 Reduzierung von Abschaltungen: „Drosselung“ statt Abregelung

Wenn es zur Senkung eines erhöhten Kollisionsrisikos ausreichen würde, die Drehgeschwindigkeit der WEA nur so weit zu verringern, dass sie gerade noch am Netz bleiben kann, würden die Wiederanfahrzeiten⁴⁵ der WEA entfallen. Die Anlage würde gar nicht in den Trudelbetrieb (Abkopplung vom Netz) gehen, sondern in einen gedrosselten Betrieb. Voraussetzung wäre, dass es rechtlich nicht geboten wäre, die WEA in einen Trudelbetrieb zu versetzen. Derzeit ist

⁴⁴ „Time to clear“ bedeutet wörtlich „Zeit zum Verlassen [des abschaltrelevanten Bereichs]. Dafür wird ein Zeitabschnitt festgelegt, der nach Abschaltung einer WEA vergeht, bevor die WEA das Signal zum Wiederanfahren bekommt.

⁴⁵ Die Wiederanfahrzeit kann mit bis zu 5 Minuten etwa die Hälfte der Abschaltdauer ausmachen (vgl. ebd., S. 41.).

das Versetzen in den „Trudelbetrieb“ jedoch explizit in Anlage 1 Abschnitt 2 zu § 45b BNatSchG genannt (vgl. hierzu auch KNE 2024e).

Angesichts dieser Rechtslage sind die weiteren Überlegungen zunächst hypothetisch. Um die Drosselung als Schutzmaßnahme oder als Teil („Vorstufe“) einer AKS-gesteuerten Abschaltung zu etablieren, wäre eine Ergänzung in den Bundes- oder Länderregelungen zu Schutzmaßnahmen hilfreich.

Bei der Drosselung handelt es sich um ein „dynamisches“ Konzept. Soll die Drosselung den Trudelbetrieb ersetzen, müsste definiert werden, welche Rotordrehzahl im gedrosselten Zustand einzuhalten wäre. Die Zahl der Umdrehungen/Minute (U/min) müsste sich daran orientieren, bei welcher Drehgeschwindigkeit die Anlage noch am Netz bleiben kann, da sich sonst kein Vorteil gegenüber einer Abschaltung ergeben würde.

Die Drehzahl, bei der eine WEA noch am Netz bleiben kann, ist typenspezifisch. Es kann also allenfalls eine Spanne angegeben werden. Alternativ könnte für jedem WEA-Typ eine Mindest-Umdrehungszahl ermittelt werden. Zudem müsste technisch geklärt werden, wie es gelingt, die maximale Drehzahl einzuhalten.

Fachlich betrachtet, gilt eine Rotordrehzahl von bis zu 2 U/Min noch als vermeidungswirksam (vgl. KNE 2024a). Jedoch gibt es nach Kenntnis der Forschungsnehmenden keinen Anlagentyp, der bei 2 U/Min noch am Netz bleiben kann. Nach Untersuchungen von Steinkamp et al. (2024) gibt es ein gewisses „Kollisionsrisiko-Plateau“ zwischen 2 und 4 U/Min. Erst ab 4 U/Min würde das Kollisionsrisiko ansteigen. Es wäre also zu prüfen, ob eine Reduzierung der Drehgeschwindigkeit auf zum Beispiel 4 U/Min nicht schon einen ausreichenden Beitrag zu Senkung des signifikant erhöhten Tötungsrisikos haben könnte.

Zu klären wäre außerdem, ob bzw. welche moderne WEA bei maximal 4 U/Min am Netz bleiben könnte. Bisher liegen dazu keine Aussagen der Anlagenhersteller vor.

Aber auch unter einem anderen Aspekt als der Reduzierung von Ertragsverlusten wäre die Möglichkeit der Drosselung interessant. Aus Sicht der Betreiber wurde wiederholt das Argument „erhöhter Verschleiß“, vorzeitige Materialermüdung bzw. zuletzt „Probleme der Standicherheit“ durch häufiges und starkes Abbremsen“ angeführt. Dem könnte begegnet werden, wenn die „Reaktion“ auf einen detektierte Zielart eine stufenweise Reaktion vorsähe. Eine ausreichende Erfassungsreichweite vorausgesetzt, könnte die Detektion in größerer Entfernung zunächst eine Drosselung, z.B. auf einen Wert von 4 U/Min bedeuten. Erst bei weiterer Annäherung würde dann eine Abschaltung ausgelöst und die Anlage in den Trudelmodus versetzt. Diese stufenweise Abschaltung könnte durch einen „äußeren“ und einen „inneren Reaktionsbereich oder Abschaltzylinder“ gesteuert werden. Diese wären neu zu berechnen, da sich die Zeiten für die Reduzierung der Rotordrehung verringern würden.

Einordnung:

Zur Reduzierung von Ertragsverlusten und von nachteiligen Auswirkungen von Abschaltungen auf die WEA sollten technische Möglichkeiten untersucht werden,

- unter welchen Voraussetzungen der Verbleib am Netz technisch möglich ist,
- wie die Drehzahl auf einen Wert zwischen 2 und 4 U/Min eingestellt werden kann,
- ob ein Wert von bis zu 4 U/Min eine hinreichende Vermeidungswirkung erzielt.

5.3.1.7 Zusammenfassung der Potenziale zur Senkung von Ertragsverlusten

Ein Einsparpotenzial für Ertragsverluste sehen Steinkamp et al. (2024) bei einzelnen Maßnahmen (vgl. Tab. 6), insbesondere dann, wenn man die Ansätze kombiniert. Insgesamt liege das Verringerungspotenzial in einer (geschätzten) Größenordnung von 52 Prozent bis 77,5 Prozent (ebd. S. 43). Dabei sind Einsparungen durch Drosselung statt Abschaltung bzw. Drosselung als Vorstufe zur Abschaltung noch nicht berücksichtigt.

Tab. 6: Potenzial einzelner Maßnahmen zur Verringerung von Ertragsverlusten (angelehnt an Steinkamp et al. 2024, S. 43).

Maßnahme	Verringerung durch	Bemerkung	Verringerung der Ertragsverluste in % (Schätzung)
Optimierung: Verbesserung der Klassifikation	Reduzierung der Abschalthäufigkeit	Potenzial abhängig vom Systemtyp und KI	
Adaption: Anheben des Reaktionsbereichs (Abschaltzylinders)	Reduzierung der Abschalthäufigkeit	Abhängig von der Flughöhenverteilung der Zielart und der Rotorunterkantenhöhe	20 – 50+
Adaption: Verkleinerung des Reaktionsbereichs: Geringere Reaktionsdistanz oder andere Geometrie („Ellipse“)	Reduzierung der Abschalthäufigkeit	Abhängig vom Flugverhalten und der Fluggeschwindigkeit der Zielart	20 – 40
Verzicht auf „Time to clear“	Reduzierung der Abschaltdauer		ca. 25

Eine Einordnung der Chancen, Potenziale zur Senkung von Ertragsverlusten zu realisieren, findet sich oben unter der Beschreibung der einzelnen Ansätze.

5.3.2 Prognose realer Ertragsverluste

Im Rahmen der Zumutbarkeitsprüfung können die Ertragsverluste durch AKS mit 3 Prozent des Jahresenergieertrags in Anrechnung gebracht werden. Projektierer befürchten, dass dieser Wert in der Realität überschritten wird. Sie kritisieren, dass es nicht kalkulierbar sei, ob die tatsächlichen Ertragsverluste die anrechenbaren 3 Prozent überschreiten würden und um wieviel.

Hingegen zeigen Steinkamp et al. (in Vorbereitung)⁴⁶ anhand von Fallbeispielen, in denen IDF eingesetzt wurde auf, dass eine Prognose der realen Ertragsverluste durch eine bedarfsgerechte Abschaltung durchaus möglich ist.

⁴⁶ Die Studie wurde – Stand Anfang 2025 – noch nicht zur Veröffentlichung freigegeben. Die Kernaussagen sind allerdings auch den Vortragsfolien von Steinkamp auf der Abschlussveranstaltung zum FuE-Projekt zu entnehmen.

Grundlage der Methodik ist die Schätzung der Stromproduktion und die Hochrechnung der Abschaltungen am gewählten Standort. Zur Schätzung der Stromproduktion werden die Leistungsdaten der WEA mit den Winddaten am Standort verrechnet. Die zu erwartenden Abschaltungen stützen sich auf Daten aus AKS-Erprobungen oder Testbetrieben. Die Menge und Verteilung der Abschaltungen wird anhand bekannter Flugaktivitätsverteilungen hochgerechnet. Die Dauer der Abschaltung ergibt sich aus der Dauer des Abschaltsignals, der Time to clear und der Anlaufzeit der WEA (ebd.).

