

Fachkonventionsvorschlag

„Prüfraahmen für Antikollisionssysteme“

(Prüfraahmen AKS)

Vollzugshilfe für die Bewertung als fachlich anerkannte
Schutzmaßnahme

Herausgeber: Ministerium für Energiewende, Klimaschutz,
Umwelt und Natur des Landes Schleswig-Holstein (MEKUN)
Landesamt für Umwelt (LfU)

Stand: 01.07.2024

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Anlass	1
1.2	Inhalt und Ziel	2
1.3	Vorgehensweise	3
2	Begriffe	8
3	Prüfraumen	13
3.1	Anforderungen	14
3.1.1	Wirksamkeit der Vogelerkennung	15
3.1.2	Definitionen im Kontext von Abschaltentfernungen und Messfehler ..	17
3.1.3	Zeitliche Verfügbarkeit.....	23
3.2	Entwicklung.....	24
3.2.1	Softwareentwicklung	24
3.2.2	Hardwareentwicklung	25
3.2.3	Modifikationen	26
3.2.4	Datenschutz und Datensicherheit	27
3.2.5	Einfluss- und Auswirkungsanalyse.....	27
3.3	Validierung.....	29
3.3.1	Überblick	29
3.3.2	Abdeckung	30
3.3.3	Erfassungsrage, Erkennungsrage, Gesamtrage, Schutzrager, Einflussfaktoren.....	30
3.3.3.1	Versuchskonzept / -plan	30
3.3.3.2	Versuchsstandort, Zeitfenster und Einflussfaktoren	31
3.3.3.3	Datenerhebung und -aufbereitung.....	32
3.3.4	Statistische Auswertungsmethoden	34
3.3.4.1	Analyse der Gesamt- oder Schutzrager.....	34
3.3.4.2	Analyse der Falsch-Positiv-Rate.....	36

3.3.5	Ergebnisdokumentation.....	37
3.3.6	Relativer örtlicher Messfehler.....	37
3.3.7	Abschaltzeit.....	37
3.3.8	Auswertung und Ablauf der Validierung	37
3.4	Prüfungen	38
3.4.1	Systemprüfung.....	38
3.4.2	Ergänzungsprüfung.....	39
3.4.3	Schnittstelle zwischen AKS und WEA.....	39
3.4.4	Wiederkehrende Prüfungen	40
3.4.5	Wartungen.....	40
3.4.6	Prüfbericht.....	41
3.5	Betriebsphase.....	41
3.5.1	Installation.....	41
3.5.2	Inbetriebnahme	41
3.5.3	Betrieb.....	42
3.6	Dokumentation und Qualitätsmanagement.....	43
	Quellenverzeichnis.....	45
	Beteiligte am Arbeitsprozess	47
	Anhang A: Berechnung des mittleren, dem Vogel gegenüber präsentierten Rotorradius	48
	Anhang B: Plausibilisierung der Grenzwerte von Gesamtrate und Schutzrate ...	49
	Anhang C: Berechnung von artspezifischen Fluggeschwindigkeiten und Höhendifferenzen	51
	Anhang D: Vereinfachter Beispiel-R-Code zur Berechnung einer mittleren Rate nebst 95%-Konfidenzintervall.....	77
	Anhang E: Leitfaden für LRF-Bedienung	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Arbeitsprozess	5
Abbildung 2:	Sicherheitslebenszyklus eines AKS, Neuentwicklung.	13
Abbildung 3:	Sicherheitslebenszyklus eines AKS, Weiterentwicklung.	14
Abbildung 4:	Beispiel zylindrischer Erfassungsbereich (grün), der einen Reaktionsbereich (blau) umfasst mit kleiner vertikaler Differenz zwischen Rotormittelpunkt der WEA (schwarz) und AKS (rot).....	19
Abbildung 5:	Beispiel ellipsoider Erfassungsbereich (grün), der einen Reaktionsbereich (blau) umfasst mit stärkerer vertikaler Differenz zwischen Rotormittelpunkt der WEA (schwarz) und AKS (rot).	19
Abbildung 6:	Beispiel zylindrischer Erfassungsbereich (grün), der einen Reaktionsbereich (blau) umfasst mit stärkerer horizontaler und vertikaler Differenz zwischen Rotormittelpunkt der WEA (schwarz) und AKS (rot).....	19
Abbildung 7:	Beispiel ringförmiger Erfassungsbereich (grün), der einen Reaktionsbereich (blau) umschließt mit kleiner vertikaler Differenz zwischen Rotormittelpunkt der WEA (schwarz) und AKS (rot).....	20
Abbildung 8:	Veranschaulichung der verschiedenen Einflussfaktoren zur Berechnung des Reaktionsradius.	21
Abbildung 9:	Vereinfachtes V-Modell des Software-Sicherheitslebenszyklus (aus /4/).	25
Abbildung B10:	Statistische Auswertung der Gesamtrate.....	50
Abbildung C11:	Dichteplots von berechneten Geschwindigkeiten für drei verschiedene exemplarische Vogelarten, wobei die senkrechte Linie jeweils angibt, bei welchem Geschwindigkeitswert die Grenze zwischen „ruhend“ und „fliegend“ gezogen wird.	55
Abbildung C12:	Ergebnisse zum Baumfalken	59
Abbildung C13:	Ergebnisse zum Fischadler.....	60
Abbildung C14:	Ergebnisse zur Kornweihe	61
Abbildung C15:	Ergebnisse zur Rohrweihe.....	62
Abbildung C16:	Ergebnisse zum Rotmilan	63
Abbildung C17:	Ergebnisse zum Schreiadler	64

Abbildung C18: Ergebnisse zum Schwarzmilan	65
Abbildung C19: Ergebnisse zum Seeadler	66
Abbildung C20: Ergebnisse zum Steinadler	67
Abbildung C21: Ergebnisse zum Uhu	68
Abbildung C22: Ergebnisse zum Wanderfalken	69
Abbildung C23: Ergebnisse zum Weißstorch	70
Abbildung C24: Ergebnisse zum Wespenbussard	71
Abbildung C25: Ergebnisse zur Wiesenweihe.....	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle C1:	Horizontale und vertikale Fluggeschwindigkeiten. Aus Realdaten berechnete Fluggeschwindigkeiten. Für die Berechnung des Reaktionsradius sind die hier dargestellten Werte für die horizontale Fluggeschwindigkeit verbindlich zu nutzen. Für Berechnungen, bei denen die vertikale Fluggeschwindigkeit benötigt wird, muss immer der Wert von 1 m/s genutzt werden.	73
-------------	--	----

1 Einleitung

1.1 Anlass

Die Abkehr von der Nutzung fossiler und nuklearer Energieträger binnen weniger Jahrzehnte ist einer der denkbar größten und komplexesten Transformationsprozesse der Neuzeit. Bei der Umsetzung der Klimaschutzziele spielt der naturverträgliche Ausbau der Windenergie an Land eine übergeordnete Rolle. Mit dem stetigen Ausbau der Windenergie in den letzten Jahren gehen neben positiven Effekten wie der Reduzierung von CO₂-Emissionen auch Herausforderungen einher, insbesondere im Bereich Artenschutz. Der Einsatz von Windenergieanlagen (WEA) kann zu artenschutzrechtlichen Konflikten führen, u. a. zu einem erhöhten Kollisionsrisiko von Vögeln.

Der Schutz von kollisionsgefährdeten Vogelarten hat sowohl ökologisch als auch rechtlich eine hohe Bedeutung. Um diesen zu gewährleisten, sind fachlich anerkannte Schutzmaßnahmen erforderlich, die sowohl den Ausbau der Windenergie als auch den Schutz der Avifauna in Einklang bringen. Antikollisionssysteme (AKS) erweisen sich in diesem Zusammenhang als ein effizienter Lösungsansatz. Sie gewährleisten sowohl ein hohes Schutzniveau für Zielvogelarten als auch zumutbare Energieertragsverluste. AKS wurden von den Regierungsparteien 2021 auf Bundesebene und 2022 auf Landesebene in den Koalitionsvertrag aufgenommen. Sie werden im novellierten Bundesnaturschutzgesetz (Anlage 1 zu § 45b Absatz 1-5 BNatSchG) als fachlich anerkannte Schutzmaßnahme für Brutvögel aufgeführt.

Im Jahr 2021 wurde das vom Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (KNE) und dem Bundesamt für Naturschutz (BfN) konzipierte Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Anforderungen an technische Überwachungs- und Abschaltssysteme an Windenergieanlagen“ abgeschlossen und die Ergebnisse in einem Abschlussbericht /2/ veröffentlicht. Darin wird u. a. eine unabhängige technische Prüfung von AKS für erforderlich erachtet, wenn die Leistungsfähigkeit des AKS nicht in jedem Anwendungsfall neu ermittelt und belegt werden soll. Der vorliegende Prüfrahmengreift diesen Ansatz auf und definiert Prüfanforderungen sowohl aus naturschutzfachlicher als auch aus technischer Sicht.

1.2 Inhalt und Ziel

Der Prüfrahmen AKS definiert die Anforderungen an die Entwicklung, Validierung und Prüfung von AKS für WEA an Land. Außerdem sind Vorgaben für die Dokumentation und das Qualitätsmanagement sowie die Betriebsphase enthalten. Damit umfasst der Prüfrahmen alle relevanten Phasen im Lebenszyklus eines AKS. Zudem werden mit der Berechnung von artspezifischen Fluggeschwindigkeiten naturschutzfachliche Grundlagen auf Basis eines bis dato bundesweit einmaligen Datensatzes bereitgestellt.

Die Vorgaben des Prüfrahmens basieren auf den einschlägigen Veröffentlichungen des KNE /1/ und des BfN /2/ sowie auf einschlägigen technischen Normen, die im Hinblick auf die für AKS maßgeblichen Inhalte analysiert wurden. Mithilfe statistischer Methoden wurden aus naturschutzfachlicher Perspektive Anforderungen an die Wirksamkeit und die Validierung definiert. Der Prüfrahmen wurde aus der Perspektive kamerabasierter Systeme zum Schutz von Brutvögeln entwickelt und ist grundsätzlich auch für andere AKS nutzbar.

Der Prüfrahmen stellt eine Vollzugshilfe dar, die den Naturschutz- und Genehmigungsbehörden die Beantwortung der Frage erleichtern soll, ob die Produktentwicklung und Validierung eines AKS nach den im Folgenden benannten Anforderungen durch die Hersteller von AKS durchgeführt worden ist bzw. ob bestehende oder bereits entwickelte AKS diesen Anforderungen entsprechen.

Bei der Entscheidung über die Genehmigung von WEA prüft die zuständige Naturschutzbehörde das artenschutzrechtliche Tötungs- und Verletzungsverbot nach § 44 Absatz 1 Nummer 1 BNatSchG. Ein entsprechender Verstoß liegt nach § 44 Absatz 5 Satz 2 Nummer 1 i. V. m. § 45b Absatz 1 BNatSchG vor, wenn das Tötungs- und Verletzungsrisiko für Exemplare kollisionsgefährdeter Brutvogelarten im Umfeld ihrer Brutplätze durch den Betrieb von WEA signifikant erhöht ist und diese Beeinträchtigung bei Anwendung der gebotenen, fachlich anerkannten Schutzmaßnahmen nicht vermieden werden kann. Für diese fachliche Beurteilung sieht § 45b BNatSchG detaillierte Regelungen vor. Nach § 45b Absatz 6 Satz 1 BNatSchG sind fachlich anerkannte Schutzmaßnahmen für die in Anlage 1 Abschnitt 1 des Gesetzes genannten Brutvogelarten festzulegen. Insbesondere sind die in Anlage 1 Abschnitt 2 BNatSchG genannten Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen. In § 45b Absatz 3 Nummer 2 Halbsatz 2 BNatSchG ist eine Regelvermutung normiert, wonach im Falle des Einsatzes eines AKS

für die betreffende Art in der Regel davon auszugehen ist, dass die Risikoerhöhung hinreichend gemindert wird.

In der Anlage 1 Abschnitt 2 BNatSchG wird das AKS als ein auf automatisierte Kamera- und / oder Radardetektion basierendes System beschrieben, das nach dem derzeitigen Stand der Wissenschaft und Technik nachweislich wirksam in der Lage sein muss, bei Annäherung der Zielart rechtzeitig bei Unterschreitung einer vorab artspezifisch festgelegten Entfernung zur WEA per Signal die Rotordrehgeschwindigkeit bis zum „Trudetrieb“ zu verringern.

Im Rahmen der Genehmigungsentscheidung der Behörde ist insofern das Kriterium der Wirksamkeit zentral. Dabei muss zwischen der grundsätzlichen Wirksamkeit des AKS und der Wirksamkeit im konkreten Einzelfall unterschieden werden, wobei die zuständige Naturschutz- und Genehmigungsbehörde beides prüft.

Der Prüfrahmen konkretisiert im Sinne eines Fachkonventionsvorschlags die gesetzliche Anforderung der grundsätzlichen Wirksamkeit eines AKS (siehe Anlage 1 Abschnitt 2 BNatSchG). Die Behörde wird durch den Prüfrahmen in die Lage versetzt, die Systemprüfungen der AKS-Hersteller nachzuvollziehen bzw. dem Antragsteller aufzugeben, diese nachzuweisen, und somit die grundsätzliche Leistungsfähigkeit eines AKS festzustellen.

Darüber hinaus dient der Prüfrahmen dazu, die Weiterentwicklung der Systeme, bspw. zur Erkennung weiterer Arten, zu unterstützen. Damit gibt der Prüfrahmen auch den Herstellern einen fachlichen Rahmen an die Hand, der es ihnen ermöglicht, die Leistungsfähigkeit ihres Produktes zur Darlegung der grundsätzlichen Wirksamkeit mit einer einmaligen Validierung und Systemprüfung zu belegen. Darüber hinaus ist eine Weiterentwicklung von AKS im Rahmen einer auf die maßgeblichen Änderungen fokussierten Teilvalidierung und Ergänzungsprüfung möglich.