Im Ergebnis stellen Steinkamp et al. (in Vorbereitung) dar, dass Ertragsverluste aus bedarfsgerechten Abschaltungen durch AKS, trotz teilweise hoher Flugaktivität, an den untersuchten Standorten bei deutlich unter 3 Prozent der jährlichen Stromproduktion liegen. Damit sei die Befürchtung zu entkräften, dass die Ertragsverluste bei AKS-Einsatz unkalkulierbare Risiken bergen.

Die Berechnungen könnten künftig zu einer standortbezogenen Schätzung der Ertragsverluste genutzt werden (ebd.).

6 AKS-Anwendung und Untersetzungsbedarf

Zum Zeitpunkt der Novellierung des BNatSchG war die Vermeidungswirksamkeit nur für ein Kamerasystem und eine Art, nämlich den Rotmilan nachgewiesen. Für dasselbe System liegt seit 2023 ein Erprobungsbericht für den Seeadler vor (vgl. Reichenbach et al. 2023a). Die Gutachter bestätigten vor dem Hintergrund der 2021 formulierten Anforderungen (Bruns et al. 2021), dass das System auch den Seeadler mit hinreichender Zuverlässigkeit erfasst. Im Jahr 2024, während der Arbeit am Prüfraumen AKS Schleswig-Holstein, wurden weitere Erprobungen (syn: Validierungen) durchgeführt, und zwar für den Rotmilan (AVES, BPS-Long Range).

6.1 Stand der Anwendung

AKS als Schutzmaßnahme sind zweieinhalb Jahre nach Einführung im BNatSchG bisher nur in begrenztem Umfang zur Anwendung gekommen.

Im Rahmen des Projektes hat das Projektteam Genehmigungsbescheide recherchiert und hinsichtlich der AKS-spezifischen Auflagen ausgewertet. Bisher ist die Zahl der Genehmigungsverfahren, in denen AKS als Schutzmaßnahme beauftragt wurden (vgl. Tab. 7) überschaubar.

Tab. 7: Genehmigungen mit AKS als beauftragter Schutzmaßnahme (Stand Oktober 2024)

System	Bundesland u. Standort	Arten für die genehmigt wurde	Hinweise
IDF	Schleswig-Holstein	Rotmilan, Seeadler	Offenland
	Niedersachsen (LK Göttingen)	Rotmilan	Offenland
	Bayern	Rotmilan	Wald; Forschungsprojekt
	Baden-Württemberg	Rotmilan	Wald; Standortvalidierung ausstehend
BirdScan ⁴⁷	Sachsen-Anhalt, (LK Stendal)	Rotmilan, Mäusebussard	Offenland, Neugenehmigung.
BirdVision	Baden-Württemberg; LK Hohenlohe	Milane, Bussarde und Falken	Bestandsgenehmigung; Bewirtschaftungsereignisse
	LK Schwäbisch Hall		Bestandsgenehmigung; Abschaltung bei Bewirtschaftungsereignissen
SafeWind	Hessen (RP Gießen)	Rotmilan	Waldstandort
	Nordrhein-Westfalen (LK Paderborn)	Rotmilan, Schwarzstorch	Komplexes Offenland
Bioseco	SH	Rotmilan, Weißstorch, Seeadler	Windpark mit 7 WEA; Betriebsmonitoring für Seeadler

⁴⁷ Einziger Anwendungsfall in Deutschland. Die Entwicklung des Systems wurde eingestellt.

Der Anwendung von IDF im Offenland ist eine Erprobung mit Nachweis der Vermeidungswirksamkeit vorausgegangen. Die Systeme BirdScan, BirdVision, SafeWind und Bioseco wurden ohne Vorlage validierter Erprobungsberichte eingesetzt.

Bei den Genehmigungen handelt es sich teils um Neugenehmigungen, teils um „Änderungen“ einer Bestandsgenehmigung. Im letztgenannten Fall löst das AKS eine über mehrere Monate andauernde („phänologische“) Abschaltauflage ab.

Die Änderung erfolgt teils mittels einer formellen Änderungsgenehmigung, teils „informell“ durch eine „Anzeige“ gegenüber der Behörde.

Bei den Neugenehmigungen mit AKS handelt es sich um Verfahren nach § 6 WindBG. Zum Schutz des Rotmilans und des Seeadlers wurden IDF und AVES eingesetzt. Im Fall von AVES erfolgte die Beauftragung im Vorgriff auf die erwartete Validierung und Zertifizierung entsprechend der landesspezifischen Vorgaben (MEKUN u. LfU SH 2024).

Aufgrund ihrer im Vergleich zu anderen Schutzmaßnahmen hohen Wirksamkeit sollte geprüft werden, durch welche Regelungen im BNatSchG bzw. der Begründung die Anwendung von AKS befördert werden könnte.

6.2 Betriebszeiten des AKS

Unter der Voraussetzung, dass ein AKS mehrere Monate im Jahr in Betrieb ist, schützt es die Flugaktivität in der Brut- und Fortpflanzungszeit. Die zeitliche Abdeckung ist Teil der hohen Vermeidungswirksamkeit und aus fachlicher Sicht ein Vorteil im Vergleich zu anderen Abschaltmaßnahmen. In den gesetzlichen Regelungen sollte eine Festlegung ergänzt werden, wonach die zeitliche Abdeckung der artspezifischen sensiblen Phasen im Jahresverlauf gewährleistet sein muss, damit die Vermeidungswirksamkeit des AKS voll zum Tragen kommt.

KNE (2024f) enthält eine Übersicht über die im Jahresverlauf relevanten Phasen. Beginn und Ende dieser Phasen können regional angepasst werden. Für einzelne Arten (z. B. Seeadler) ist ein ganzjähriger Betrieb vorzusehen. Zur Orientierung für die zeitliche Abdeckung im Jahresverlauf können die Hauptbrutzeiten nach Südbeck et al. (2025) dienen. Sie sind in Tab. 10 im Anhang aufgeführt.

Die Klarstellung der vermeidungswirksamen Betriebszeit würde einen Bezugspunkt für einen im Einzelfall zu rechtfertigenden verringerten Maßnahmenumfang (hier: Verringerung der Laufzeit eines AKS pro Tag/Woche/Monat oder Jahr) bieten.

Soll zum Beispiel der Maßnahmenumfang (hier: Zeitliche Abdeckung im Jahresverlauf oder Beschränkung der täglichen Betriebsstunden) aus Gründen der Zumutbarkeit eingeschränkt werden, muss beurteilt werden, ab wann die Vermeidungswirksamkeit nicht mehr vollständig gegeben ist. Eine Reduzierung der zeitlichen Abdeckung würde in Verfahren nach § 6 WindBG mit einer jährlichen Zahlung von 450 €/MW einhergehen.

Dasselbe gilt für Überlegungen zur „Budgetierung“ oder „Kontingentierung“ von Abschaltzeiten durch Reduzierung der Betriebszeiten eines AKS. Auch hier müsste begründet werden können, um wieviel die Betriebszeit maximal reduziert werden kann, ohne dass die Vermeidungswirksamkeit am Standort substantiell eingeschränkt ist und das Schutzniveau sinkt.

6.3 Anwendung und Einsatzbereiche von AKS

Anlage 1 Abschnitt 2 sowie die Begründung in Drucksache 20/2354 (S. 32) lassen nicht erkennen, ob eine bestimmte Schutzmaßnahme zu bevorzugen ist. Vielmehr seien sie – artspezifische Wirksamkeit vorausgesetzt – gleichrangig. Lediglich bei der phänologiebedingten Abschaltung wird klargestellt, dass diese Maßnahme „das letzte Mittel“ sein sollte und nur in Betracht kommt, sofern andere Maßnahmen nicht verfügbar sind.

Aus fachlicher Sicht ist jedoch anzumerken, dass die aufgeführten Maßnahmen (etwa tagesweise Bewirtschaftungsabschaltung während der Brutzeit) im Hinblick auf die Wirksamkeit einer Risikosenkung für ein Brutpaar schon allein wegen der geringeren Spezifität und der begrenzten zeitlichen Abdeckung für das Brutpaar eine geringere Wirksamkeit aufweist, als AKS dies tun. AKS und Bewirtschaftungsabschaltung sollten aufgrund ihrer unterschiedlichen Wirksamkeit für Brutpaare nicht alternativ zueinander sein.

Da AKS kein „ubiquitäres Mittel“ sind, sollte klargestellt werden, in welchen Einzelfällen AKS als hochwirksame Maßnahme bevorzugt zum Einsatz kommen sollten, nämlich

- zum Schutz von Adlerarten (Seeadler, Fischadler und insbesondere Schreiadler),
- zum Schutz von Brutpaaren, wenn der geplante WEA-Standort im zentralen Prüfbereich im unteren Drittel des Abstandsradius liegt⁴⁸, oder wenn im zentralen Prüfbereich mindestens drei Brutpaare mit signifikant erhöhtem Tötungsrisiko nachgewiesen sind.

6.4 Nicht-Verfügbarkeit von AKS

Ein Grund, für das Maßnahmenkonzept kein AKS vorzusehen und auf andere Maßnahmen auszuweichen, ist die Nicht-Verfügbarkeit. Nach BMWK u. BMUV (2023, S. 12) sind geeignete Minderungsmaßnahmen nicht verfügbar, „wenn sie aus tatsächlichen Gründen nicht durchführbar sind“. Wann dieser Fall bei AKS eintritt, wurde bisher noch nicht definiert. Zum Teil wurden Kostengründe, aber auch die Nicht-Lieferbarkeit als Grund angegeben. Aus Sicht des Forschungsnehmers könnte in Bezug auf AKS nachgeschärft werden. „Die Nicht-Verfügbarkeit eines AKS ist gegeben, wenn der Antragsteller eine schriftliche Bestätigung des Anbieters vorlegen kann, dass ein System oder Komponenten davon nicht zum angefragten Zeitpunkt (spätestens zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme) bereitgestellt werden kann.“

⁴⁸ Im Falle des Rotmilans hieße dies, dass ein AKS eingesetzt werden sollte, wenn der Abstand von 750 m unterschritten wird.

7 Beauflagung von AKS in der Genehmigung

Für die Beauflagung von Schutzmaßnahmen muss der Behörde ein prüffähiges standortbezogenes Maßnahmen- oder Abschaltkonzept vorgelegt werden. Im Kontext der AKS-Beauflagung wird hierfür im Folgenden der Begriff **Abschaltkonzept** verwendet.

Das Konzept soll alle prüfrelevanten Informationen bündeln, die für die Beurteilung benötigt werden, ob die Vermeidungswirksamkeit dieser Schutzmaßnahme gegeben ist. Denn die grundsätzliche Anerkennung der Wirksamkeit eines Systems entbindet die Behörde nicht von der Prüfung der Vermeidungswirksamkeit im Einzelfall.

7.1 Abschaltkonzept für nachweislich wirksame Systeme

Soll ein nachweislich wirksames System beauflagt werden, muss im Genehmigungsfall keine erneute Erprobung oder Validierung durchgeführt werden. Es genügt, wenn plausibel dargelegt werden kann, dass die **Übertragbarkeit** der im Rahmen der Validierung attestierten Schutz- oder Gesamtrate gegeben ist und diese auch unter den am Einsatzstandort herrschenden Bedingungen erreicht werden kann (vgl. Kapitel 7.2.1). Die Ausführungen zur Übertragbarkeit sind Bestandteil des Abschaltkonzepts. Es setzt sich aus den in Tab. 8 genannten Bausteinen zusammen.

Tab. 8: Inhalte eines standortbezogenen Abschaltkonzepts (eigene Zusammenstellung)

Inhalt/Bausteine	Beschreibung (Stichworte)
Technische Informationen	Systembezeichnung und Version. Hinweis auf Prüfbericht „Technische Sicherheit“ (Hard- und Software; Schnittstellen). Kennzeichnen etwaiger Abweichungen gegenüber der validierten Systemversion und -konfiguration.
Leistungskennwerte der Detektion	Erfassungs- und Erkennungsrate bis 2024 nach Bruns et al. (2021); KNE (2021); ab 2025: Gesamtrate bzw. Schutzrate (nach MEKUN u. LfU SH (2024) und Fortschreibungen ⁴⁹).
Übertragbarkeit (Einflussanalyse)	Einflussanalyse und Erklärung der Übertragbarkeit: Einflussfaktoren am Einsatzstandort im Vergleich zum Erprobungsstandort (Erörterung und gutachtliche Beurteilung). Weitere Erläuterungen siehe Kapitel 7.2.1
Räumliche Abdeckung (GIS-Analyse)	Festlegung der Systemposition; Ergebnisse einer GIS-basierten Sichtfeldanalyse (Karte/Grafik). Weitere Erläuterungen siehe Kapitel 7.2.2
Zeitliche Abdeckung (Betriebszeiten)	Angabe der Dauer des tages- und jahreszeitlichen Betriebs (Beginn, Ende) ⁵⁰ .
Sicherung des Betriebs	Inhalt und Umfang der in einem Betriebs-Handbuch zu dokumentierenden funktions- und leistungsrelevanten Parameter und Veränderungen (Inbetriebnahme, Ausfall, Fehlerbehebung und Fehlerprävention, Softwareupdates. Weitere Erläuterungen siehe Kapitel 7.2.3

⁴⁹ Zur **Gesamt- und Schutzrate** siehe Kapitel 2.2.5 sowie in Tab. 1 (Gegenüberstellung)

⁵⁰ Der jahreszeitliche Betrieb sollte sich an den **Hauptzeiten der Brut- und Fortpflanzungsperiode** kollisionsgefährdeter Arten orientieren (vgl. KNE 2024f).

Inhalt/Bausteine	Beschreibung (Stichworte)
Dokumentation und Kontrolle	Nachweis der Systemaktivität („heart beat“), Form und Inhalt von Abschaltprotokollen (z. B. Tabellen/Grafiken)

7.2 Erläuterungen

Um die Vermeidungswirksamkeit über den gesamten Betriebszeitraum der WEA zu gewährleisten, sind eine Reihe von Festlegungen erforderlich. Die erforderlichen Angaben sollten im Abschaltkonzept plausibel hergeleitet und begründet sein. Im Folgenden werden ausgewählte Inhalte erläutert.

7.2.1 Einflussanalyse und Erklärung der Übertragbarkeit

Durch eine Einflussanalyse soll untersucht werden, inwieweit die Einflussfaktoren, die zur Gesamt- bzw. Schutzrate geführt haben, mit denen am Einsatzstandort übereinstimmen. Relevante Einflussfaktoren für die Gesamt- bzw. Schutzrate im Erfassungsbereich können sein:

- Habitatausstattung
- Sichtverstellende Elemente
 - Einzelbäume, Hecken, Waldränder
 - andere WEA, Türme, Freileitungsmasten
- Topografie
- Mögliche Störquellen und Maskierungen

7.2.2 Sichtfeldanalyse am Standort

Im Rahmen einer Systemerprobung wird eine Sichtfeldanalyse durchgeführt. Die daraus ermittelte Abdeckungsrate wird zu Dokumentationszwecken aufgenommen (vgl. MEKUN u. LfU SH 2024, S. 36). Sie repräsentiert einen wichtigen Einflussfaktor und ist Voraussetzung für die Beurteilung der Übertragbarkeit der ermittelten Raten auf andere Standorte.

Auch am Einsatzstandort muss die Abdeckungsrate ermittelt werden. Eine bestimmte Methode ist dafür bisher nicht vorgegeben. Es erscheint aus fachlicher Sicht gerechtfertigt, für die Sichtfeldanalyse im Erfassungsbereich einheitlich eine GIS-Analyse mit Daten digitaler Geländemodelle durchzuführen. Als Datengrundlage kommen in Frage:

- Eine Kombination von digitalen Orthofotos (DOP) und digitalen Oberflächenmodellen (DOM) oder
- die Nutzung bildbasierter digitaler Oberflächenmodelle (bDOM)

Digitale Oberflächenmodelle (DOM bzw. bDOM) schließen Höhendaten der Vegetation und von Bauwerken ein. Somit können diese Objekte auch in die Analyse einbezogen werden. Die Daten können über das Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG) oder die Vermessungsverwaltungen der Bundesländer bezogen werden.

Ist die Abdeckung nicht optimal, können Positionierung bzw. die Konfiguration der Systemkomponenten optimiert werden. Zum Beispiel kann eine Erhöhung der Kamera- bzw. Antennenanzahl, eine Überlappung der Kamerawinkel oder die Anpassung der Kameraausrichtung Abhilfe schaffen (KNE 2019, S. 14).

7.2.3 Betriebs-Handbuch und Inbetriebnahme-Protokoll

Der ordnungs- bzw. bestimmungsgemäße Betrieb des AKS während der WEA-Laufzeit ist eine zentrale Voraussetzung für die Vermeidungswirksamkeit der Maßnahme. Es erscheint sinnvoll, alle technischen Fragen des sicheren und zuverlässigen Betriebs in einem Betriebs-Handbuch zu dokumentieren. Das Abschaltkonzept sollte das Führen eines solchen Handbuches vorsehen.