1.3 Vorgehensweise

Der vorliegende Prüfrahmen wurde im Auftrag des Ministeriums für Energiewende, Klimaschutz, Umwelt und Natur des Landes Schleswig-Holstein (MEKUN) erarbeitet. Dies erfolgte in einem interdisziplinären Arbeitskreis unter der Leitung des Landesamtes für Umwelt (LfU). Der Arbeitskreis setzte sich zusammen aus einem Berater*innenteam, Interessensvertreter*innen der Naturschutz- bzw. Naturschutzfachverbände und der

Windenergieverbände Schleswig-Holsteins sowie Interessensvertreter*innen dreier AKS- und WEA-Hersteller (Liste aller Beteiligten siehe Seite 47). Dem Berater*innenteam gehörten Mitarbeitende des LfU, eine unabhängige Moderation, das Büro für Biostatistik Bionum und Mitarbeitende des TÜV NORD an. Die beiden Letztgenannten hatten dabei die Fachberatung zu naturschutzfachlichen und statistischen Fragestellungen sowie technischen Aspekten inne. Die gleichberechtigte Betrachtung dieser unterschiedlichen Fach- und Interessensbereiche wurde als unerlässlich erachtet, um die jeweiligen Perspektiven der teilnehmenden Institutionen in den Prüfraumen einfließen zu lassen. Der Prozess der Erarbeitung des Prüfraumes im Rahmen regelmäßiger Präsenztreffen des gesamten Arbeitskreises wurde von der unabhängigen Moderation strukturiert und diskussionsleitend begleitet. Die Beauftragung der genannten Moderation, die weder dem LfU noch den weiteren teilnehmenden Institutionen angehört, stellte jederzeit einen transparenten und allparteilichen Arbeitsprozess sicher.

Die Fachberater und die Beteiligten des LfU bereiteten mit der Moderation als gemeinsames Beraterteam die jeweils anstehenden Themen im Vorfeld der einzelnen Arbeitskreistreffen vor, durchdachten verschiedene Vorgehensweisen bzw. Lösungsansätze und stellten diese in der jeweils nächsten Sitzung dem gesamten Arbeitskreis vor. Zudem wurde regelmäßig über aktuelle Sachstände aus der Politik und den damit verbundenen Konsequenzen für die Vorgaben der Verwaltung hinsichtlich des Naturschutzes in der Windenergieplanung informiert und daraus resultierende Implikationen für den Prüfraumen diskutiert.

Die Vorschläge zu verschiedenen Lösungsansätzen und Vorgehensweisen wurden im Arbeitskreis aus unterschiedlichen Blickwinkeln diskutiert und ergebnisoffen betrachtet, hierbei wurden immer die Meinungen und Beiträge aller Teilnehmenden einbezogen. Im Ergebnis wurden die Festlegungen, die in den folgenden Kapiteln dargestellt sind, im Verlauf der acht Arbeitskreistreffen nach intensiver Diskussion von allen mitgetragen, also im Konsens aller Beteiligten getroffen. Dabei lag der Zusammenarbeit stets ein offener und konstruktiver Austausch über technische und naturschutzfachliche Eckpunkte, Methoden und Daten zugrunde.

Der Arbeitskreis agierte während der Treffen und innerhalb des Prozesses als geschlossener Kreis. Die teilnehmenden Personen fungierten dabei als Vertretung und Schnittstelle für ihre jeweilige Institution. Es wurde vereinbart, dass die diskutierten Inhalte über diese Schnittstelle den einzelnen Institutionen zugänglich gemacht wurden, um dort eine

Rückkopplung zu ermöglichen. Die Moderation erstellte ausführliche Dokumentationen zu den einzelnen Arbeitstreffen, in deren Rahmen die Zielfindungen, Absprachen, diskutierten Inhalte, bisherigen Ergebnisse und das weitere geplante Vorgehen festgehalten und allen Teilnehmenden zur Verfügung gestellt wurden.

Der Arbeitsprozess des gesamten Arbeitskreises bestand aus acht Präsenzsitzungen, einer Online-Infoveranstaltung für außenstehende Ländervertreter*innen sowie eines finalen Online-Termins mit den Arbeitskreisteilnehmenden (siehe Abbildung 1). Die Reihenfolge der zu bearbeitenden Themen und Inhalte sowie neue zu beachtende Aspekte ergaben sich im Verlauf des Prozesses. Daher lag dem gesamten Prozess ein iteratives Vorgehen zugrunde, um der Komplexität des Vorhabens gerecht zu werden. Prozessbegleitend wurde durch das Berater*innenteam frühzeitig ein Textentwurf des Prüfrahmens erstellt, der anhand der in den Sitzungen getroffenen Vereinbarungen kontinuierlich überarbeitet und dem gesamten Arbeitskreis immer wieder zur Kommentierung zur Verfügung gestellt wurde.

In der ersten Arbeitskreissitzung standen die gemeinsame Zielklärung und die Verabredungen zur Zusammenarbeit im Vordergrund. Gemeinsame Ziele konnten zu diesem Zeitpunkt nur als abstrakte Überbegriffe definiert werden, bei denen es sich um Zielvarianten handelte, da zu Beginn noch nicht abzuschätzen war, wie sich der Prozess entwickelt.

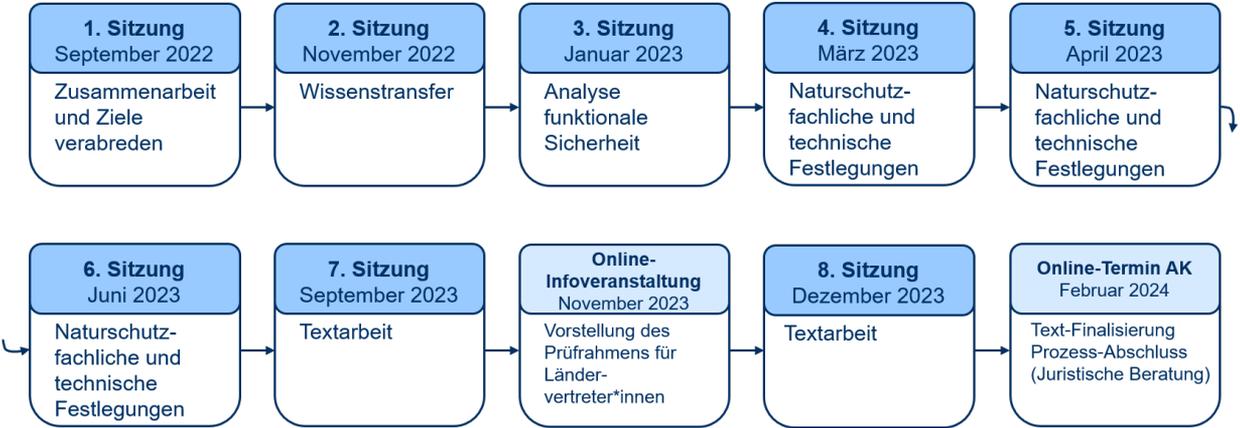


Abbildung 1: Arbeitsprozess

Die zweite Sitzung wurde dem Wissenstransfer gewidmet. Es wurden einige der in Entwicklung befindlichen AKS, vorhandene Normen und das Prinzip der funktionalen Sicherheit und der verwaltungsrechtliche Hintergrund von AKS im Genehmigungsverfahren vorgestellt, um diesen losgelöst vom Prüfrahmens einordnen zu können. Damit wurde allen Teilnehmenden ein Angleichen des Wissensstandes und somit das Entstehen konstruktiver Diskussionen ermöglicht.

In der dritten Sitzung bildeten die technischen Aspekte des Prüfrahmens vor dem Hintergrund der Analyse der Normen zur funktionalen Sicherheit den thematischen Schwerpunkt. Deren Anwendbarkeit für AKS wurde im Vorfeld von den AKS-Herstellern in deren Institutionen detailliert auf Umsetzbarkeit geprüft. Im Arbeitskreis wurde die Analyse der Umsetzbarkeit sowie die Relevanz für Wirksamkeit diskutiert.

In den Sitzungen vier bis sechs wurden naturschutzfachliche und technische Festlegungen getroffen, die sich in den nachfolgenden Kapiteln wiederfinden. Die Themenbereiche wurden jeweils durch den TÜV NORD oder das Büro Bionum vorbereitet, die Lösungsvorschläge unterbreiteten, die anschließend in der Gruppe diskutiert wurden.

In der siebten Sitzung fand die konkrete Arbeit am bisher entstandenen Textentwurf des Prüfrahmens statt. Zuvor war den Teilnehmenden über einen SharePoint die Möglichkeit der Kommentierung des Textentwurfes eröffnet worden, sodass während des Treffens noch zu klärende Punkte erörtert werden konnten.

Vor der achten Sitzung wurde im Rahmen einer Online-Infoveranstaltung der Entwurf des Prüfrahmens interessierten Ländervertreter*innen, und Vertreter*innen von FA Wind, KNE und BfN vorgestellt, um auf dieser Ebene einen Austausch zu ermöglichen und ein erstes Feedback zu der bisher geleisteten Arbeit einzuholen.

In der achten Sitzung erfolgte die Diskussion der Erkenntnisse aus der Infoveranstaltung sowie eine weitere gemeinsame Bearbeitung des Textentwurfes. Im Februar 2024 erfolgte die abschließende Bearbeitung des Prüfrahmens. Der Entwurf wurde einer juristischen Prüfung hinsichtlich der Implementierung des Prüfrahmens und der rechtlichen Rückschlüsse in Bezug auf die zum Zeitpunkt der Veröffentlichung geltenden naturschutzfachlichen Rahmenbedingungen unterzogen und entsprechend bearbeitet. Die Bearbeitung wurde dem Arbeitskreis zu einer weiteren Kommentierung zur Verfügung gestellt, anschließend fand ein letztes Online-Treffen des Arbeitskreises statt.

Um die Aktualität der Vorgaben des Prüfrahmens zu gewährleisten, sind für die Zukunft Fortschreibungen geplant. In Anlehnung an § 74 Absatz 6 Satz 3 BNatSchG findet alle drei Jahre eine Evaluierung statt. Sofern neue fachliche Erkenntnisse dies erfordern, kann auch eine frühere Anpassung des Prüfrahmens erfolgen.

2 Begriffe

Im Folgenden werden zentrale Begriffe so definiert, wie sie im Kontext dieses Prüfrahmens verwendet werden. Entsprechende Definitionen in Kontexten außerhalb dieses Dokuments (z. B. im Rahmen von Genehmigungsverfahren) können abweichen. Ausführlichere Erläuterungen sowie der Bezug der Begriffe zueinander erschließen sich im Detail in Kapitel 3.

- **Antikollisionssystem (AKS):** Systeme, die in der Lage sind am WEA-Standort bestimmte Zielvogelarten, insbesondere Groß- und Greifvögel, in Echtzeit automatisch zu erkennen und beim Eintritt des Vogels in den Reaktionsbereich den Betrieb der jeweiligen WEA abzuregeln.
- **Befähigte Person:** Eine Person, die durch ihre Berufsausbildung, Berufserfahrung und derzeitige Berufstätigkeit über die erforderlichen Fachkenntnisse zur Prüfung eines konkreten Sachverhalts verfügt.
- **Erfassungsbereich:** Definiert den 3D-Raum, auf den sich die artspezifische empirische Validierung des AKS bezieht. Der Erfassungsbereich sollte so definiert sein, dass er insbesondere die Randbereiche des Reaktionsbereichs ausreichend abdeckt.
- **Erfassungsrage:** Die mittlere artspezifische empirisch ermittelte Rate, mit der das AKS Zielvogelarten erfasst. Die Erfassungsrage bezieht sich auf einen Erfassungsbereich. Als Basis zur empirischen Ermittlung der Erfassungsrage dienen sämtliche im Erfassungsbereich aufgenommenen Punkte kollisionsgefährdeter Flüge der jeweiligen Zielart.
- **Erkennungsrage:** Die mittlere artspezifische empirisch ermittelte Rate, mit der das AKS eine bereits erfasste Zielvogelart (siehe Erfassungsrage) korrekt hinsichtlich der Art oder Größenklasse zuordnet. Die Erkennungsrage bezieht sich auf einen Erfassungsbereich. Die Erkennungsrage beschreibt somit den prozentualen Anteil der vom AKS korrekt klassifizierten Flüge gemessen an der Menge aller im Erfassungsbereich vom AKS erfassten Flüge von Zielvogelarten.

-
- **Falsch-Positiv-Rate:** Prozentuale Rate, mit der das AKS ein WEA-Abschaltsignal ausgibt, obwohl es sich bei dem auslösenden Ziel nicht um eine Zielvogelart gehandelt hat. Diese führt somit zu WEA-Abschaltsignalen, die nicht für den Schutz von Zielarten erforderlich sind. Anmerkung: Bei der Erfassungsrate und der Erkennungsrate handelt es sich um Richtig-Positiv-Raten. Diese beziehen sich allerdings nicht auf WEA-Abschaltsignale, sondern auf Flüge von Zielvogelarten im Erfassungsbereich.
 - **Fluggeschwindigkeit:** Die empirisch ermittelte artspezifische horizontale und vertikale Fluggeschwindigkeit von Zielvogelarten für die Berechnung des Reaktionsbereichs / Reaktionsradius.
 - **Gesamtrate:** Die artspezifische kombinierte Erfassungs- und Erkennungsrate, mit der das AKS eine Zielvogelart erfasst und hinsichtlich der Art oder Größenklasse korrekt zuordnet. Die Gesamtrate bezieht sich i. d. R. auf einen Erfassungsbereich. Die Gesamtrate beschreibt somit den prozentualen Anteil der vom AKS erfassten und hinsichtlich der Art oder Größenklasse korrekt klassifizierten Flüge verglichen zur Menge aller in Feldexperimenten oder mittels GPS-Telemetrie erfassten kollisionsgefährdeten Flüge von Zielvogelarten im Erfassungsbereich. Damit handelt es sich um diejenige Rate, die alternativ zur Schutzrate naturschutzfachlich von größtem Interesse ist, da sie alle kombinierten Effekte von Abdeckung, Erfassung und Erkennung widerspiegelt. In Abhängigkeit vom AKS-System kann – alternativ zur Gesamtrate – die Analyse der Schutzrate geeigneter sein. Beide Raten sind qualitativ und quantitativ nur eingeschränkt vergleichbar und die jeweiligen Mindestanforderungen sind daher unterschiedlich.
 - **Konfidenzintervall:** Konfidenzintervalle geben einen Zahlenbereich an, in dem der wahre Mittelwert mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit liegt. Je größer die zugrundeliegende Stichprobe ist, desto kleiner ist das Konfidenzintervall, denn desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass der empirische Mittelwert dicht an dem wahren Mittelwert liegt.
 - **Künstliche Intelligenz (KI):** Computerprogramme und Systeme, die menschenähnliche Denk- und Lernprozesse simulieren, um Aufgaben zu automatisieren und Vorhersagen aus Daten zu treffen.

-
- **Laser-Rangefinder (LRF):** Technisches Gerät, welches für die Erzeugung der Referenzdaten (Bestimmung der 3D-Positionen fliegender Vögel zu einem bestimmten Zeitpunkt) genutzt werden kann. Hinweise zur Bedienung von LRF finden sich im Anhang E.
 - **Mehrkamerasystem:** Ein AKS kann aus mehreren Kameras bestehen, die in Kombination den Erfassungsbereich abdecken und dabei u. U. untereinander kommunizieren können.
 - **Mittlere Raten:** Die empirische Ermittlung der verschiedenen Raten (Erfassungsrates, Erkennungsrates, Gesamtrates und Schutzrates) basiert im Kern darauf, dass die Ergebnisse vieler einzelner Messungen gemittelt werden. Diese empirischen Mittelwerte können daher auch als „mittlere Raten“ bezeichnet werden; so bezeichnet bspw. die „mittlere Gesamtrate“ den empirischen Mittelwert der Gesamtrate über die Menge der Einzelmessungen. Aufgrund komplexer Datenstrukturen werden diese Mittelwerte i. d. R. mit geeigneten Regressionsmethoden bestimmt, die nicht nur den Mittelwert berechnen, sondern auch eine Schätzung der damit assoziierten Unsicherheiten liefern können. Letztere werden in Form von Konfidenzintervallen berechnet.
 - **Puffer:** Höhe und Radius des Reaktionsbereiches ergeben sich u. a. aus WEA-spezifischen Maßen sowie einem Puffer, wobei sich letzterer wiederum aus horizontalen und vertikalen Fluggeschwindigkeiten der Zielvogelart ableitet. Dieser Puffer repräsentiert einen Sicherheitsabstand, welcher der Ausdehnung der WEA hinzuaddiert wird. Damit wird gewährleistet, dass die Austrudelzeit nicht diejenige Zeit überschreitet, die der Vogel benötigt, um den Rotorbereich zu erreichen.
 - **Reaktionsbereich:** Zylinder um die WEA mit dem Reaktionsradius als Radius und einer Höhe, die sich an den Rotordurchläufen im Zusammenspiel mit vertikalen Fluggeschwindigkeiten und der Reaktionszeit der WEA orientiert.
 - **Reaktionsradius:** Rechnerisch ermittelter (art- und WEA-spezifischer) Radius um die WEA in der Ebene, innerhalb dessen eine Zielvogelart vom AKS erfasst und klassifiziert werden muss, um eine rechtzeitige Abschaltung zu gewährleisten. Die Größe des Reaktionsradius orientiert sich u. a. an den horizontalen Fluggeschwindigkeiten.

-
- **Referenzdaten:** Im Kontext der Validierung von AKS mittels GPS-Telemetrie oder LRF erfasste, räumlich-zeitliche Vogelpositionen (nebst Artbestimmung) im Erfassungsbereich.
 - **Relativer örtlicher Messfehler:** Die Messungenauigkeit des AKS bzgl. der Vogelposition in der 2D-Ebene. Diese wird relativ zur Entfernung bestimmt. Sie ergibt sich aus dem absoluten Fehler (z. B. in Metern Abweichung) geteilt durch die Distanz zwischen Zielvogel und AKS.
 - **Richtig-Positiv-Rate:** Prozentuale Rate, mit der eine im Erfassungsbereich fliegende Zielvogelart hinsichtlich ihrer Art oder Größenklasse korrekt vom AKS zugeordnet wird.
 - **Schutzrate:** Die artspezifische Rate, mit der die Menge aller in Feldexperimenten oder mittels GPS-Telemetrie erfassten, kollisionsgefährdeten Flüge von Zielvogelarten im Erfassungsbereich vor einer Kollision geschützt sind. Die Zielvogelart gilt als geschützt, wenn das AKS Individuen einer Zielvogelart erfasst und korrekt hinsichtlich der Art oder Größenklasse zuordnet und / oder diese Individuen bereits durch eine Abschaltung der WEA geschützt sind oder das AKS diese durch die Beobachtung eines näher an der WEA fliegenden Zielvogels mit schützt. Damit handelt es sich um diejenige Rate, die alternativ zu der Gesamtrate natur-schutzfachlich von größtem Interesse ist, da sie unmittelbar beschreibt, welcher Anteil an kollisionsgefährdeten Flügen geschützt ist. Sie muss jedoch zwingend im Zusammenspiel mit der Falsch-Positiv-Rate interpretiert werden. In Abhängigkeit vom AKS-System kann – alternativ zur Schutzrate – die Analyse der Gesamtrate geeigneter sein. Beide Raten sind qualitativ und quantitativ nur eingeschränkt vergleichbar und die jeweiligen Mindestanforderungen sind daher unterschiedlich.
 - **Trudelbetrieb:** Kollisionsrisikomindernder Modus einer WEA, in dem die Rotorblätter aus dem Wind gedreht sind und eine aktive Windnachführung der Rotorgondel vorgenommen wird. Die Rotorblattspitzengeschwindigkeit ist im Vergleich zum normalen Betrieb deutlich reduziert. Es gilt die Annahme, dass Zielvogelarten durch den Trudelbetrieb in hohem Maße vor einer Kollision geschützt sind.

- **Unabhängige Stelle:** Eine unabhängige technische Prüforganisation, die über die erforderlichen Fachkenntnisse zur Prüfung eines konkreten Sachverhalts verfügt. Sie steht in keinem Abhängigkeitsverhältnis, durch das ihre Tätigkeit beeinflusst werden könnte (z. B. Angestelltenverhältnis zu Herstellern oder Betreibern).
- **Zielvogelart:** Vogelart, für welche die Wirksamkeit des AKS empirisch belastbar überprüft werden soll.

3 Prüfrahmen

Die Bewertung von AKS anhand des vorliegenden Prüfrahmens orientiert sich an den normativen Grundlagen der funktionalen Sicherheit zur Entwicklung von Sicherheitsfunktionen elektrischer und elektronischer Systeme. Dabei wurden unter anderem die folgenden technischen Normen herangezogen:

- DIN EN 61508: Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer / elektronischer / programmierbarer elektronischer Systeme /3/.
- DIN EN 13849: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen /4/.
- DIN EN 62061: Sicherheit von Maschinen – Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer und programmierbarer elektronischer Steuerungssysteme /5/.

Im Rahmen der Entwicklung der AKS als Sicherheitsfunktion für die bedarfsgerechte Abschaltung von WEA zum Schutz von kollisionsgefährdeten Vogelarten ist der komplette Lebenszyklus des AKS zu betrachten. Maßgeblich für die Bewertung sind die aus den o. g. technischen Normen erfolgten Ableitungen.

Kapitel 3 befasst sich mit den Anforderungen an den Prozess der Entwicklung und Überprüfung eines AKS, um den Schutz von kollisionsgefährdeten Vogelarten zu gewährleisten. Es werden Anforderungen an alle relevanten Phasen im Sicherheitslebenszyklus eines AKS definiert. In Abbildung 2 und Abbildung 3 sind die einzelnen Phasen des Ablaufs von der Entwicklung bis zum Betrieb für die Neu- und die Weiterentwicklung eines AKS dargestellt.

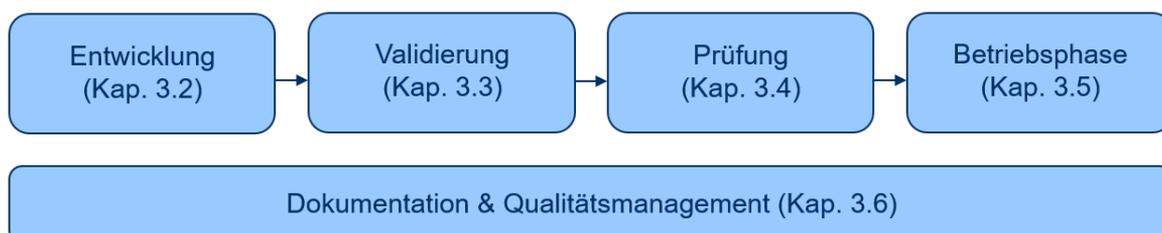


Abbildung 2: Sicherheitslebenszyklus eines AKS, Neuentwicklung.

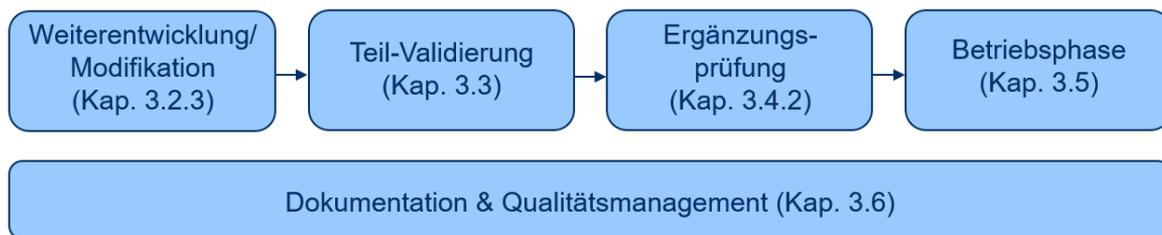


Abbildung 3: Sicherheitslebenszyklus eines AKS, Weiterentwicklung.

In den folgenden Kapiteln wird auf die Anforderungen an AKS (Kapitel 3.1), deren Entwicklung (Kapitel 3.2), Validierung (Kapitel 3.3), Betrieb (Kapitel 3.4), Dokumentation (Kapitel 3.5) und Prüfung (Kapitel 3.6) eingegangen.

3.1 Anforderungen

Damit ein ausreichender Schutz kollisionsgefährdeter Vögel im Umfeld von WEA durch das AKS gewährleistet ist, müssen einige grundlegende Anforderungen erfüllt sein, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

In erster Linie ist sicherzustellen, dass das AKS die jeweilige kollisionsgefährdete Vogelart, zu deren Schutz es eingesetzt werden soll, zuverlässig erkennt. Hierzu werden in Kapitel 3.1.1 Anforderungen an die Gesamt- bzw. Schutzrate formuliert, mit der das AKS eine Zielvogelart korrekt identifizieren bzw. schützen muss.

Darüber hinaus muss die geforderte Gesamt- bzw. Schutzrate in einer Entfernung erreicht werden, mit der sichergestellt ist, dass die WEA rechtzeitig abgeschaltet wird, bevor ein identifizierter Vogel das Rotorblatt erreicht. Kapitel 3.1.2 beschreibt die Formel zur Bestimmung des Reaktionsradius, auf dessen Basis der Reaktions- bzw. Erfassungsbereich definiert wird.

Es ist sicherzustellen, dass das AKS zuverlässig funktioniert, Abschaltsignale sendet und ausfallsicher ist. In Kapitel 3.1.3 sind Anforderungen an die zeitliche Verfügbarkeit formuliert.

Zusätzlich ist vom Hersteller die sichere Inbetriebnahme des AKS zu gewährleisten, wobei die Anforderungen des aktuellen Produktsicherheitsgesetzes /9/ zu beachten sind. Die entsprechenden Nachweise müssen vom Hersteller erbracht werden.

Nur wenn sämtliche Anforderungen erfüllt sind, kann der Nachweis über die grundsätzliche Wirksamkeit eines AKS erbracht werden. Es sei explizit angemerkt, dass die Bewertung der Wirksamkeit die grundsätzliche fachliche Anerkennung betrifft und nicht die tatsächliche Wirksamkeit an einem konkreten WEA-Standort. Diese ist im Rahmen des Genehmigungsverfahrens gesondert zu prüfen.

3.1.1 Wirksamkeit der Vogelerkennung

Der Fokus liegt insbesondere auf dem empirisch fundierten Nachweis einer ausreichend hohen artspezifischen mittleren Rate, mit der Zielvogelarten vom AKS erfasst und hinsichtlich ihrer Art oder Größenklasse korrekt identifiziert werden (siehe Gesamtrate) oder vor Kollisionen geschützt sind (siehe Schutzrate). Dies muss spätestens dann passieren, wenn die Zielvogelart eine definierte kritische Distanz zur WEA (Reaktionsbereich) unterschreitet. Ziel ist es, dass das AKS rechtzeitig ein Abschaltsignal an die WEA sendet, so dass eine wirksame Verringerung des Kollisionsrisikos für die Zielvogelarten erreicht wird.

Die grundsätzliche Wirksamkeit eines AKS wird entweder durch die Gesamtrate oder die Schutzrate repräsentiert. Die Definition zweier alternativer Raten ergibt sich aus der Notwendigkeit, dass keine Rate so definiert werden konnte, dass sie bei allen betrachteten AKS einen gerechten und vergleichbaren Anspruch an die Leistungsfähigkeit beinhaltet. Je nach Konzeption eines AKS bietet daher eine der beiden Raten ein sinnvolles Maß für die geforderte Schutzwirkung, wohingegen die jeweils andere Rate u. U. zu einer Unterschätzung der Schutzwirkung führen könnte.

Zwar setzt sich die o. g. Gesamt- bzw. Schutzrate u. a. aus einzelnen, die Erfassung und Erkennung betreffenden Schritten zusammen (siehe Erfassungsrates und Erkennungsrates); diese spielen einzeln betrachtet aber aus naturschutzfachlicher Perspektive eine untergeordnete Rolle. Trotzdem sollten sie dokumentiert und erläutert werden, um ein differenziertes Verständnis des AKS zu erlauben.

Zudem muss bei Anwendung der Schutzrate auch die Falsch-Positiv-Rate untersucht und dokumentiert werden, d. h. die Rate, mit der das AKS eine Nicht-Zielart fälschlicherweise als Zielart bestimmt und deshalb ein Abschaltsignal ausgibt. Da Schutzrate und Falsch-Positiv-Rate u. U. korrelieren können, besteht die Möglichkeit, dass eine hohe

Falsch-Positiv-Rate zu einer hohen Schutzrate führt. Daher muss die Falsch-Positiv-Rate empirisch valide untersucht und präsentiert werden.

Alle im Folgenden geforderten Untersuchungen, Betrachtungen und Berechnungen müssen artspezifisch durchgeführt werden, da die Wirksamkeit der AKS in hohem Maße artabhängig ist. Darüber hinaus wurden mittlere artspezifische Fluggeschwindigkeiten zwecks Standardisierung im Rahmen dieses Dokumentes berechnet und sind verbindlich zu nutzen (siehe Anhang C).

Es gilt zu beachten, dass die Gesamt- und die Schutzrate, die alternativ in der Validierung betrachtet werden können, nur eingeschränkt qualitativ und quantitativ vergleichbar sind. Das alternative Anbieten beider Möglichkeiten ist jedoch unbedingt erforderlich, um eine systematische Benachteiligung bestimmter AKS-Techniken zu vermeiden. So würde die Gesamtrate für diejenigen AKS, bei denen eine Priorisierung von Flügen vorgenommen wird, deutlich niedriger ausfallen als diejenige von AKS ohne Priorisierung, sodass die Analyse der Schutzrate deutlich repräsentativer für die Gesamtleistung sein kann. Für die Gesamtrate bzw. die Schutzrate werden im Rahmen des vorliegenden Dokumentes aufgrund der eingeschränkten Vergleichbarkeit unterschiedliche Mindestwerte gefordert, die jedoch so gewählt sind, dass sie etwa das gleiche Schutzniveau für die jeweilige Zielvogelart sicherstellen.