Bei Inbetriebnahme des AKS sollte ein **Inbetriebnahme-Protokoll** (vgl. MEKUN u. LfU SH 2024, S. 41) erstellt werden, dass die ordnungsgemäße Funktion der Systemkomponenten attestiert. Dieses Protokoll dient als Referenz für die fortlaufende Dokumentation im weiteren Betriebsverlauf und als Nachweis der auflagenkonformen Umsetzung gegenüber der Behörde. Das „**Inbetriebnahme-Protokoll**“ ist der Genehmigungsbehörde vorzulegen. Zu dokumentieren sind folgende Angaben und Regelungen:

- Positionierung und Kalibrierung des AKS,
- Fehlerprävention,
- Wartungsintervalle,
- Rückfalloptionen bei ungeplanten Ausfällen des Systems.

Im Betriebs-Handbuch ist zu vermerken, ob und wenn ja welche technischen Änderungen, die Einfluss auf die Leistung des Systems haben, vorgenommen wurden. Hierzu gehören der Austausch von Hardware-Komponenten (Kamera-Konfiguration, Rechner und Datenspeicherung) sowie Softwareupdates und Veränderungen der Voraussetzungen für automatisierten Abschaltprozesse. Die Behörde ist über technische Änderungen und ihre Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit des Systems zu informieren. Ein Nachweis, dass sich die Leistungsfähigkeit des Systems nicht verschlechtert, kann unter Umständen durch eine statistische Einflussanalyse erbracht werden.

7.3 Nachweis im Testbetrieb

Antikollisionssysteme, deren Wirksamkeit noch nicht belegt ist, können im Einzelfall im Testbetrieb angeordnet werden, wenn begleitende Maßnahmen zur Erfolgskontrolle angeordnet werden (Anlage 1 Abschnitt 2 zu § 45b BNatSchG).

Die Option den Wirksamkeitsnachweis im Testbetrieb zu erbringen, birgt Risiken. Zum einen verlagert sie das Risiko, ob eine bestimmte Gesamt- oder Schutzrate erreicht wird, in das Genehmigungsverfahren. Die Genehmigung unter Absicherung aller denkbaren Fälle – einschließlich der Erteilung einer Ausnahme für den Zeitraum des Testbetriebs (vgl. Bader et al. 2023) bis zum Nachweis der Wirksamkeit – ist aufwändig. Zudem ist die Formulierung der Auflagen (mit aufschiebender/ auflösender Wirkung) anspruchsvoll, was die Fehleranfälligkeit erhöht. Auch aus Sicht des Forschungsteams ist die Anwendung bereits validierter Systeme, die ihre Leistungsfähigkeit nachweislich dokumentiert haben, die sicherere Variante.

8 Detektion von Bewirtschaftungsereignissen

Im Rahmen des FuE-Projektes sollte geprüft werden, welche Spezifika beim Einsatz technischer Systeme zur Detektion von Bewirtschaftungsereignissen und entsprechender Abschaltsteuerung zu beachten sind und inwieweit die Erfahrungen bei der Erprobung von AKS übertragen werden können.

8.1 Rechtlicher Hintergrund (Neugenehmigungen)

Die vorübergehende Abregelung (Abschaltung) bei landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsereignissen gehört zu den in Anlage 1 Abschnitt 2 zu § 45b 1 bis 5 BNatSchG genannten fachlich anerkannten und wirksamen Schutzmaßnahmen. Der Umfang der Maßnahme wurde gegenüber den im Positionspapier der LAG VSW (2017) formulierten Empfehlungen deutlich reduziert.

Sie wird nach aktueller Rechtslage erforderlich, wenn zwischen dem 1. April und 31. August auf Flächen, die in weniger als 250 Metern Entfernung vom Mastfußmittelpunkt einer Windenergieanlage gelegen sind, Grünland gemäht, Feldfrüchte geerntet oder gepflügt wird⁵¹. Der Umfang der Abschaltung – hier: Anzahl der Flurstücke, auf denen eine Bewirtschaftung zur Abschaltung führt – unterliegt der Zumutbarkeit. Unter den Zumutbarkeitsgrenzen kann es also vorkommen, dass eine Bewirtschaftung nicht auf allen im Radius liegenden und theoretisch abschaltrelevanten Flurstücken auch zu einer Abschaltung führt.

Die Abschaltmaßnahmen sollen von Beginn des Bewirtschaftungsereignisses bis mindestens 24 Stunden nach Beendigung des Bewirtschaftungsereignisses jeweils von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang andauern. (ebd.) In besonderen Fällen (Betroffenheit von mehr als drei Brutvorkommen oder zwei Brutvorkommen einer besonders gefährdeten Vogelart) soll die Abschaltzeit 48 Stunden betragen. Die Maßnahme ist insbesondere für Rotmilan und Schwarzmilan, Rohrweihe, Schreiadler sowie den Weißstorch wirksam (ebd.).

Neben der Anwendung in Neugenehmigungen kann es Anwendungsfälle für Bewirtschaftungsdetektion im Rahmen von Änderungsgenehmigungen geben. In diesen Fällen ist es möglich, dass eine Software eingesetzt werden muss, die mehr als die oben genannten Bewirtschaftungsarten als relevant klassifiziert.

Die Betrachtung der Einsatzmöglichkeiten von Detektionssystemen bezieht sich im Folgenden auf Neugenehmigungen, für die die oben skizzierten Regelungen gelten.

8.2 Detektion landwirtschaftlicher Ereignisse und Abschaltsteuerung

Der Vollzug der Schutzmaßnahme Bewirtschaftungsabschaltung kann mit Unsicherheiten und erhöhtem Aufwand verbunden sein. Der Betreiber muss über die Bewirtschaftung in Kenntnis gesetzt werden. Damit ist er für den Vollzug der Auflage auf die Kooperationsbereitschaft der Bewirtschafteter angewiesen. In der Vergangenheit wurden vertraglichen Vereinbarungen geschlossen, die die rechtzeitige Meldung einer Bewirtschaftung sicherstellen sollten.

Der Einsatz technischer Hilfsmittel zur Überwachung etwaiger Bewirtschaftungsaktivitäten im 250 Meter-Radius erleichtert die zuverlässige Maßnahmenumsetzung. Die Betreiber sind

⁵¹ Im Vergleich zum Spektrum der Bewirtschaftungsformen, wie sie in einzelnen Länderleitfäden genannt sind, nehmen die Regelungen nach § 45b BNatSchG eine Eingrenzung vor. Dies erscheint vor dem Hintergrund der Deckelung des Abschaltumfangs im Zuge der Zumutbarkeitsberechnung konsequent.

nicht mehr auf die rechtzeitige Meldung der Bewirtschafter angewiesen. Die Behörde kann von einer zuverlässigeren Umsetzung ausgehen. Zudem können Nachweise über die auflagenkonforme Abschaltung (Protokolle) erstellt werden, die die Überprüfung erleichtern.

8.2.1 Komponenten der Detektion

Als technische Hilfsmittel für die Überwachung kommen bis dato optische Systeme (Überwachungskameras, Infrarot-Kameras) und GPS-Tracker in Frage. Diese Hilfsmittel sind bereits verfügbar bzw. können auf den Anwendungsbereich „Bewirtschaftungsdetektion“ mit verhältnismäßigem Aufwand angepasst werden. Einen ersten Überblick über das Angebot und den Entwicklungsstand liefert die Systemübersicht (KNE 2024b).

Die **Überwachung** der relevanten Flächen im Radius zur Erfassung der Bewirtschaftungsereignisse kann automatisiert erfolgen. Sie muss sich nur auf die festgelegten Flächen beziehen. Die optische Erfassung von Bewirtschaftungsereignissen ist aufgrund der Größe der Objekte (Traktoren, Erntemaschinen) im Vergleich zu einzelnen Vogelindividuen im Flug und aufgrund des eingegrenzten Flächenbezugs wesentlich einfacher. Insofern dürfte die Erfassung unter der Voraussetzung der Einsehbarkeit der Flächen im fraglichen Radius eine technisch lösbare Herausforderung sein.