Der Ermittlung der Raten gehen definierte empirische Feldversuche (oder GPS-Telemetrie) voraus, die mit adäquaten statistischen Regressionsmethoden (siehe Kapitel 3.3.4) ausgewertet werden. Die finale Schätzung der mittleren Gesamt- oder Schutzrate ist daher schlussendlich mit einem Konfidenzintervall behaftet, welches die Schätzsicherheit reflektiert: je größer das Konfidenzintervall ist, desto unsicherer ist die Schätzung der jeweiligen Rate. Naturgemäß werden die Konfidenzintervalle umso kleiner, je größer die analysierte Stichprobe (z. B. die Zahl der mittels Laser-Rangefinder (LRF) eingemessenen Vögel) ist. Aufgrund der Komplexität ökologischer Daten (z. B. der Korrelationen zwischen verschiedenen erfassten LRF-Punkten) hängt die Größe der Konfidenzintervalle allerdings nicht alleinig von der Stichprobengröße ab, sondern auch von lokalen Versuchs- und Datencharakteristika. Aus diesem Grund werden im Rahmen des vorliegenden Dokumentes keine Stichprobengrößen oder Mindestwerte für die mittlere(n) Rate(n) vorgeschrieben, sondern vielmehr ein Mindestwert für die untere Grenze

des ermittelten Konfidenzintervalls gefordert. Auf diesem Wege wird gleichzeitig erreicht, dass (1) die mittlere Rate ausreichend hoch ist, und (2) mit ausreichender Sicherheit bestimmt wurde. Daher muss die Gesamt- bzw. Schutzrate mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit oberhalb eines definierten Mindestwertes liegen. Die untere Grenze des Konfidenzintervalls der Gesamtrate wurde auf $\geq 70\%$ festgelegt. Eine weitere Plausibilisierung dieses Wertes im Kontext der Machbarkeit ist in Anhang B zu finden. So sei bspw. herausgestellt, dass die damit assoziierte mittlere Gesamtrate i. d. R. bei deutlich über 75% liegen muss, damit der Mindestwert der unteren Grenze des Konfidenzintervalls für realistische Stichprobengrößen die 70% überschreitet. Die untere Grenze des Konfidenzintervalls der alternativ analysierbaren Schutzrate wurde auf $\geq 75\%$ festgelegt.

3.1.2 Definitionen im Kontext von Abschaltentfernungen und Messfehler

Im Folgenden wird detailliert auf verschiedene Begrifflichkeiten eingegangen, die in Kapitel 2 nur in Kurzform wiedergegeben sind.

Der Reaktionsbereich definiert den projektspezifischen zylindrischen 3D-Luftraum um den WEA-Rotormittelpunkt, an dessen Rändern ein Vogel erfasst und klassifiziert werden muss, um eine rechtzeitige Abschaltung der WEA zu gewährleisten. Dieser Zylinder ergibt sich aus dem Reaktionsradius und einer Höhe. Der Reaktionsradius wiederum bestimmt sich über WEA-spezifische Parameter (wie Rotorblattlänge), die Austrudelzeit, die horizontale Fluggeschwindigkeit der Zielart sowie über den örtlichen Messfehler des AKS. Die Höhe des Zylinders ergibt sich ebenfalls aus WEA-spezifischen Parametern (wie der Höhe der Rotordurchläufe), der Austrudelzeit sowie der vertikalen Fluggeschwindigkeit. Mit „Puffer“ (vertikal und horizontal) wird im Kontext des Reaktionsbereiches (und auch des Erfassungsbereichs – s. u.) im Folgenden ein Sicherheitsabstand bezeichnet, welcher der Ausdehnung der WEA hinzuaddiert wird, um zu gewährleisten, dass die Austrudelzeit nicht diejenige Zeit überschreitet, die der Vogel benötigt, um den kritischen Rotorbereich zu erreichen.

Der Erfassungsbereich definiert den 3D-Luftraum um das AKS, welcher im Rahmen der AKS-Validierung (empirische Ermittlung der Raten) verwendet wird und für den eine ausreichend hohe und valide bestimmte Gesamt- bzw. Schutzrate gefordert ist. Im Ge-

nehmungungsverfahren wird überprüft, ob der projektspezifische (zylindrische) Reaktionsbereich durch den (oder einen der untersuchten) Erfassungsbereich(e) abgedeckt ist. Dies ist entweder der Fall, wenn der Reaktionsbereich in dem Erfassungsbereich komplett enthalten ist (bei beliebiger Form des Erfassungsbereichs – horizontaler oder vertikaler Versatz des AKS relativ zur WEA muss berücksichtigt werden) oder aber, wenn der Erfassungsbereich den Reaktionsbereich ringförmig so umläuft, dass damit der relevante Luftraum um den Reaktionsbereich überwacht und somit in den Reaktionsbereich eintretende Vögel zuverlässig erfasst und erkannt werden. Die ringförmige Betrachtung ist insbesondere für diejenigen AKS relevant, die auf das Erfassen / Erkennen über größere Entfernungen spezialisiert sind und primär das Umfeld des Reaktionsbereiches überwachen. Im Falle eines ringförmig umlaufenden Erfassungsbereiches ist ein 2D-Torus vorgegeben, der in die vertikale Achse fortgeführt wird. Dessen Höhe berechnet sich analog zur Höhe des Reaktionsbereichs (oberer / unterer Rotordurchlauf plus eines Puffers in Abhängigkeit von Radius und Fluggeschwindigkeiten) wobei hier als Radius der äußere Radius des Torus verwendet wird (nicht der Reaktionsradius). Der dadurch entstehende zusätzliche Puffer in der vertikalen Achse ist dazu notwendig, die Erfassung aller von oben oder unten an den Reaktionsbereich anfliegenden Vögel in ausreichendem Maße zu gewährleisten. Einzige Bedingungen sind, dass der äußere Radius des Torus größer als der Reaktionsradius und der innere Radius kleiner-gleich dem Reaktionsradius ist (siehe Abbildung 7). Handelt es sich um Mehrkamera-AKS, kommen in den Feldexperimenten für die Validierung i. d. R nur wenige oder einzelne Kameras zum Einsatz. Der Erfassungsbereich kann entsprechend angepasst werden (z. B. ein „Tortenstück“ pro Kamera).

Um eine Anwendung in möglichst vielen Szenarien zu ermöglichen, sollte der Erfassungsbereich möglichst groß gewählt werden. Zusätzlich oder ergänzend dazu können Erfassungsbereiche unterschiedlicher Ausdehnung betrachtet werden (wie z. B. Ringe oder Zylinder mit unterschiedlicher Ausdehnung) um die Übertragung des Grades der Wirksamkeit für verschiedene projektspezifische Reaktionsbereiche zu erleichtern.

Eine Reihe an grafischen Beispielen zu unterschiedlichen Konstellationen aus Reaktionsbereich, Erfassungsbereich und AKS-Position (relativ zur WEA) sind in Abbildung 4 bis Abbildung 7 dargestellt.

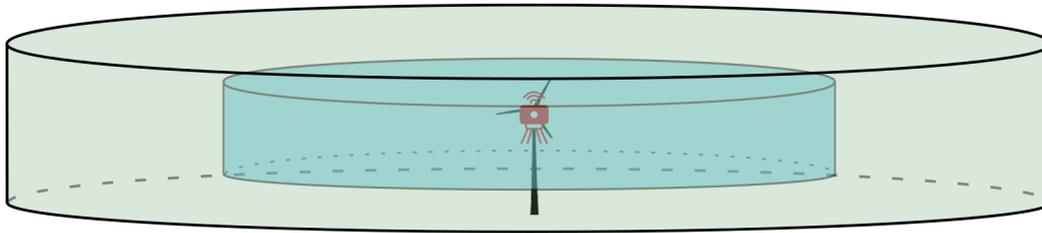


Abbildung 4: Beispiel zylindrischer Erfassungsbereich (grün), der einen Reaktionsbereich (blau) umfasst mit kleiner vertikaler Differenz zwischen Rotormittelpunkt der WEA (schwarz) und AKS (rot).

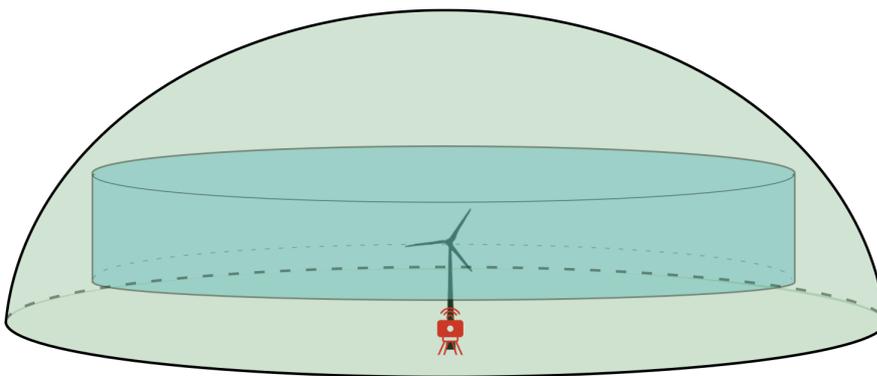


Abbildung 5: Beispiel ellipsoider Erfassungsbereich (grün), der einen Reaktionsbereich (blau) umfasst mit stärkerer vertikaler Differenz zwischen Rotormittelpunkt der WEA (schwarz) und AKS (rot).

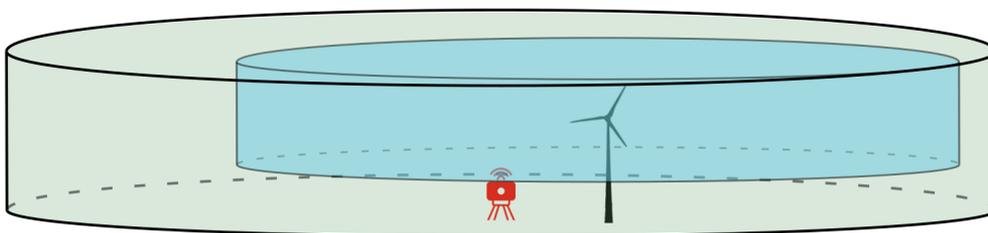


Abbildung 6: Beispiel zylindrischer Erfassungsbereich (grün), der einen Reaktionsbereich (blau) umfasst mit stärkerer horizontaler und vertikaler Differenz zwischen Rotormittelpunkt der WEA (schwarz) und AKS (rot).

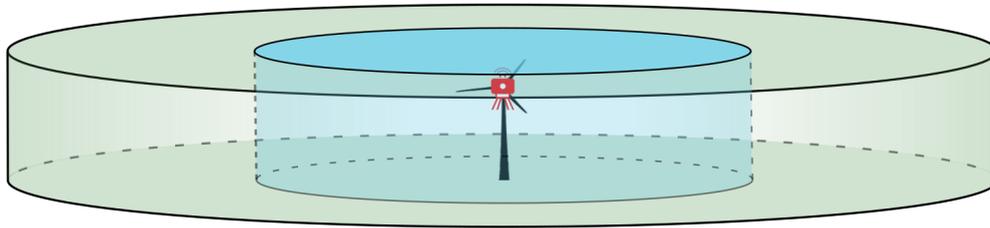


Abbildung 7: Beispiel ringförmiger Erfassungsbereich (grün), der einen Reaktionsbereich (blau) umschließt mit kleiner vertikaler Differenz zwischen Rotormittelpunkt der WEA (schwarz) und AKS (rot).

Für die Bestimmung des Reaktionsbereichs wird in einem ersten Schritt die art- und WEA-spezifische Berechnung des Reaktionsradius benötigt. Die Berechnung dieses Radius ($r_{Reaktion}$) setzt sich aus vier Hauptkomponenten zusammen (siehe Abbildung 8):

1. aus der mittleren artspezifischen horizontalen Fluggeschwindigkeit (v_{Vogel}),
2. aus der Zeit, die vom AKS-induzierten Abschaltensignal bis hin zum Erreichen des Trudelbetriebs der betrachteten WEA vergeht ($t_{Abschalt}$),
3. aus dem mittleren örtlichen relativen Messfehler des AKS ($c_{Messfehler}$) und
4. aus einem Maß $c_{Rotorblatt}$, welches abgeleitet wird aus dem Rotorradius.

Die finale Formel ergibt sich über

$$r_{Reaktion} = (v_{Vogel} \cdot t_{Abschalt} + c_{Rotorblatt}) \cdot (1 + c_{Messfehler}).$$

Es wird der Abstand, den der Vogel im Mittel in der für das Austrudeln der WEA benötigten Zeit zurücklegt („horizontaler Puffer“), mit einem von der Rotorblattlänge abhängigen Maß addiert, und diese Gesamtlänge wiederum mit einem Faktor multipliziert, der den örtlichen Messfehler des AKS repräsentiert. Dieser Formel liegen mehrere konservative, d. h. im Sinne der Vorsorge getroffene Annahmen zugrunde, nämlich (1), dass der Vogel direkt auf den Rotor zufliegt, und (2), dass die Unsicherheiten aus dem örtlichen Messfehler des AKS immer zu einer Unterschätzung der Distanz zwischen Ziel und WEA führt. Aus diesem Grund wird für das Maß $c_{Rotorblatt}$ nicht der gesamte Rotorradius verwendet (was zusätzlich die Annahme reflektieren würde, dass der Vogel direkt auf die auf ihn gerichteten Rotorblattspitzen zufliegen würde), sondern vielmehr ein Maß

für die mittlere dem Vogel präsentierte Rotorblattlänge unter der Annahme beliebiger Winkel zwischen Vogelflugrichtung und Rotorblattebene berechnet.

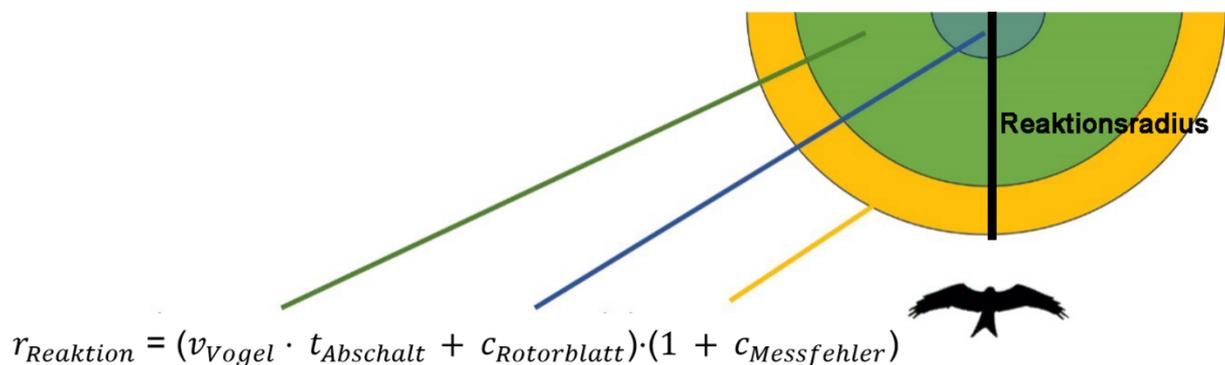


Abbildung 8: Veranschaulichung der verschiedenen Einflussfaktoren zur Berechnung des Reaktionsradius.