Zur Erfassung der Bewirtschaftung eignen sich **leistungsfähige Kameras**, wie sie sich bereits in anderen Anwendungsfeldern der Überwachung bewährt haben (sogenannte Industriekameras). Sie können an der WEA angebracht oder am Boden (erhöht) so positioniert werden, dass sie tagsüber eine nahezu vollständige Erfassung aller Ereignisse auf den designierten Flurstücken innerhalb des erforderlichen 250-Meter-Radius gewährleisten. Das Risiko, dass Maschinen und Geräte „übersehen“ werden, dürfte deutlich geringer sein als bei der Vogeldetektion (vgl. Tabelle 9). Nicht relevante Flurstücke und öffentliche Flächen (Wege) können ausgeblendet (verpixelt) werden. Neben Kameras kommen auch andere Lösungen wie **GPS-Tracker** in Frage.

Damit die Vermeidungswirksamkeit zuverlässig gegeben ist, muss die Zuverlässigkeit der Erfassung von Bewirtschaftungsvorgängen hoch sein. Die **Erfassungsrates** für Bewirtschaftungsvorgänge sollte nahe 100 Prozent (99,0 Prozent) liegen, damit die relevanten Vorgänge auf der begrenzten Zahl von Flurstücken nicht übersehen und die Abschaltung zeitgerecht ausgelöst werden kann.

Die Erfassung und Unterscheidung relevanter von nicht relevanten Bewirtschaftungsereignissen (**Klassifizierung**) ist hingegen komplexer. Es muss nicht nur die Bewirtschaftungsart (anhand der zur Bewirtschaftung eingesetzten Maschinen, hier vor allem Traktoren plus Gerät, Erntemaschinen, Mähdrescher) erfasst werden. Ein relevantes Ereignis ist auch durch einen zeitlichen Verlauf und/oder ein bestimmtes Bewegungsmuster von Maschinen auf einer Fläche gekennzeichnet. Nach derzeitigem Kenntnisstand bietet die Aufnahme und Bereitstellung von aussagekräftigem Bildmaterial die besten Voraussetzungen für die Unterscheidung von Bewirtschaftungsereignissen. Über die „Trennschärfe“ von GPS-Daten und Infrarot-Aufzeichnungen liegen noch keine Erfahrungen vor.

Für die Klassifizierung anhand von Bildmaterial wird eine Bildauswertungssoftware eingesetzt. Über den bei der Klassifizierung relevanter Ereignisse erreichten Entwicklungsstand liegen noch keine Nachweise vor. Nach Auskunft der Systemanbieter sei eine KI-basierte **Klassifizierungssoftware** in der Entwicklung, die mit Hilfe neuronaler Netze trainiert werde, um zu verlässlichen Ergebnissen zu kommen. Wenn auch nach Klassifizierung mehr Ereignisse gemeldet

werden als rechtlich relevant sind, ist das bei manueller Kontrolle und manueller Abschaltung kein Problem. Die Sichtkontrolle kann an dieser Stelle Schwächen softwaregestützter Klassifizierung ausgleichen. Ist hingegen eine automatische Abschaltung (ohne Kontrolle durch den Menschen; „autonomer Betrieb“) geplant, wird es aus Betreibersicht bei der Klassifizierung auf eine geringe **Falsch-Positiv-Rate** ankommen, damit Fehlabschaltungen reduziert bzw. vermieden werden.

Die **Abschaltung** kann als Reaktion auf ein relevantes Bewirtschaftungsereignis

- manuell durch Personen (Betriebsführung) oder
- automatisiert mittels Abschaltsignal über eine Schnittstelle erfolgen.

Der Abschaltvorgang selbst stellt offenbar kein Problem dar, zumal er im Vergleich zum AKS-Einsatz weniger häufig stattfinden dürfte und es nicht auf eine möglichst schnelle Reduzierung der Rotordrehzahl ankommt.

Sieht das Abschaltkonzept eine **manuelle Abschaltung** auf Basis einer Relevanzentscheidung des Betriebsführungspersonals vor, können technische Hilfsmittel eingesetzt werden, die aufgrund ihrer technischen Eigenschaften eine nahezu vollständige Erfassung aller Ereignisse erwarten lassen. Ist hingegen eine autonome **Abschaltsteuerung** vorgesehen, entfällt die Kontrolle durch Betriebsführungspersonal. Es muss also sichergestellt sein, dass die Erfassung, Klassifizierung alle relevanten Ereignisse abbildet und für eine zuverlässige Steuerung der Abschaltzeiten sorgt. Hierfür sind entsprechende Nachweise erforderlich.

8.2.2 Nachweis der Wirksamkeit automatisierter Bewirtschaftungsabschaltung

Hier kommt es auf den Nachweis an, dass Erfassung und Klassifizierung (Relevanz) der Bewirtschaftungsarten mit hoher Wahrscheinlichkeit zutreffen und die Abschaltung auslösen. In Tab. 9 sind einige wichtige Merkmale aufgeführt, in denen sich die Bewirtschaftungsabschaltung und Antikollisionssysteme unterscheiden. Zum Beispiel werden die Anforderungen an die Durchführung von Feldversuchen und die Datengewinnung bei Bewirtschaftungsabschaltung abweichen. Es wird zu klären sein, ob es für das Training der Klassifizierungssoftware ausreicht, synthetische Bilder von Traktoren und Maschinen zu verwenden oder ob es erforderlich ist, Bildmaterial von natürlichen Bewirtschaftungssituationen zu verwenden. Ob es bedeutsam ist, dass ein Bewirtschaftungsereignis nicht allein anhand einzelner Bilder, sondern durch Bildsequenzen charakterisiert ist, wird zu untersuchen sein.

Wie bereits oben erwähnt, sind geeignete Softwarelösungen noch in der Entwicklung.

Tab. 9: Vogel- und Bewirtschaftungsdetektion: Unterschiede

Merkmal	Bewirtschaftungsabschaltung	Antikollisionssystem
Gegenstand der Erfassung	Traktor-Maschinenkombination (größeres Objekt, Erfassungsbereich 250 m Radius plus Puffer) Bewirtschaftungsvorgang (Bildsequenz)	Individuum einer Zielart (kleines Objekt, Erfassungsbereich von 300 bis max. 1000 m) Position im Luftraum (Entfernung) Flugweg und -richtung (Bildsequenz; Track)
Erfassungsbereich	Objekt auf vordefinierter Fläche (2 D) im 250-m Radius;	Objekt im Luftraum (3 D); Abstand meist > 250 m
Abschaltsteuerung	Derzeit vorwiegend manuell. Automatische Detektion und Abschaltsteuerung wird angestrebt.	Automatische Detektion und Abschaltsteuerung.
Abschalthäufigkeit	Einmalige Abschaltung pro Bewirtschaftungsvorgang im 250 m Radius. Häufigkeit pro Gesamtzeitraum abhängig von der Flurstücksstruktur.	Mehrmalige Abschaltungen pro Tag für jeweils kurze Zeit. Häufigkeit abhängig von der Flugaktivität der Zielarten.
Abschaltsteuerung	Manuell: Stand der Technik. In diesem Fall ersetzt das Detektionssystem die herkömmliche Meldung. Die Detektion wird durch eine Person verifiziert. Für diesen Anwendungsfall ist eine Erprobung nicht zwingend erforderlich. Automatisch: Noch nicht Stand der Technik. Hierfür wären Erprobung sowie Validierungs- und Zertifizierungsnachweise für die Systeme erforderlich.	Automatisch: Stand der Technik. Erprobung und Validierung von AKS für den Wirksamkeitsnachweis erforderlich. Prüfberichte einer unabhängigen Institution (hier: TÜV) sind Grundlage der „grundsätzlichen“ Anerkennung als Voraussetzung für die Anwendung in der Genehmigung

Die Anforderungen für die Erprobung/Validierung und Zertifizierung von AKS (vgl. MEKUN u. LfU SH 2024) können als Ausgangspunkt für die Überlegungen zur Anerkennung von Systemen für die automatische Bewirtschaftungsabschaltung dienen. Es dürfte jedoch Anpassungsbedarf geben, so dass die Vorgaben zur Erprobung (Durchführung der Feldstudie), Datenermittlung und -auswertung Schritt für Schritt geprüft werden sollten. Die Entwicklung der eingesetzten Software zur Klassifizierung der die Abschaltung auslösenden Bewirtschaftungsereignisse muss – wie im Falle der AKS – nachvollziehbar dokumentiert sein. Es kann angenommen werden, dass hierfür eine unabhängige technische Prüfinstanz benötigt wird.

9 Fazit, Ausblick und Forschungsfragen

Das Forschungsprojekt fiel in eine Phase der substanziellen Änderung von Rechtsvorschriften (§ 45 b BNatSchG, § 6 WindBG sowie Entwürfe zur Umsetzung der RED III-Richtlinie) zur artenschutzrechtlichen Signifikanzprüfung und Beauftragung von Schutzmaßnahmen. Dies hat zu einiger Unsicherheit darüber geführt, welche Relevanz welche Schutzmaßnahmen in welchen Verfahren zukünftig haben würden. Auch die parallel verfolgte Entwicklung einer Verordnung zur Einführung eines probabilistischen Modells für die Signifikanzprüfung hat in Verbindung mit einer Schwellenwertsetzung vielfach die Frage aufgeworfen, ob und in welchen Fällen Schutzmaßnahmen noch zu rechtfertigen sind. AKS sind darüber hinaus in besonderem Maße von wirtschaftlichen Restriktionen (Zumutbarkeitsbeschränkungen) betroffen. Diese Aspekte haben dazu beigetragen, dass die Anwendung des anerkannten Systems in Genehmigungen wie auch weitere Wirksamkeitsnachweise bisher nur zögerlich erfolgt ist.

Geht man davon aus, dass die Abschaltung von WEA das Kollisionsrisiko vermindert, bleibt festzuhalten, dass AKS aufgrund der differenzierten, bedarfsgerechten Abschaltsteuerung eine wirkungsvolle und zugleich effiziente Schutzmaßnahme sind. Sie sind besonders für Konstellationen geeignet, in denen der Schutz seltener und gefährdeter Adlerarten im Vordergrund steht oder eine besonders geringe Distanz zwischen Brutplatz und WEA besteht. Der Forschungsnehmer empfiehlt, die gesetzlichen Regelungen um die spezifischen Konstellationen, in denen AKS bevorzugt einzusetzen sind, zu erweitern.

Mit dem „**Prüfrahmen AKS Schleswig-Holstein**“ wurden die bisherigen Anforderungen erweitert und fortgeschrieben. Der Forschungsnehmer empfiehlt, an den damit weiterentwickelten Stand des Wissens anzuknüpfen. Systemanbieter sollten sich für den Wirksamkeitsnachweis bundesweit daran orientieren. Im Interesse einer standardisierten Anerkennung sollte eine bundeseinheitliche Regelung an den Prüfrahmen anknüpfen.

Die erstmaligen Anerkennungsvoraussetzungen sind erfüllt, wenn durch Erprobung eine mittlere Gesamt- oder Schutzrate nachgewiesen ist, die innerhalb eines bestimmten Konfidenzintervalls liegt. Die für die Erprobung notwendige Feldstudie und die Datenauswertungen sollten durch unabhängige Gutachter durchgeführt werden. Die Ergebnisse müssen durch einen Prüfbericht einer unabhängigen technischen Institution bestätigt werden. Erst wenn ein solcher Prüfbericht vorliegt, kann davon gesprochen werden, dass das System als wirksam anerkannt ist. Um Missverständnisse über den Status der Validierung und Überprüfung der Nachweise zu vermeiden, schlägt der Forschungsnehmer vor, eine Plattform auf Bundesebene zu etablieren. Alle Systeme, die dort aufgeführt sind, können als anerkannt gelten. Zur Klarstellung der Relevanz einer solchen Plattform (formelle Bedeutung) sollte der Gesetzgeber eine entsprechende Regelung treffen.

Mit Blick auf den **weiteren Forschungsbedarf** empfiehlt der Forschungsnehmer, die im Kontext der Begrenzung von Ertragsverlusten aufgeworfenen Fragestellungen aufzugreifen. Ziel sollte es sein, Ertragsverluste weiter zu verringern, ohne dass das Schutzniveau durch eine bedarfsgerechte Abschaltung sinkt. Neben der Option, den Reaktionsbereich zu verkleinern, sollte untersucht werden, wie sich die Rotordrehzahl auf das Kollisionsrisiko einzelner Arten auswirkt und ob ggf. eine Drosselung der Rotordrehzahl ausreicht, um Risiken zu vermindern.

Des Weiteren sollten die Potenziale von optischen Detektionssystemen zur Erforschung des Flugverhaltens von Groß- und Greifvögeln genutzt werden. Mit leistungsfähigen Kamerasystemen kann zum Beispiel das Meide- bzw. Ausweichverhalten tagaktiver kollisionsgefährdeter

Arten im Rotorbereich bzw. bei Annäherung untersucht werden. Geeignet sind besonders solche Systeme, die eine sichere Positionsbestimmung des Vogels im Raum gewährleisten, so dass eine räumlich präzise Aufzeichnung der Flugtracks im Rotorbereich und dessen Umfeld möglich ist.

Literaturverzeichnis

- Bader, K., Deiler, L.-S., Dietrich, E. (2023): Genehmigungsrahmen für Windenergieanlagen mit Antikollisionssystemen. NVwZ - Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht 42 (11). S. 803-809.
- Ballester, C., Dupont, S.M., Corbeau, A., Chambert, T., Duriez, O., Besnard, A. (2024): A standardized protocol for assessing the performance of automatic detection systems used in onshore wind power plants to reduce avian mortality. Journal of Environmental Management 354 (120437). S. 1-10. https://www.researchgate.net/publication/378489411_A_standardized_protocol_for_assessing_the_performance_of_automatic_detection_systems_used_in_on-shore_wind_power_plants_to_reduce_avian_mortality (letzter Zugriff: 26.05.2025).
- BioConsult SH GmbH (2023): Ergebnisbericht Pilotstudie Bioseco Kamerabasiertes Antikollisionssystem Artenschutzfachliche Bewertung. BioConsult SH GmbH & Co KG, Husum. 46 S. https://www.energy-consult.net/wp-content/uploads/Publish_BioConsult_SH_Ergebnisbericht_Bioseco.pdf (letzter Zugriff: 21.08.2024).
- BMUV u. BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz; Bundesministerium für Umwelt Naturschutz nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023): Vollzugsempfehlung zu § 6 Windenergieflächenbedarfsgesetz. 18 S. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/V/vollzugsleitfaden-6-windbg.pdf?blob=publicationFile&v=4> (letzter Zugriff: 02.10.2024).
- Bruderer, B. u. Boldt, A. (2001): Flight characteristics of birds: I. Radar measurements of speeds. Ibis 143 (2). S. 178-204. https://www.researchgate.net/publication/227621013_Flight_characteristics_of_birds_I_Radar_measurements_of_speeds (letzter Zugriff 21.07.2025).
- Bruns, E., Schuster, E., Streiffeler, J. (2021): Anforderungen an technische Überwachungs- und Abschaltssysteme an Windenergieanlagen. Abschlussbericht der Workshopreihe „Technische Systeme“. BfN-Skripten 610. 58 S. <https://www.bfn.de/publikationen/bfn-schriften/bfn-schriften-610-anforderungen-technische-ueberwachungs-und> (letzter Zugriff 21.07.2025).
- BfN – Bundesamt für Naturschutz (2024): Vermeiden oder Lenken: Raumnutzungsverhalten von Milanen in der Nähe von Windparks. PraxisINFO 9. Bonn. 4 S. https://www.natur-und-erneuerbare.de/fileadmin/Daten/Download_Dokumente_bf/BfN_PraxisINFO_9_Lenkungsmassnahmen_Rotmilan.pdf (letzter Zugriff: 26.03.2025).
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (2024): Digitale Orthophotos und Satellitenbilddaten (bund.de). <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/digitale-orthophotos.html> (letzter Zugriff: 06.08.2024).
- EolDist (2021): EolDist web application. <https://shiny.cefe.cnrs.fr/eoldist/> (letzter Zugriff: 01.10.2024).
- FA Wind – Fachagentur Windenergie an Land e.V. (2022): Artenschutzrechtliche Zumutbarkeit und Höhe der Zahlung bei Ausnahme für Windenergieanlagen – Anwendungshilfe zur Anlage 2 Bundesnaturschutzgesetz. Kurzinformation. Berlin. 7 S. https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Natur-und_Artenschutz/Anwendungshilfe_zum_BNatSchG/FA_Wind_Kurzinformation_Anhang2_BNatSchG_09-2022.pdf (letzter Zugriff: 11.12.2024).
- Fluhr, J., Duriez, O., Tobon Monroy, A. M. (2021): Déterminer les distances de détection minimales des oiseaux pour réduire les risques de collision avec les installations éoliennes. MSH SUD; Centre d'écologie fonctionnelle évolutive. 16 S. fhal-04629072f. https://mape.cnrs.fr/wp-content/uploads/2021/12/Fluhr-Duriez-MAPE-2021-Determiner-les-distances-de-dection-minimales-des-oiseaux-pour-reduire-les-risques-de-collision_0.pdf (letzter Zugriff: 23.07.2025).
- HMUKLV u. HMWEVW (Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz; Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen) (2020): Verwaltungsvorschrift (VwV) "Naturschutz/Windenergie", Wiesbaden.