Im Folgenden werden die für die Berechnung von r_{Reaktion} benötigten Variablen konkretisiert:

v_{Vogel} : die mittlere artspezifische horizontale Geschwindigkeit des Vogels. Zwecks Standardisierung wurden entsprechende artspezifische Werte berechnet. Erläuterungen und Ergebnisse finden sich in Anhang C. Einheit: Meter pro Sekunde.

t_{Abschalt} : setzt sich additiv aus zwei Unterkomponenten zusammen: der zeitlichen Latenz t_{Latenz} , die den Zeitabstand zwischen dem AKS-induzierten Abschaltsignal und dem Zeitpunkt misst, an dem das Abschaltsignal an der betreffenden WEA ankommt (hier kann es bspw. zu Verzögerungen durch die Priorisierung von Signalen im Kontext der Windparksteuerung kommen), sowie der Dauer t_{Trudel} , welche die Anlage im Mittel benötigt, um vom regulären Betrieb in den Trudelbetrieb zu kommen. Beide Werte sind projektspezifisch und können entweder aus den WEA- / Windpark-Spezifikationen abgeleitet werden oder aber es sind im Rahmen der Validierung plausible Annahmen für diese beiden Größen zu treffen. Einheit: Sekunden.

$c_{\text{Rotorblatt}}$: ein Maß für den mittleren dem Vogel präsentierten Rotorradius unter der Annahme beliebiger Winkel zwischen Vogelflugrichtung und Rotorblattebene. Numerische Berechnungen (siehe Anhang A) zeigen, dass sich der Wert etwa über das 0,637-Fache des Rotorradius berechnet. Einheit: Meter.

$c_{\text{Messfehler}}$: definiert den mittleren relativen örtlichen Messfehler des AKS. Relativ deshalb, weil der Fehler naturgemäß mit der Distanz zwischen AKS und Ziel zunimmt, und deshalb der absolute Fehler (bspw. gegeben in Metern) durch die jeweilige Distanz zwischen AKS und Ziel geteilt wird, um den relativen Messfehler als ein von der Distanz unabhängiges Maß zu erhalten. Werden bspw. als exakt angenommene LRF- oder GPS-Punkte x, y, z innerhalb des Erfassungsbereichs aufgenommen, werden diese mit den vom AKS ermittelten Positionen (a, b, c) verglichen, indem die punktweisen Differenzen berechnet und durch den jeweiligen Abstand (u, v, w) zum AKS geteilt werden ($|x-a|/u, |y-b|/v, |z-c|/w$), deren Mittelwert den relativen örtlichen Messfehler als Wert zwischen 0 und 1 repräsentiert (der Wert 0,1 definiert bspw. einen relativen Messfehler von 10 %). Weitere Möglichkeiten den relativen örtlichen Messfehler zu ermitteln, finden sich in Kapitel 3.3.6. Die Anzahl der Messpunkte sollte mindestens $n=100$ betragen und aus unterschiedlichen Distanzbereichen des Erfassungsbereichs stammen. Einheitenlos.

$c_{\text{Differenz}}$: definiert den Abstand zwischen AKS und WEA. Grundsätzlich muss ein Abstand zwischen AKS und WEA im Kontext des Messfehlers berücksichtigt werden. Um eine Verhältnismäßigkeit zu gewährleisten, da der Messfehler bereits die konservative Annahme enthält, dass sich fehlerhafte Messungen immer zu Ungunsten des Vogelschlagrisikos auswirken, gilt (1) es muss die im Folgenden genannte, leicht veränderte Definition des Reaktionsradius nur dann verwendet werden, wenn das AKS außerhalb des wie oben definierten Reaktionsradius (ohne Messfehler) installiert ist, und (2) bezieht sich der angepasste Messfehler-spezifische Term nicht auf die maximale Distanz zwischen AKS und den Rand des Reaktionsbereiches, sondern den Abstand zwischen AKS und WEA.

Befindet sich das AKS innerhalb des oben definierten Reaktionsradius (hier aber ohne Beachtung des Messfehlers, also $c_{\text{Differenz}} \leq (V_{\text{Vogel}} \cdot t_{\text{Abschalt}} + c_{\text{Rotorblatt}})$) ist keine Anpassung der Formel erforderlich, da sich durch einen leichten Versatz des AKS relativ zur WEA zwar manche Bereiche des Reaktionsbereiches weiter vom AKS entfernen, andere aber dichter am AKS sind als zuvor.

Befindet sich das AKS außerhalb des wie oben definierten Reaktionsradius ohne Messfehler (also $C_{Differenz} > (V_{Vogel} \cdot t_{Abschalt} + C_{Rotorblatt})$), muss der Messfehler-spezifische Term entsprechend angepasst werden, was zu der folgenden Formel führt:

$$r_{Reaktion} = (V_{Vogel} \cdot t_{Abschalt} + C_{Rotorblatt}) + C_{Differenz} \cdot C_{Messfehler}.$$

Diese Formel berücksichtigt somit eine adäquate Vergrößerung des Reaktionsradius für den Fall, dass das AKS außerhalb des Reaktionsbereiches (ohne Messfehler) steht und somit der Abstand zwischen Punkten des Reaktionsbereiches und dem AKS im Mittel gegenüber der Situation, dass das AKS im Nahbereich der WEA installiert ist, vergrößert ist.

Die Höhe des Reaktionsbereiches ergibt sich aus dem oberen und unteren Rotordurchlauf plus einem vertikalen Puffer. Der Puffer ergibt sich wiederum aus derjenigen Höhenänderung des fliegenden Vogels, die im Zuge der horizontalen Durchquerung des Reaktionsradius zu erwarten ist. Die empirischen Messungen legen nahe, dass die untersuchten Vögel artübergreifend etwa 1 m/s vertikale Geschwindigkeiten im Steig- und Sinkflug zeigen (siehe Anhang C). Damit ergibt sich der Puffer (in Einheiten von Metern) direkt aus dem Quotienten von Reaktionsradius und der horizontalen Fluggeschwindigkeit.

3.1.3 Zeitliche Verfügbarkeit

Um ein ausreichend hohes Schutzniveau zu erzielen, sollte ein AKS im artspezifisch erforderlichen Zeitraum eine zeitliche Verfügbarkeit von 95 % bis 98 % erreichen (in Anlehnung an [2]).

Die zeitliche Verfügbarkeit (Zuverlässigkeit) des AKS ist im Rahmen der Validierung (siehe Kapitel 3.3) und der Systemprüfung (siehe Kapitel 3.4.1) zu ermitteln und zu bewerten.

Sowohl geplante als auch ungeplante Ausfallzeiten während der Validierung können im besonderen Einzelfall von der Bewertung ausgeschlossen werden, sofern plausibel dargelegt werden kann, dass die Ursache des Ausfalls im Regelbetrieb ausgeschlossen ist oder jedenfalls nicht mit dem artspezifisch erforderlichen Funktionszeitraum korreliert.

3.2 Entwicklung

Die Entwicklung eines AKS muss einem definierten Prozess folgen, hierzu gibt es verschiedene Grundlagen aus der funktionalen Sicherheit. Die in diesem Prüfrahen formulierten Anforderungen an die Entwicklung eines AKS orientieren sich an den genannten technischen Normen (siehe Kapitel 3).

Bei der Entwicklung muss das AKS, welches im Sinne des Vogelschutzes als Sicherheitssystem zu betrachten ist, klar definiert werden. In der Entwurfsphase soll ein Entwicklungsplan definiert werden, dabei sollen auch die Diagnose- und Fehlererkennungsfunktionen entsprechend dargestellt werden. Im Rahmen der Einfluss- und Wirkungsanalyse (siehe Kapitel 3.2.5) sind mögliche systembedingte Einflüsse, sowohl intern als auch extern, darzustellen und im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen.

Es wird empfohlen, auch die Konzeptions- und Entwicklungsphase durch eine unabhängige Stelle begleiten zu lassen.

3.2.1 Softwareentwicklung

Die Softwareentwicklung sollte einem definierten Prozess folgen /4/, wobei die einzelnen Prozessschritte durch geeignete Funktionstests zu verifizieren sind. Dadurch wird sichergestellt, dass die erforderliche Leistungsfähigkeit des AKS erreicht und systematische Fehler vermieden werden.

Ein Beispiel eines Prozesses zur Softwareentwicklung ist das V-Modell (beschrieben z. B. in DIN EN ISO 13849-1 /4/, siehe Abbildung 9).

Wenn die eingesetzte Software mit einem KI-System arbeitet, ist sicherzustellen, dass das Verfahren zur Entwicklung des KI-Systems für den Anwendungsfall geeignet ist und das System die Zielsetzung versteht. Die grundsätzliche Arbeitsweise des Systems muss verständlich und nachvollziehbar sein und dem Ziel der Sicherheitsfunktion dienen. Bei einem neuronalen Netz ist nicht jeder Entscheidungsbaum direkt nachvollziehbar. Deshalb ist die KI bei der späteren Validierung entsprechenden Funktionstests zu unterziehen (siehe Kapitel 3.3).

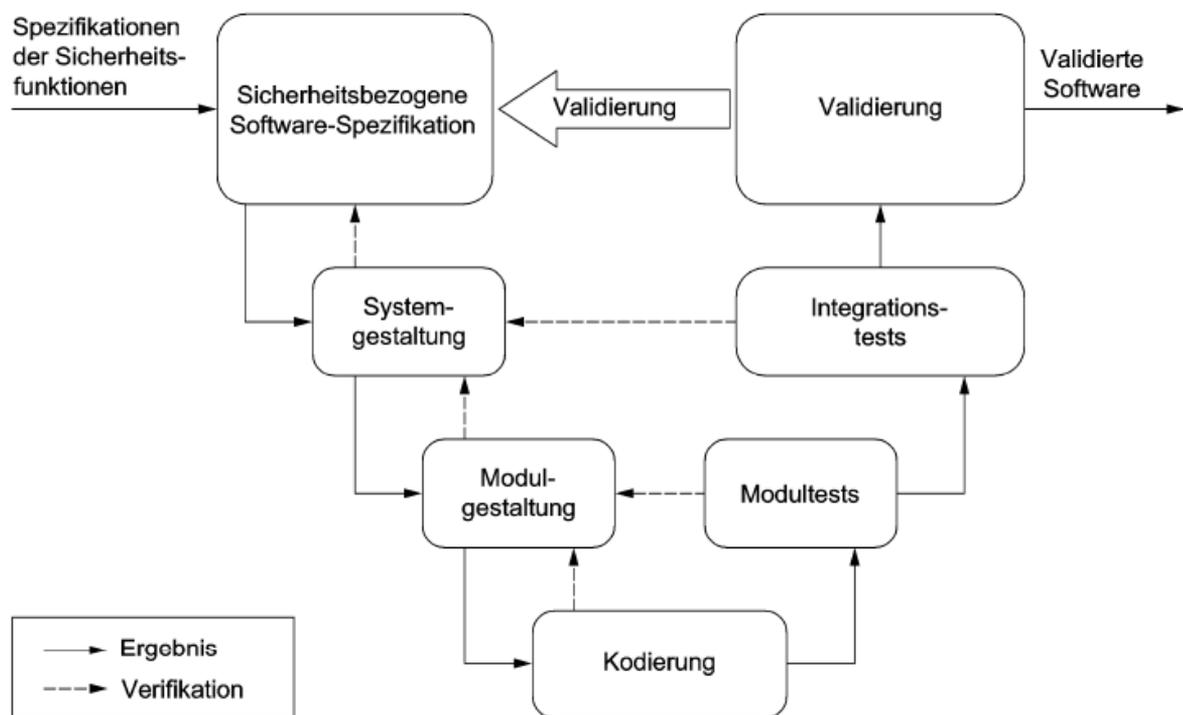


Abbildung 9: Vereinfachtes V-Modell des Software-Sicherheitslebenszyklus (aus /4/).

Im Rahmen der Softwareentwicklung sind potenzielle Einflüsse auf die Funktionsfähigkeit des AKS als Sicherheitsfunktion zu identifizieren und mögliche Gegenmaßnahmen zu erarbeiten (siehe Kapitel 3.2.5). Die Einflüsse und Maßnahmen sind im Rahmen der Systemvalidierung systematisch zu untersuchen (siehe Kapitel 3.3).

Die Software-Spezifikation und die einzelnen Entwicklungsschritte inklusive der Ergebnisse der Tests zur Verifizierung des jeweiligen Entwicklungsschritts sind intern zu dokumentieren. Die Dokumentation sowie das Dokumenten- und das Qualitätsmanagement müssen einem einheitlichen Konzept folgen, welches z. B. an die Vorgaben der DIN EN 61508 angelehnt ist (siehe Kapitel 3.6).

3.2.2 Hardwareentwicklung

Die Hardwareentwicklung sollte einem definierten Prozess folgen, welcher schon in der Entwicklungsphase den kompletten Lebenszyklus der Sicherheitsfunktion berücksichtigt. Die einzelnen Entwicklungsschritte sind durch geeignete Funktionstests zu verifizieren, um sicherzustellen, dass die eingesetzte Hardware die erforderliche Leistungsfähigkeit erreicht und systematische Fehler vermieden werden.

Die Hardwarearchitektur muss so gewählt werden, dass die geforderte Zuverlässigkeit der Sicherheitsfunktion (siehe Kapitel 3.1.3) gewährleistet ist. Dabei ist in erster Linie die technische Verfügbarkeit des Systems durch entsprechende Nachweise in der Hardwaregestaltung zu belegen.

Die Schnittstelle zwischen AKS und WEA muss definiert sein. Die Funktionsfähigkeit muss im Entwicklungs- und Validierungsprozess berücksichtigt werden. Die Einbindung in die WEA-Steuerung ist für die jeweiligen WEA-Typen durch eine unabhängige Stelle bewerten und prüfen zu lassen, sodass sichergestellt ist, dass die Signale des AKS zu den erforderlichen Reaktionen der WEA führen (siehe Kapitel 3.4.3).

Im Rahmen der Hardwareentwicklung sind mögliche Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit des AKS zu identifizieren und mögliche Gegenmaßnahmen zu entwickeln (siehe Kapitel 3.2.5). Die Einflüsse und Maßnahmen sind im Rahmen der Systemvalidierung zu untersuchen (siehe Kapitel 3.3). Zusätzlich sollten im Rahmen der Hardwareentwicklung Maßnahmen zur Verhinderung bzw. Beherrschung systematischer Ausfälle erarbeitet und umgesetzt werden (siehe z. B. DIN EN ISO 13849-1 /4/).