- Hoffmann, J. u. Weiss, A. (2024): Zulässigkeit der Zumutbarkeitsberechnung für Schutzmaßnahmen zur Abschaltung von Windenergieanlagen und fortlaufende Anpassung des Maßnahmenumfangs nach deren Inbetriebnahme bei der Anwendung von § 45b BNatSchG und § 6 WindBG. Kurzgutachten. <https://www.naturschutz-energiewende.de/publikationen/zulaessigkeit-der-zumutbarkeitsberechnung-fuer-schutzmassnahmen-zur-abschaltung-von-windenergieanlagen-und-fortlaufende-anpassung-des-massnahmenumfangs-nach-deren-inbetriebnahme-bei-der-anwendung-von/> (letzter Zugriff 21.07.2025).
- KNE – Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (2019): Anforderungen an eine fachlich valide Erprobung von technischen Systemen zur bedarfsgerechten Betriebsregulierung von Windenergieanlagen. 33 S. https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/KNE-Anforderungsprofil_an_eine_valide_Erprobung_von_technischen_Systemen_2019.pdf (letzter Zugriff: 16.09.2024).
- KNE – Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (2021): Anforderungen an Antikollisionssysteme zum Schutz von Vögeln an Windenergieanlagen – Checkliste für eine qualifizierte Entscheidung über die Anwendbarkeit von Antikollisionssystemen. 14 S. https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/KNE-Checkliste_Antikollisionssysteme_2021_06.pdf (letzter Zugriff: 22.07.2024).
- KNE – Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (2024a): KNE-Antwort 364 - zur Funktion und Einsatz von Laser Rangefindern. <https://www.naturschutz-energiewende.de/fragenundantworten/funktion-und-einsatz-von-laser-rangefindern/> (letzter Zugriff: 14.10.2024).
- KNE – Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (2024b): Systemübersicht – Detektionssysteme zur ereignisbezogenen Abschaltung von Windenergieanlagen zum Schutz von tagaktiven Brutvögeln. 40 S. <https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/KNE-Synopse-Detektionssysteme-zur-ereignisbezogenen-von-Windenergieanlagen.pdf> (letzter Zugriff: 01.10.2024).
- KNE – Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (2024c): Einsatz von Antikollisionssystemen unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Zumutbarkeit. Aktualisierte und ergänzte Fassung. Berlin. 36 S. <https://www.naturschutz-energiewende.de/fachwissen/veroeffentlichungen/einsatz-von-antikollisionssystemen-unter-beruecksichtigung-der-wirtschaftlichen-zumutbarkeit/> (letzter Zugriff: 07.10.2024).
- KNE – Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (2024d): Probabilistik in der Signifikanz-Bewertung. <https://www.naturschutz-energiewende.de/fachwissen/probabilistik-in-der-signifikanzbewertung/> (letzter Zugriff: 15.10.2024).
- KNE – Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (2024e): KNE-Antwort 361 - zur Abschaltung von Windenergieanlagen („Trudelbetrieb“). <https://www.naturschutz-energiewende.de/fragenundantworten/kne-antwort-361-zur-abschaltung-von-windenergieanlagen-trudelbetrieb/> (letzter Zugriff: 15.10.2024).
- KNE – Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (2024f): KNE-Antwort 369 zu Zeiträumen phänologischer Abschaltungen von Windenergieanlagen für kollisionsgefährdete Brutvogelarten. Aktualisierte Antwort vom 22.04.2025. 12 S. <https://www.naturschutz-energiewende.de/fragenundantworten/zeitraeume-phaenologischer-abschaltungen-von-windenergieanlagen-fuer-kollisionsgefaehrdete-brutvogelarten/> (letzter Zugriff: 16.05.2025).
- KNE – Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (2025): Die Vorschriften zur Windenergie an Land im Bundesnaturschutzgesetz 2022. Überblick über die neuen naturschutzrechtlichen Regelungen für die Genehmigung von Windenergieanlagen an Land mit dem Fokus auf die Signifikanz- und Ausnahmeprüfung. Aktualisierung vom 21. März 2025. 32 S. <https://www.naturschutz-energiewende.de/publikationen/die-vorschriften-zur-windenergie-an-land-im-bundesnaturschutzgesetz-2022-aktualisierung/> (letzter Zugriff: 23.07.2025).

- LAG VSW – Länderarbeitsgemeinschaft der staatlichen Vogelschutzwarten in Deutschland (2017): Abschaltung von Windenergieanlagen (WEA) zum Schutz von Greifvögeln und Störchen bei bestimmten landwirtschaftlichen Arbeiten. Staatliche Vogelschutzwarte Schleswig-Holstein, Flintbek. 3 S. <http://www.vogelschutzwarten.de/downloads/2017lagvsw1-1.pdf> (letzter Zugriff: 10.10.2024).
- Mammen, U., Böhm, N., Mammen, K., Uhl, R., Arbeiter, S., Nagl, D., Resetaritz, A., Lüttmann, J. (2023): Prüfung der Wirksamkeit von Vermeidungsmaßnahmen zur Reduzierung des Tötungsrisikos von Milanen bei Windkraftanlagen“. BfN-Schriften 669. BfN – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.), Bonn. 241 S. https://www.natur-und-erneuerbare.de/fileadmin/Daten/Download_Dokumente/01_Skripte/BfN-Schriften-669-WEA-Rotmilan-Lenkungsmassnahmen-2023.pdf (letzter Zugriff: 26.03.2025).
- Masden, E.A., Cook, A.S.C.P., McCluskie, A., Bouten, W., Burton, N.H.K., Thaxter, C.B. (2021): When speed matters: The importance of flight speed in an avian collision risk model. Environmental Impact Assessment Review 90 (106622). S. 8-12. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S019592552100072X> (letzter Zugriff: 01.10.2024).
- MEKUN - Ministerium für Energiewende Klimaschutz Umwelt und Natur des Landes Schleswig-Holstein und LfU - Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2024): Fachkonventionsvorschlag „Prüfrahmen für Antikollisionssysteme“ (Prüfrahmen AKS) - Vollzugshilfe für die Bewertung als fachlich anerkannte (Stand vom 01.07.2024). Kiel. 86 S. <https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/E/eingriffsregelung/Downloads/PruefrahmenAKS.pdf?blob=publicationFile&v=2> (letzter Zugriff: 19.09.2024).
- 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. BioConsult SH GmbH & Co KG, Bionum, Husum. 101 S. https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/Pilotstudie_Erprobung_Probabilistik_Mercker_et_al_2023.pdf (letzter Zugriff 21.07.2025).
- MLUK – Ministerium für Landwirtschaft Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg (2023): Erlass zum Artenschutz in Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen (AGW-Erlass) Anwendung der §§ 45b bis 45d Bundesnaturschutzgesetz sowie Maßgaben für die artenschutzrechtliche Prüfung in Bezug auf Vögel und Fledermäuse in Genehmigungsverfahren von W. Schwerin. 23 S. <https://mluk.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/AGW-Erlass.pdf> (letzter Zugriff: 27.06.2024).
- Reichenbach, M., Reers, H., Greule, S. (2021): Wie gut schützt IdentiFlight den Rotmilan (Milvus milvus)? Untersuchungen zur Wirksamkeit eines Kamerasystems zum Schutz vor Kollisionen an Windenergieanlagen. Endbericht. 147 S. https://www.e3-identiflight.de/wp-content/uploads/2021/11/21-10-07_Wie-gut-schuetzt-IdentiFlight-den-Rotmilan-Milvus-milvus_Abschlussbericht-IdentiFlight.pdf (letzter Zugriff: 30.10.2024).
- Reichenbach, M., Reers, H., Greule, S., Grimm, J. (2023a): IdentiFlight als Schutzmaßnahme für den Seeadler (Haliaeetus albicilla) - Untersuchungen zur Wirksamkeit sowie artenschutzrechtliche Einordnung. ARSU – Arbeitsgruppe für regionale Struktur- und Umweltforschung GmbH. Im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität, OekoFor - Ökologische Datenerfassung und Forschung GbR, Freiburg, Oldenburg. 121 S. https://www.e3-identiflight.de/wp-content/uploads/2023/05/23-05-03_IdentiFlight-als-Schutzmassnahme-fuer-den-Seeadler_Abschlussbericht-IdentiFlight.pdf (letzter Zugriff: 01.10.2024).
- Reichenbach, M., Steinkamp, T., Aschwanden, J., Reers, H., Greule, S., Grimm, J. (2023b): Durchführung von Leistungsnachweisen für Detektionssysteme zur Verminderung von Vogelkollisionen an Windenergieanlagen in Brandenburg Kamera- und Radar-Datenauswertung und gutachterliche Einordnung. ARSU - Arbeitsgruppe für regionale Struktur- und Umweltforschung GmbH, Oldenburg. 1–150 S. https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/Bericht_SystemtestBrandenburg_ARSU_August-2023.pdf (letzter Zugriff: 01.10.2024).