Die Hardware-Spezifikation und die einzelnen Entwicklungsschritte inklusive der Ergebnisse der Tests zur Verifizierung des jeweiligen Entwicklungsschritts sind intern zu dokumentieren. Die Dokumentation sowie das Dokumenten- und das Qualitätsmanagement müssen einem einheitlichen Standard folgen, welcher z. B. an die Vorgaben der DIN EN 61508 /1/ angelehnt ist (siehe Kapitel 3.6).

3.2.3 Modifikationen

Es ist sicherzustellen und durch geeignete Funktionstests nachzuweisen, dass Modifikationen der Soft- oder Hardware die Leistungsfähigkeit des AKS nicht negativ beeinflussen und vorangegangene Prüfergebnisse weiterhin Bestand haben. Hierzu ist jede Modifikation einer Einflussanalyse zu unterziehen, um mögliche Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktion zu identifizieren. Sofern eine Modifikation eine Änderung der Funktionsweise zur Folge hat, ist eine neuerliche Validierung erforderlich (siehe Kapitel 3.4.2).

Sämtliche Modifikationen sind unter Angabe mindestens der folgenden Informationen zu dokumentieren:

- Beschreibung der Modifikation
- Auswirkung der Modifikation
- Betroffene Module
- Ergebnisse der Einflussanalyse
- Beschreibung und Ergebnisse durchgeführter Funktionstests

Die Dokumentation sowie das Dokumenten- und das Qualitätsmanagement müssen einem einheitlichen Konzept folgen, welcher z. B. an die Vorgaben der DIN EN 61508 /3/ angelehnt ist (siehe Kapitel 3.6).

3.2.4 Datenschutz und Datensicherheit

Es ist sicherzustellen, dass die Anforderungen der DSGVO /8/ zum Schutz personenbezogener Daten eingehalten werden. Dies betrifft die Erhebung, Speicherung und Weiterverarbeitung entsprechender Daten. Sofern Maßnahmen zur Gewährleistung des Datenschutzes ergriffen werden, ist sicherzustellen, dass diese keinen negativen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit des AKS haben.

Es sollte ein Datenschutzkonzept erstellt werden, in dem der Umgang mit personenbezogenen Daten geregelt und dokumentiert ist.

Die Zugangsrechte zu den erhobenen Daten müssen klar geregelt und dokumentiert sein. Es sind Maßnahmen zur Verhinderung von Fremdzugriff auf das AKS und die erhobenen Daten zu treffen. Auch ein Fremdzugriff auf die WEA-Steuerung über die Schnittstelle zwischen WEA und AKS ist auszuschließen.

Eine Freigabe der erhobenen Daten für wissenschaftliche Zwecke (z. B. für Studien zum Flugverhalten) ist wünschenswert.

3.2.5 Einfluss- und Auswirkungsanalyse

Die Einfluss- und Auswirkungsanalyse hat zum Ziel, die Auswirkungen und Fehler aufzudecken, welche zu einer Beeinträchtigung der Funktion des AKS als Sicherheitsfunktion für den Vogelschutz führen können. Die Einfluss- und Auswirkungsanalyse sollte frühzeitig im Entwicklungsprozess erstellt werden und muss als Begleitung während der kompletten Entwicklung berücksichtigt und bearbeitet werden.

Die grundsätzliche Produktsicherheit wird an dieser Stelle nicht behandelt, diese ist Teil der CE-Konformitätserklärung, welche für das Inverkehrbringen Voraussetzung ist.

Als mögliche Hilfe bietet sich das Vorgehen nach der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA, Failure Mode and Effects Analysis) an, welche bei der Produktentwicklung im technischen Bereich häufig Anwendung findet und in der DIN EN 60812 /6/ beschrieben ist.

Bei der Einflussanalyse sind alle relevanten Lebensphasen des AKS zu betrachten und im Rahmen der Software- und Hardwareentwicklung (siehe Kapitel 3.2.1 und 3.2.2) entsprechend zu berücksichtigen.

Auf Basis der Anforderungen an das AKS sind die einzelnen Einflussfaktoren zu bewerten. Die Auswirkungen auf das AKS als Sicherheitsfunktion sind im Rahmen der Software- und Hardwarevalidierung entsprechend zu untersuchen, damit geeignete Maßnahmen zur Sicherung des erforderlichen Schutzniveaus (siehe Kapitel 3.1) abgeleitet werden können. Präventionsmaßnahmen zur Verminderung oder Vermeidung eines negativen Einflusses sind zu beschreiben, ebenso wie eventuell verbleibende Auswirkungen.

Die Einflussanalyse ist sauber und nachvollziehbar zu dokumentieren, sodass der Entscheidungsprozess jederzeit vorliegt und prüfbar ist. Für die Dokumentation müssen verantwortliche Personen benannt werden und ein interner Freigabeprozess muss nachvollziehbar definiert sein (siehe auch Kapitel 3.6).

Im Folgenden sind mögliche Einflussfaktoren auf die Funktionsfähigkeit eines AKS aufgelistet. Diese Liste ist exemplarisch und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Je nach Funktionsweise des AKS sind nicht alle der aufgeführten Einflüsse relevant oder zusätzliche Einflüsse zu beachten. Es liegt in der Verantwortung des AKS-Herstellers, die für sein System relevanten Einflüsse zu identifizieren, zu dokumentieren, mögliche Gegenmaßnahmen zu entwickeln und deren Wirksamkeit zu prüfen.

Beispiele für mögliche Einflussfaktoren auf die Funktionsfähigkeit von AKS:

- Wetterparameter (z. B. Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeiten, Wolkensituation)
- Verschattung

- Vibrationen
- Elektromagnetische Interferenzen
- Sonnenstand
- bewegliche Objekte (z. B. Insekten)
- wechselnder Hintergrund (hell / dunkel) bzw. Kontrast (z. B. Vogel vor Himmel vs. Boden)

Sofern ein negativer Einfluss nicht durch geeignete Maßnahmen verhindert werden kann, ist dieser Einfluss in Bezug auf die Wirksamkeit des AKS durch den Hersteller ggf. standort- und projektspezifisch zu bewerten.

3.3 Validierung

3.3.1 Überblick

Ziel der Untersuchung ist ein empirisch ausreichend fundierter Nachweis darüber, dass die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit eines AKS mit hinreichender Zuverlässigkeit erreicht werden: Insbesondere sind in diesen Untersuchungen nicht nur die mittleren Raten zu analysieren, sondern auch diejenigen Faktoren, welche diese Raten maßgeblich beeinflussen können. Letzteres soll Einblick darüber geben, unter welchen Bedingungen die ermittelten Raten auf andere Standorte übertragbar sind. Bestandteil der geforderten empirischen Untersuchungen sind:

- Ermittlung der Raten (Erfassungsrate, Erkennungsrate, Gesamtrate oder Schutzrate, Falsch-Positiv-Rate), sowie
- Ermittlung des relativen örtlichen Messfehlers.

Während weite Teile des Versuchsaufbaus und der -durchführung, der Datenaufbereitung, der statistischen Analysen und der Präsentation und Diskussion der Ergebnisse im Folgenden strukturell vorgegeben sind, werden nur wenige der zu analysierenden Einflussfaktoren (wie z. B. die Distanz zwischen Ziel und AKS sowie die Flughöhe) explizit vorgegeben. Im Einzelfall können sich weitere empirisch zu untersuchende Parameter aus der AKS-spezifischen Einflussanalyse ergeben.

3.3.2 Abdeckung

Da die Effekte einer gegebenenfalls eingeschränkten Abdeckung implizit in der gemessenen Erfassungs- und damit Gesamt- bzw. Schutzrate reflektiert sind, dient die detaillierte Darstellung der Abdeckung am Versuchsstandort nur der Beurteilung der Übertragbarkeit bzgl. anderer Standorte, und die Ergebnisse sind in die entsprechende Erläuterung mit aufzunehmen. Die Abdeckung kann z. B. durch eine GIS-gestützte Analyse der Sichtbarkeit des 3D-Umfelds durchgeführt werden. Die Analyse sollte sich mindestens auf die untersuchten Erfassungsbereiche beziehen.

Einschränkungen in der Abdeckung durch das AKS sollten ausführlich dokumentiert und im Kontext einer Übertragbarkeit anderer Gebiete (z. B. andere Habitate, Konstellationen, Flughöhenverteilungen) erörtert werden.

3.3.3 Erfassungsrates, Erkennungsrates, Gesamtrates, Schutzrates, Einflussfaktoren

3.3.3.1 Versuchskonzept / -plan

Als empirische Basis für die Ermittlung der unterschiedlichen Raten und Einflussfaktoren dienen Feldversuche, in denen beobachterbasiert örtlich-zeitliche Koordinaten von Zielvogelarten mittels LRF eingemessen werden. Diese LRF-Messungen können dann mit den vom AKS erfassten Zielen über eine örtlich-zeitliche Verschneidung beider Datensätze identifiziert werden (vgl. Erfassungsrates) und die vom AKS durchgeführte Klassifizierung mit der beobachterbasierten Artbestimmung abgeglichen werden (vgl. Erkennungsrates). Die Kombination beider Faktoren ermöglicht die Analyse der Gesamt- bzw. Schutzrates. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Standorte einzuschätzen, können zusätzliche Einflussvariablen auf die Gesamt- oder Schutzrates identifiziert und quantifiziert werden. Dies kann bspw. weitere lokale Faktoren wie Entfernung zwischen WEA und Ziel, Flughöhe, lokales Habitat, Licht- oder Wetterbedingungen umfassen. Es sei angemerkt, dass die Ermittlung der Erfassungs- und Erkennungsrates neben LRF-Daten alternativ auch auf GPS-Trackingdaten erfolgen kann. Dabei muss es sich um moderne GPS-Sender handeln, die eine (vergleichbar zu LRF-Daten) hinreichend präzise Höhenmessung erlauben. Zudem kann die Ermittlung der Erkennungsrates auch basierend auf Videodaten aus den AKS erfolgen, sofern die Artbestimmung durch menschliche Expert*innen validiert wird. Dies gilt nicht für die Ermittlung der Erfassungsrates.

Um empirisch valide zu belegen, dass die Gesamt- bzw. Schutzrate einen ausreichend hohen Wert annimmt, spielt nicht nur der berechnete Mittelwert eine wichtige Rolle, sondern auch die damit assoziierte Schätzsicherheit. Letztere kann bspw. über Konfidenzintervalle repräsentiert werden, die naturgemäß umso kleiner werden, je größer die untersuchte Stichprobe ist. Aus diesem Grund wird nicht ein Mindestwert für die Mittelwerte von Raten gefordert (wie z. B. im Kontext der KNE-Checkliste /2/), sondern ein Mindestwert für die untere Grenze des Konfidenzintervalls der Gesamtrate von $\geq 70\%$ bzw. von $\geq 75\%$ bzgl. der Schutzrate (siehe Kapitel 3.1.1). Dies hat den Vorteil, dass dieser Mindestwert nur dann überschritten wird, wenn sowohl die mittlere Gesamtrate als auch deren Schätzsicherheit ausreichend groß sind. Grafische Darstellungen und Analysen dieses Sachverhaltes finden sich im Anhang B.

3.3.3.2 Versuchsstandort, Zeitfenster und Einflussfaktoren

Es ist gefordert, dass die LRF-basierten Erfassungen an mindestens zwei verschiedenen Standorten durchgeführt werden, um die Robustheit der Ergebnisse bzw. deren Übertragbarkeit beurteilen zu können. Die Wahl der lokalen Gegebenheiten an beiden Versuchsstandorten sollte dabei maßgeblich dadurch beeinflusst sein, an welchen Standorten das AKS später zum Einsatz kommen soll. Eine intensive Erläuterung der Standorttypen ist für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Standorte gefordert.

Wird mittels geeigneter Regressionsmethoden (siehe Kapitel 3.3.4) ein signifikanter Unterschied ($p < 0,05$) in den Gesamt- bzw. Schutzraten beider beprobter Standorte ermittelt, so muss dieser Unterschied hinreichend vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Einflussfaktoren beider Standorte plausibilisiert und im Kontext der Übertragbarkeit diskutiert werden.

Die Jahreszeit für die Versuchsdurchführung sollte sich am artspezifischen Anwesenheitszeitraum orientieren.

Neben der Erfassung der LRF-Punkte nebst Artzugehörigkeit müssen für die statistischen Einflussanalysen mittels Regressionsmethoden (siehe Kapitel 3.3.4) auch alle Parameter im Feld aufgenommen werden, die im Kontext der Einfluss- und Wirkungsanalyse identifiziert wurden. Entsprechend müssen die Zeitpunkte der Versuchsdurchführung ausgewählt werden. Dies kann bspw. Erfassungen bei schlechten Wetter-

bedingungen und Dämmerung beinhalten. Die Ergebnisse müssen im Kontext der Einflussanalyse untersucht und bewertet werden. Diejenigen Parameter, die besser über externe Datenbanken oder Geräte akquiriert werden können, müssen nicht im Feld erhoben werden.

Zudem ist insbesondere gefordert, dass differenziert untersucht wird, wie sich die Gesamt- bzw. Schutzrate mit der Entfernung zwischen Ziel und AKS (in 3D oder 2D) und mit der Flughöhe ändert. Hier können zylindrische oder ringförmige Erfassungsbereiche unterschiedlicher horizontaler und vertikaler Ausdehnung untersucht werden, damit eine Übertragung auf andere Szenarien, wie WEA mit anderen Reaktionsbereichen, besser einschätzbar ist. Diese Höhen- und Distanzanalysen können entweder über die Analyse von unterschiedlichen Reaktionsbereichen (siehe Kapitel 3.1.2) oder mit geeigneten Analysemethoden (siehe Kapitel 3.3.4) erfolgen, angewendet auf die Daten eines großen untersuchten Reaktionsbereichs.

Je mehr der o. g. Parameter erfasst und analysiert werden, desto differenzierter ist die Frage der Robustheit und Übertragbarkeit der Ergebnisse einzuschätzen.

3.3.3.3 Datenerhebung und -aufbereitung

Ein zentraler Punkt bei den LRF-Erfassungen ist, dass – soweit möglich – alle während der Feldversuche in den untersuchten Bereich einfliegenden Zielvögel mittels LRF erfasst werden. Der zu untersuchende Bereich umschließt den oder mehrere der Erfassungsbereiche, welche dazu dienen, die ermittelten Raten (siehe Kapitel 3.3.4.1) auf andere Situationen (wie projektspezifische Reaktionsbereiche) zu übertragen. Es darf keine Vorselektion von Flügen oder LRF-Punkten dahingehend geben, dass nur vom AKS gut erfassbare Ziele ausgewählt werden – weder bei der LRF-Erfassung noch bei der anschließenden Datenaufbereitung. Dieser Aspekt ist zentral dafür, dass sich die gegebenenfalls eingeschränkte Abdeckung auch in der Gesamt- bzw. Schutzrate widerspiegelt, auch wenn es sich i. d. R. nicht vermeiden lässt, dass Abdeckungsprobleme von AKS und Beobachtenden Überlappungen zeigen und diese Anforderung daher nicht gänzlich erfüllt werden kann. Letztere müssen dokumentiert und deren Auswirkungen erläutert werden.

Es sollen im LRF-Datensatz mindestens die folgenden Variablen erfasst werden: Track-ID, Vogelart, örtliche 3D-Koordinaten (oder Abstand und Winkel, aus denen letztere berechnet werden können) sowie Datums- und Zeitstempel. Zudem sollten Parameter erhoben werden, die in der Einflussanalyse als kritisch erachtet wurden (siehe Kapitel 3.2.5).

Die AKS-basierten Daten sollen mindestens die folgenden Variablen erhalten: örtliche 3D-Koordinaten (oder Abstand und Winkel, aus denen letztere berechnet werden können), Datums- und Zeitstempel sowie eine Variable, die jedem Trackingpunkt die zu dem entsprechenden Zeitpunkt ausgegebene Vogelklassifizierung zuordnet.

Der final für die statistische Analyse verwendete Datensatz besteht dann aus der Verschneidung beider Datensätze, wobei der LRF-Datensatz als Basis dient und jedem LRF-Punkt das örtlich-zeitlich am nächsten gelegene AKS-Signal zugeordnet wird. Diese Verschneidung wird im vorliegenden Prüfrahen nicht weiter konkretisiert, da sie in hohem Maße systemspezifisch sein kann. Die Sinnhaftigkeit des Zuordnungsalgorithmus muss anhand einer repräsentativen Anzahl und Auswahl von Beispielen untersucht und belegt werden. Zu große örtlich-zeitliche Toleranzen bei der Verschneidung beider Datensätze führen durch die Zuordnung von Fehlzielen zu einer Überschätzung der Erfassungsrates. Dies geschieht dann aber i. d. R. auf Kosten der Erkennungsrates. Dass dies nicht der Fall ist, muss plausibel gezeigt werden.

Es resultiert ein Datensatz für die finale Analyse der Raten, der die beiden binären Variablen „erfasst“ vs. „nicht erfasst“ sowie „richtig klassifiziert / bestimmt“ vs. „nicht richtig klassifiziert / bestimmt“ zu jedem LRF- / GPS- Punkt nebst Track-ID enthält. Es handelt sich also primär um eine Betrachtung auf Punkt- und nicht auf Track-Niveau, wobei letzteres in der statistischen Analyse adäquat berücksichtigt wird (siehe Kapitel 3.3.4.1). Bei der Analyse der Erkennungsrates wird bspw. diejenige Klassifizierung des AKS verwendet, die zum jeweiligen Zeitpunkt des LRF-Punktes (bzw. dem zeitlich / örtlich nächstgelegenen AKS-Punkt) vom AKS vorlag und zur Beurteilung einer möglichen Abschaltentscheidung verwendet wurde.

Aus diesen beiden Variablen kann dann die für die Analyse der Gesamtrates verwendete binäre Variable „erfasst und richtig bestimmt / klassifiziert“ vs. „nicht erfasst oder falsch klassifiziert“ generiert werden. Die Gesamtrates wird somit nicht durch eine Multiplikation entkoppelter Erfassungs- und Erkennungsrates gewonnen, sondern „direkt“ ermittelt.

Die Schutzrate geht noch darüber hinaus, und bewertet LRF- / GPS-Punkte dann als geschützt, wenn sie entweder erfasst und erkannt wurden, bzw. durch zeitgleich näher an der betrachteten WEA liegende LRF- / GPS-Punkte einer erfasst und erkannten Zielvogelart bereits geschützt sind, oder die betrachtete WEA sich bereits im Trudelbetrieb befindet.

3.3.4 Statistische Auswertungsmethoden

3.3.4.1 Analyse der Gesamt- oder Schutzrate

Die im Folgenden diskutierten Analysen beziehen sich auf die Bestimmung der Gesamt- oder Schutzrate, eine entsprechende differenzierte Betrachtung für die Erfassungs- und Erkennungsrate kann erfolgen. Des Weiteren beziehen sich diese Analysen auf Auswertungen von LRF- oder GPS-Punkten. Sollte die Ermittlung der Erkennungsrate basierend auf AKS- statt LRF-Daten erfolgen, muss eine Anpassung der Methode erfolgen, die eine statistisch korrekte Ermittlung der Gesamt- / Schutzrate und deren Konfidenzintervalle ermöglicht.

Die mit den zu analysierenden LRF- oder GPS-Punkten assoziierten, den Raten zugrundeliegenden Variablen sind binär (z. B. „erfasst“ vs. „nicht erfasst“) und somit nicht normalverteilt. Eine Auswertung sollte daher mit „Logistischen Regressionsmodellen“ erfolgen. Zudem sind die einzelnen LRF- / GPS-Punkte nicht als statistisch unabhängig anzusehen, da sie (1) Zeitreihen darstellen und damit zeitlich autokorreliert sein können, und zudem (2) in Individuen bzw. Durchflügen „genestet“ sind, d. h., oft sind mehrere Punkte demselben Durchflug bzw. Individuum zuzuordnen – was beides die statistische Bedingung der Unabhängigkeit verletzt. Die Vernachlässigung beider Sachverhalte kann u. U. zu verzerrten Ergebnissen führen, bspw. unterschätzten Konfidenzintervallen.

Um eine statistisch adäquate Auswertung zu gewährleisten, müssen die Logistischen Regressionsmethoden

- (1) mit geeigneten statistischen Methoden kombiniert werden, welche die gemessene Autokorrelation, sofern diese vorhanden ist, berücksichtigen. Dies kann beispielsweise mithilfe von Autoregressionsstrukturen umgesetzt werden und
- (2) mit „Gemischten Modellen“ (mixed modelling) kombiniert werden, sodass die Track-ID als „random intercept“ integriert werden kann. Zusammengefasst

sollten für die Ermittlung der Raten nebst Konfidenzintervallen also logistische „Generalisierte Lineare Gemischte Modelle“ (GLMMs) verwendet werden, die u. U. die zeitliche Autokorrelation berücksichtigen, und als einzigen Prädiktor den random intercept „Track-ID“ beinhalten.

Zudem ist in einem separaten GLMM der zusätzliche binäre Prädiktor „Untersuchungsgebiet“ zu verwenden, um zu untersuchen, ob es einen signifikanten Unterschied ($p < 0,05$ bei frequentistischen Ansätzen, 95 %-Kredibilitätsintervalle schneiden nicht die Null bei Bayesschen Ansätzen) zwischen den Gebieten gibt.

Weitere Prädiktoren können bei der Analyse von Einflussfaktoren hinzugenommen werden. Im Falle des Betrachtens kontinuierlicher Variablen, wie z. B. die Distanz zwischen LRF-Punkt und AKS, kommen zwei Varianten in Betracht. Es können entweder entsprechende Distanz- oder Höhenklassen / -ringe mittels GLMMs untersucht werden oder stattdessen „Generalisierte Additive Gemischte Modelle“ (GAMMs) verwendet werden. Letztere erlauben es, die kontinuierliche Änderung von Raten bspw. mit der Distanz zu untersuchen und zu visualisieren.

Vor der Auswertung mit den o. g. Regressionsmethoden können LRF- / GPS-Tracks, die kleiner-gleich drei LRF-Punkte enthalten, aus den Daten entfernt werden, da sie im Kontext der oben beschriebenen GLMMs / GAMMs bei oft sehr geringem Anteil an den Gesamtdaten zu einem unverhältnismäßig starken Anstieg der Varianz bzw. zu verzerrten Ergebnissen führen können. Zudem handelt es sich bei LRF- / GPS-Tracks mit nur wenigen Punkten i. d. R. um nicht kollisionsgefährdete Flüge, bei denen der Vogel nur kurzzeitig im Erfassungsbereich auftauchte.

Derzeit bieten z. B. die R-Pakete „MASS“ sowie „R-INLA“ entsprechende Funktionen für die o. g. Regressionsanalysen an. Im Kontext von frequentistischen Methoden ist im Kontext der geforderten 70 % die untere Grenze des 95 %-Konfidenzintervalls für den „Intercept“ des o. g. entsprechenden GLMMs gemeint, im Kontext von Bayesschen Methoden die untere Grenze des 95 %-Kredibilitätsintervalls. Ein vereinfachtes Beispiel-R-Skript zur Auswertung findet sich in Anhang D.

Handelt es sich um Mehrkamera-AKS, ist eine Auswertung von Tracks bzw. Raten, bei denen das Gesamtsystem als erfassende Einheit betrachtet wird, gestattet. Voraussetzung dafür ist, dass alle Kameras durch Datenaustausch gemeinsam eine eindeutige

Reaktion des Gesamtsystems (d. h. ggf. ein Abschaltsignal) erzeugen oder jede Kamera für sich (ohne Priorisierung einzelner Kameras) in der Lage ist, ein Abschaltsignal zu senden.

3.3.4.2 Analyse der Falsch-Positiv-Rate

Die Falsch-Positiv-Rate quantifiziert, in welcher Häufigkeit es zu Abschaltungen durch Nicht-Zielvogelarten kommt. Deren Analyse ist nur dann zwingend gefordert, wenn die Schutzrate analysiert wird. Als Datenbasis dienen sämtliche Abschaltungen, die im Rahmen der oben beschriebenen AKS-Validierungsexperimente zu verzeichnen waren. Zu jeder Abschaltung muss analysiert werden, ob es sich bei dem auslösenden Ziel um die jeweilige Zielvogelart handelte oder nicht. Dies kann basierend auf foto- oder videobasierter Nachbestimmung von archivierten Daten durch Expert*innen erfolgen. Es sei jedoch angemerkt, dass diese Analyse der Falsch-Positiv-Rate mit dem konzeptionellen Problem behaftet ist, dass sie in höherem Maße von dem standortspezifischen Artenspektrum abhängig ist. Die Schätzung dieser Rate ist daher als umso übertragbarer anzunehmen, je mehr unterschiedliche Standorte beprobt werden.

Analysiert wird eine Variable binärer Natur („Zielvogelart“ vs. „keine Zielvogelart“) die – überwiegend analog zu den oben beschriebenen logistischen Regressionsmethoden – ausgewertet werden kann. „Mixed modelling“ muss hier nicht verwendet werden (da es nur einen Datenpunkt pro Flug gibt), wohl aber muss die zeitliche Autokorrelation betrachtet und ggf. berücksichtigt werden. Maximal erlaubte Werte der Falsch-Positiv-Rate (bzw. der Grenzen der entsprechenden Konfidenzintervalle) sind hier nicht gefordert. Es muss zusätzlich dokumentiert werden, (1) welche WEA-Abschaltzeiten angesetzt sind und (2) zu welcher Gesamtzahl und -dauer an Abschaltungen es im analysierten Zeitraum gekommen ist – sowohl als absolute Zahl, als auch relativ zu der Anzahl an parallel erfassten LRF- oder GPS-Flügen (nicht -Punkten) der Zielvogelart im Erfassungsbereich. AKS, die Größenklassen statt Artzugehörigkeit bestimmen, können zusätzlich eine modifizierte Version der Falsch-Positiv-Rate präsentieren, bei der die binäre Variable über „korrekte Größenklasse“ vs. „nicht korrekte Größenklasse“ definiert wird. Ergänzend kann auch die binäre Variable „nach BNatSchG kollisionsgefährdete Art“ vs. „nicht nach BNatSchG kollisionsgefährdete Art“ analysiert und präsentiert werden.

3.3.5 Ergebnisdokumentation

Alle Details zur Datenerhebung, Datenaufbereitung, den verwendeten statistischen Methoden, der Modell-Validierung sowie zu den Ergebnissen sollten nach gängigen peer-reviewed Publikationsstandards dokumentiert und präsentiert werden. Dies betrifft in Bezug auf die Modell-Validierung z. B. pACF-Plots zum Messen der zeitlichen Autokorrelation. Bei den Ergebnissen sollten Mittelwerte und Konfidenzintervalle dokumentiert werden.

3.3.6 Relativer örtlicher Messfehler

Die Bestimmung des örtlichen Messfehlers muss über gezielte Feldexperimente im Erfassungsbereich entlang der unterschiedlichen existierenden Distanzen zum AKS erfolgen. Dies kann bspw. über GPS-lokalisierte Drohnenflüge sein, indem zu jedem Drohnen-GPS-Punkt der entsprechende AKS-Punkt ermittelt, der Betrag der Differenz zwischen beiden Punkten berechnet, und dieser Betrag dann durch den Abstand zwischen GPS-Punkt und AKS geteilt wird. Dies sollte für verschiedene Flüge, Flughöhen und Distanzen durchgeführt werden, und final der Mittelwert über all diese relativen Messfehler gebildet werden. Ein Wert von 0,11 repräsentiert bspw. ein AKS, bei dem der absolute örtliche Messfehler im Mittel 11 % des Abstandes zwischen Ziel und AKS bzw. WEA beträgt.

3.3.7 Abschaltzeit

Da die Zeit, die das AKS-induzierte Abschaltsignal bis zur WEA-Steuerung benötigt (t_{Latenz}) und die Zeit bis zum Erreichen des Trudelbetriebs (t_{Trudel}) WEA-typen- bzw. projektspezifisch sind, sind im Rahmen der Validierung plausible Annahmen für diese beiden Größen zu treffen. Im Rahmen der Genehmigung ist sicherzustellen, dass die Ergebnisse der Validierung für die im Projekt real vorliegende Abschaltzeit gültig sind (siehe Kapitel 3.5.2).

3.3.8 Auswertung und Ablauf der Validierung

Die Validierung muss durch eine unabhängige Stelle begleitet werden. Es wird empfohlen schon die Konzeptionsphase der Validierung durch eine unabhängige Stelle begleiten zu lassen. Der Validierungsprozess muss sicherstellen, dass weder Daten noch Ablauf nachträglich angepasst werden können. Die Datenaufnahme und -auswertung

muss durch die unabhängige Stelle geprüft und auditiert werden. Dies bietet für alle Beteiligten die höchstmögliche Sicherheit bzgl. belastbarer Ergebnisse.

Es ist sicherzustellen, dass die Datenerhebung und Auswertung ohne gegenseitige Einflussnahme erfolgt. Es wird empfohlen diese durch unabhängige Stelle durchführen zu lassen. Darüber hinaus muss die Datenerhebung durch das AKS und mittels LRF strikt voneinander getrennt werden. Ein beiderseitiger Datenabgleich oder Austausch darf während der Versuchsdurchführung und vor der Auswertung nicht stattfinden. Hierzu sind geeignete prüfbare Maßnahmen zu integrieren.