- Reichenbach, M., Greule, S., Steinkamp, T., Reers, H., Akili, J., Roselius, L. (2023c): Fachgutachten zur Ermittlung des Flugverhaltens des Rotmilans im Windparkbereich unter Einsatz von Detektionssystemen in Hessen - Endfassung 11.09.2023. ARSU – Arbeitsgruppe für regionale Struktur- und Umweltforschung GmbH. Im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen. In Kooperation mit OekoFor - Ökologische Datenerfassung und Forschung GbR und e3 GmbH, Oldenburg. 179 S. https://landesplanung.hessen.de/sites/landesplanung.hessen.de/files/2023-09/IDF%20Hessen%20Berichtsendfassung_11-09-2023.pdf (letzter Zugriff: 15.09.2024).
- Reichenbach, M., Reers, H., Greule, S., Grimm, J. (2024): Ausweitung des Zielartenspektrums von IdentiFlight. Methodische Ansätze zur Validierung neuer Versionen des neuronalen Netzes. Gutachten im Auftrag von e3 IDF GmbH. <https://www.e3-identiflight.de/wp-content/uploads/2024/12/IDF-Arterkennung-29-07-2024.pdf> (letzter Zugriff 21.07.2025)
- Schuster, E. (05.03.2024): IdentiFlight als Nebenbestimmung – ein Statusbericht aus der Praxis. Vortrag beim Runden Tisch Artenschutz der Fachagentur Wind und Solar. mdl.
- Steinkamp, T., Mercker, M., Reichenbach, M. (2024): Evaluierung möglicher Anpassungen des Einsatzes von Anti-Kollisionssystemen - Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit und das Schutzniveau. Gutachten im Auftrag des Kompetenzzentrums Naturschutz und Energiewende (KNE). ARSU – Arbeitsgruppe für regionale Struktur- und Umweltforschung GmbH, Oldenburg. 58 S. Unveröffentlicht.
- Steinkamp, T., Reichenbach, M.; Holzmüller, J. (in Vorbereitung): Ertragsverlustberechnungen von anlassbezogenen Abschaltungen zum Schutz kollisionsgefährdeter Vogelarten – Optimierung der Berechnungsmethode und Szenarienbetrachtung. Im Auftrag der e3 IDF GmbH.
- Südbeck, P., Andretzke, H., Fischer, S., Gedeon, K., Pertl, C., Linke, T.J., Georg, M., König, C., Schikore, T., Schröder, K., Dröschmeister, R., Sudfeldt, C. (2025): Methodenstandards zur Erfassung der Brutvögel Deutschlands. 1. überarbeitete Auflage. DDA - Dachverband deutscher Avifaunisten (Hrsg.). Eigenverlag DDA, Münster. 736 S.
- Wulfert, K., Scholz, T., Vaut, L. (2024): Artenschutz und Windenergieausbau - Zumutbarkeit von Schutzmaßnahmen nach Anlage 2 BNatSchG und § 6 WindBG – Analyse von Fallkonstellationen (Stand 27.06.2024). Bosch & Partner GmbH, Berlin. 1–24 S. https://www.boschpartner.de/fileadmin/user_upload/pdf/Aktuelles/240627_Kurzpapier_Zumutbarkeit_Zahlung_aktualisiert.pdf (letzter Zugriff: 18.07.2024).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Erfassungsbereiche für Flugaktivitäten der Zielvogelarten (nach MEKUN u. LfU SH 2024, S. 19)	15
Abb. 2:	Änderung des Kollisionsrisikos in Abhängigkeit von der Anzahl der WEA-Umdrehungen pro Minute (UMIN - x-Achse) und verschiedenen weiteren Variablen (Steinkamp et al. 2024).	27
Abb. 3:	Vorschlag für eine vereinheitlichte Anerkennung von AKS – grundsätzliche Wirksamkeit (KNE, eigene Darstellung)	36
Abb. 4:	Schematische Darstellung der Flächenausdehnung eines zylinderförmigen Reaktionsbereichs (Fall a) im Vergleich zur einer zu den Rotorspitzen ausgerichteten Ellipse (Fall b). Prinzipskizze nach Steinkamp et al. (2024, S. 39, verändert).....	47

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Vergleich der Anforderungen zum Nachweis der Wirksamkeit der Vogelerkennung (eigene Zusammenstellung)	17
Tab. 2:	Studienlage zur Ermittlung der Fluggeschwindigkeit.....	21
Tab. 3:	Horizontale Fluggeschwindigkeiten der nach § 45b BNatSchG kollisionsgefährdeten Brutvogelarten nach (Bruderer u. Boldt (2001), EoDist (2021) und MEKUN u. LfU SH (2024) in m/s.	23
Tab. 4:	Farbschema zur Kennzeichnung des Anerkennungsstatus.....	38
Tab. 5:	Anrechenbarkeit von Investitionskosten für Schutzmaßnahmen.....	43
Tab. 6:	Potenzial einzelner Maßnahmen zur Verringerung von Ertragsverlusten (angelehnt an Steinkamp et al. 2024, S. 43).	50
Tab. 7:	Genehmigungen mit AKS als beauftragter Schutzmaßnahme (Stand Oktober 2024).....	52
Tab. 8:	Inhalte eines standortbezogenen Abschaltkonzepts (eigene Zusammenstellung)	55
Tab. 9:	Vogel- und Bewirtschaftungsdetektion: Unterschiede	61
Tab. 10:	"Hauptbrutzeit" der kollisionsgefährdeten Brutvogelarten (nach Südbeck et al. 2025)	72

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
AKS	Antikollisionssystem
AP	Arbeitspaket
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BNetzA	Bundesnetzagentur
DOM / bDOM	digitale Oberflächenmodelle / bildbasierte digitale Oberflächenmodelle
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FAWS	Fachagentur Windenergie an Land und Solarenergie
FG	Fachgebiet
FuE	Forschungs- und Entwicklungsprojekt
GIS	Geoinformationssystem
IDF	IdentiFlight
k. A.	keine Angabe
KNE	Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende
LAG VSW	Länderarbeitsgemeinschaft der Vogelschutzwarten
LfU SH	Landesamt für Umwelt Schleswig-Holstein
LK	Landkreis
LRF	Laser Rangefinder
MEKUN	Ministerium für Energiewende Klimaschutz Umwelt und Natur des Landes Schleswig-Holstein
MLUK	Ministerium für Landwirtschaft Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg
MW	Megawatt

Abkürzung	Erklärung
NTP	Network Time Protocol. NTP-Server dienen der exakten Zeitsynchronisation.
OVG Lüneburg	Obergerverwaltungsgericht Lüneburg
RKR-Modell	Raumnutzungs-Kollisionsrisiko-Modell
RP	Regierungspräsidium
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (deutsch: Überwachung, Steuerung und Datenerfassung). Bezeichnet das Computer-System bzw. die Software zur Überwachung und Steuerung technischer Prozesse.
SDoD	Engl. Abkürzung für Shut Down on Demand
seT	signifikant erhöhtes Tötungsrisiko
SH	Schleswig-Holstein
U/min	Umdrehungen pro Minute
VBH	Vollbenutzungsstunden
VG	Verwaltungsgerichtshof
WEA	Windenergieanlage
WindBG	Windenergieflächenbedarfsgesetz
WR	Wissensrespons

A Anhang

Tab. 10: "Hauptbrutzeit" der kollisionsgefährdeten Brutvogelarten (nach Südbeck et al. 2025)

Kollisionsgefährdete Brutvogelarten	Hauptbrutzeit nach Südbeck et al. 2025
Seeadler	Mitte Februar – Ende Juli
Fischadler	Ende März – Anfang September
Schreiadler	Mitte April – Mitte August
Wiesenweihe	Anfang Mai – Mitte August
Kornweihe	Anfang April – Ende August
Rohrweihe	Ende April – Anfang September
Schwarzmilan	Anfang April – Anfang August
Wanderfalke	Ende März – Anfang August
Baumfalke	Mitte Mai – Ende September
Wespenbussard	Anfang Mai – Anfang August
Weißstorch	Mitte März – Anfang August

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/skr754