Es wird empfohlen, dass die im Feld erhobenen Daten tagesaktuell auf einen von einer unabhängigen Stelle bereitgestellten Server hochgeladen werden, von welchem diese für die Auswertung heruntergeladen werden müssen. Hierbei muss ein Server- und Datenkonzept verfolgt werden, welches eine Einflussnahme auf die Daten ausschließt.

3.4 Prüfungen

3.4.1 Systemprüfung

Für jedes AKS muss im Rahmen einer Validierung nachgewiesen werden, dass das erforderliche Schutzniveau gegeben ist (siehe Kapitel 3.3). Diese Validierung muss durch eine unabhängige Stelle begleitet und bewertet werden, um sicherzustellen, dass die Anforderungen des Prüfrahmens erfüllt werden. Hierbei sind mindestens die folgenden Punkte auf Richtigkeit, Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit zu überprüfen und zu bewerten:

- Systembeschreibung (Hardware und Software)
- Einflussanalyse
- Versuchsplan
- Versuchsdurchführung (Vor-Ort-Überprüfung)
- Unabhängige Datenerhebung und -auswertung
- Auswertungsmethodik
- Versuchsergebnisse

Sobald ein entsprechender Nachweis über die Funktionsfähigkeit des Systems und die Erfüllung der Vorgaben dieses Prüfrahmens vorliegt, kann das AKS zum Schutz von

Vögeln eingesetzt werden. Der Einsatz ist dabei beschränkt auf im Rahmen der Validierung abgedeckte Szenarien (siehe Kapitel 3.3). Für Einsätze in Situationen, die von denen der Validierung abweichen, oder für Modifikationen während der Betriebsphase ist eine Ergänzungsprüfung durchzuführen.

3.4.2 Ergänzungsprüfung

Ist ein Einsatz eines AKS in einem nach Einflussanalyse abweichenden Szenario geplant, für das die Ergebnisse der bisher durchgeführten Validierung nicht übertragbar sind, oder wenn sich durch eine Modifikation Änderungen der Funktionsweise oder neue Einflussfaktoren ergeben, so ist eine Ergänzungsprüfung durchzuführen (siehe Abbildung 3). Im Rahmen der Ergänzungsprüfung ist nachzuweisen, dass alle Anforderungen analog zur Systemprüfung auch für das neue Szenario erfüllt werden. Dabei kann auf die Ergebnisse der Systemprüfung oder weiterer vorangegangener Ergänzungsprüfungen verwiesen werden, sofern eine Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Prüfungen auf das neu zu bewertende Szenario plausibel begründet werden kann. Die Erfüllung aller weiteren Anforderungen ist im Rahmen der Ergänzungsprüfung durch eine entsprechende Validierung (siehe Kapitel 3.3) nachzuweisen.

Sofern sich für die ergänzend zu prüfenden Szenarien neue Einflüsse auf die Funktionsfähigkeit des Systems ergeben, die im Rahmen der Systemprüfung nicht analysiert wurden, hat dies im Rahmen der Ergänzungsprüfung zu erfolgen.

Jede Ergänzungsprüfung muss durch eine unabhängige Stelle begleitet und bewertet werden, wobei die Prüfvorgaben aus Kapitel 3.4.1 zu erfüllen sind.

3.4.3 Schnittstelle zwischen AKS und WEA

Durch eine unabhängige Stelle ist nachzuweisen, dass die Einbindung des AKS in die WEA-Steuerung oder Parksteuerung den Betrieb der WEA nicht beeinträchtigt und die WEA bei einem Abschaltsignal zuverlässig und zeitnah (gemäß Zulassungsbedingungen) in den Trudelbetrieb wechselt.

Im Rahmen der Untersuchung sollten die technische Datenverbindung des AKS in das Betriebsführungssystem der WEA, die praktische Installation, die Testmöglichkeiten im

Rahmen der Inbetriebnahme und der wiederkehrenden Prüfungen bzw. Wartungen sowie die Sicherheitsmaßnahmen zur Verhinderung eines frühzeitigen Wiederanlaufens der WEA untersucht und bewertet werden.

Ein entsprechender Nachweis ist für jeden WEA-Typ, in den das AKS eingebaut werden soll, zu erbringen. Dieser Nachweis ist spätestens im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für die geplante Windparkkonfiguration vorzulegen. Die Prüfung erfolgt theoretisch und beruht auf vorliegenden Daten zu technischen Spezifikationen.

3.4.4 Wiederkehrende Prüfungen

Die Funktionalität des AKS ist betriebsbegleitend im Rahmen der vorgesehenen Prüfungen des Sicherheitssystems und der sicherheitstechnisch relevanten Komponenten der WEA durch eine unabhängige Stelle regelmäßig nachzuweisen. Hierbei sind auch die Wartungsprotokolle (siehe Kapitel 3.4.5) zu prüfen.

Das Zeitintervall für die wiederkehrende Prüfung des AKS sollte mindestens dem der regelmäßigen wiederkehrenden Prüfung der WEA entsprechen (siehe Richtlinie für Windenergieanlagen, Kapitel 15, DIBt 2015 /10/).

3.4.5 Wartungen

Für Wartungsarbeiten am AKS muss ein Wartungshandbuch erstellt werden, in dem alle notwendigen Vorkehrungen und Arbeitsschritte, die im Rahmen der Wartung durchzuführen sind, beschrieben werden. Die Beschreibungen müssen so detailliert sein, dass sie vom Personal, welches die Wartung vornimmt, verstanden werden können.

Nach Abschluss der Wartungsarbeiten ist ein Funktionstest durchzuführen und ein Wartungsprotokoll auszufüllen. In diesem sind die ausgeführten Arbeitsschritte und Funktionstests gemäß Wartungshandbuch abzuhaken, die Ergebnisse der Funktionstests zu dokumentieren und anzugeben, von wem sie durchgeführt wurden.

Es ist sicherzustellen, dass das erforderliche Schutzniveau auch während planmäßiger Wartungsarbeiten erhalten bleibt. Dies kann zum Beispiel erreicht werden, in dem während der Wartungsarbeiten die WEA abgeschaltet wird oder die Wartungsarbeiten innerhalb des genehmigungsrechtlich definierten Zeitraums durchgeführt werden.

3.4.6 Prüfbericht

Von der unabhängigen Stelle ist ein abschließender Prüfbericht zu erstellen. Dieser ist eindeutig zu verfassen und der Genehmigungsbehörde zur Verfügung zu stellen. Dabei sind die Ergebnisse sowie alle Auffälligkeiten und Abweichungen vom Prüfrahmen sauber zu dokumentieren.

Zusätzlich ist eine kurze Zusammenfassung zu erstellen, welche eindeutig darlegt, ob und wie die Anforderungen des Prüfrahmens erfüllt werden. Dabei müssen auch die Randbedingungen des Systems genau definiert werden. Die Detailtiefe muss so gewählt werden, dass die genehmigende Behörde die Leistungsfähigkeit des Systems artspezifisch prüfen und nachvollziehen kann.

3.5 Betriebsphase

3.5.1 Installation

Für die Installation des AKS ist ein Installationshandbuch zu erstellen, in dem alle notwendigen Vorkehrungen und Arbeitsschritte, die im Rahmen der Installation durchzuführen sind, beschrieben werden. Die Beschreibungen sollten so detailliert sein, dass sie vom Personal, welches die Installation vornimmt, verstanden werden können.

Der Nachweis einer Prüfung der Einbindung des AKS-Systems in die Systemsteuerung des entsprechenden WEA-Typs durch eine unabhängige Stelle (siehe Kapitel 3.4.3) muss vor Beginn des Regelbetriebs der WEA bzw. des genehmigungsrechtlichen Einsatzzeitraumes des AKS vorliegen.

Nach Abschluss der Installation ist ein Installationsprotokoll auszufüllen. In diesem sind die ausgeführten Arbeitsschritte gemäß Installationshandbuch abzuhaken und anzugeben, von wem sie durchgeführt wurden.

3.5.2 Inbetriebnahme

Für die Inbetriebnahme des AKS ist ein Inbetriebnahmehandbuch zu erstellen, in dem alle notwendigen Vorkehrungen und Arbeitsschritte, die im Rahmen der Inbetriebnahme durchzuführen sind, beschrieben werden. Die Beschreibungen sollten so detailliert sein, dass sie vom Personal, welches die Inbetriebnahme vornimmt, verstanden werden können.

Die Funktionsfähigkeit des AKS sowie die Signalübertragung an die WEA sind im Rahmen der Inbetriebnahme durch Funktionstests nachzuweisen. Die Durchführung und Auswertung der Funktionstests sollte von einer unabhängigen Stelle begleitet werden.

Nach Abschluss der Inbetriebnahme ist ein Inbetriebnahmeprotokoll auszufüllen. In diesem sind die ausgeführten Arbeitsschritte und Funktionstests gemäß Inbetriebnahmehandbuch abzuhaken, die Ergebnisse der Funktionstests zu dokumentieren und anzugeben, von wem sie durchgeführt wurden.

3.5.3 Betrieb

Zur Sicherstellung eines planmäßigen und reibungslosen Betriebs sowie einer hohen zeitlichen Verfügbarkeit sollte ein Betriebshandbuch erstellt werden, in dem betriebs- und sicherheitsrelevante Fehlermeldungen und Handlungsanweisungen zur Behebung beschrieben sind, um sicherzustellen, dass unplanmäßige Ausfälle zeitnah erfasst und behoben werden. Sofern regelmäßig Funktionstests durchgeführt werden (z. B. zur Kalibrierung), ist der Ablauf dieser Tests ebenfalls zu beschreiben. Die Ergebnisse dieser Tests sind zu dokumentieren. Die Beschreibungen sollten leicht verständlich und nachvollziehbar sein.

Sofern sich durch Modifikationen im laufenden Betrieb Änderungen an den möglichen Fehlermeldungen bzw. Handlungsanweisungen ergeben, ist das Betriebshandbuch zu aktualisieren.

Planmäßige Ausfallzeiten, bspw. während Wartungsarbeiten, sollten einen möglichst geringen Einfluss auf die Funktion des AKS haben. Dies kann sichergestellt werden, indem die Ausfallzeiten so geplant sind, dass die Arbeiten außerhalb des in der Genehmigung definierten artspezifischen Anwesenheitszeitraums durchgeführt werden oder die WEA abgeschaltet wird.

Bei unplanmäßigen Ausfällen ist stets eine Fehlerdiagnose durchzuführen. Auf Basis der Ergebnisse der Fehlerdiagnose sollten Maßnahmen abgeleitet werden, um ein erneutes Eintreten dieses Fehlers zu verhindern. Sofern Reparatur- oder Instandhaltungsarbeiten erforderlich sind, ist nach Abschluss der Arbeiten ein Funktionstest durchzuführen (siehe Kapitel 3.5.2).

Jeder unplanmäßige Ausfall ist zu dokumentieren. Hierbei sind die Ergebnisse der Fehlerdiagnose sowie die daraus abgeleiteten Maßnahmen zur zukünftigen Fehlervermeidung, die Beschreibung der durchgeführten Reparaturmaßnahmen sowie die Ergebnisse des Funktionstests darzulegen.

3.6 Dokumentation und Qualitätsmanagement

Die interne Dokumentation und das grundlegende Qualitätsmanagement sollten sich an den Grundzügen der gängigen Standards wie DIN EN ISO 9001 /7/ oder DIN EN 61508 /1/ orientieren. Die Dokumentation muss eindeutig, übersichtlich, nachvollziehbar und leicht verständlich sein. Ziel der Dokumentation ist es systematische Fehler im Entwicklungsprozess zu vermeiden und den Entwicklungsprozess prüf- und nachvollziehbar zu gestalten. Alle relevanten Lebensphasen von der Entwicklung über die Verifizierung, Validierung und Betrieb müssen dokumentiert werden. Die Dokumentation muss ein Mindestmaß an Informationen enthalten, welche dem Zweck der einzelnen Dokumente dient. Es sollte ein gut pflegbares und verständliches Dokumentenmanagementsystem intern eingerichtet werden. Die Struktur muss dem Zweck dienen und prüfbar sein. Die einzelnen Dokumente sollten mindestens die folgenden Punkte enthalten:

- Eindeutiger Titel und Bezeichnung des Dokumentes
- Anwendungsbereich (Zweck des Dokumentes)
- Register und Inhaltsverzeichnis
- Revision, Versionsnummer, Datum
- Dokumentenlenkungsinformationen
- Informationen zur Freigabe und Prüfung
- Dokumentenverantwortlichkeit

Für das Qualitätsmanagement müssen alle Arbeitsschritte einem internen Freigabeprozess angeschlossen werden. Hierbei sollte das Vier-Augen-Prinzip angewendet werden, wobei Entwickler und Prüfer unabhängig voneinander sind. Das Qualitätsmanagement muss sich an den Anforderungen an das AKS (siehe Kapitel 3.1) orientieren. Diese müssen im Entwicklungsprozess klar definiert werden.

Für alle Lebensphasen des AKS müssen klare Verantwortlichkeiten für die einzelnen Prozessschritte festgelegt werden. Die Schnittstellen zwischen den Phasen müssen definiert werden, um Verluste zwischen einzelnen Projektbeteiligten zu vermeiden. Die Verantwortlichen müssen die Leistungsfähigkeit des AKS in allen Lebensphasen im Fokus haben. Kommt es während einer Lebensphase des AKS zu Ausfällen oder Abweichungen vom Soll-Zustand, sind diese zu dokumentieren und Maßnahmen zu ergreifen, um ein erneutes Auftreten zu verhindern.

Quellenverzeichnis

- /1/ KNE 2019. Anforderungsprofil „Anforderungen an eine fachlich valide Erprobung von technischen Systemen zur bedarfsgerechten Betriebsregulierung von Windenergieanlagen“.
- /2/ Bruns, E., Schuster, E., Streiffeler, J., 2021. Anforderungen an technische Überwachungs- und Abschaltssysteme an Windenergieanlagen – Abschlussbericht der Workshopreihe „Technische Systeme“. BfN Skript 610.
- /3/ DIN EN 61508. Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme. Februar 2011.
- /4/ DIN EN ISO 13849-1. Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze (ISO 13849-1:2015). Juni 2016.
- /5/ DIN EN 62061. Sicherheit von Maschinen – Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer und programmierbarer elektronischer Steuerungssysteme. Oktober 2005.
- /6/ DIN EN 60812. Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA). August 2015.
- /7/ DIN EN ISO 9001. Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen. November 2015.
- /8/ DSGVO. Verordnung (EU) 2016/679 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. April 2016 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten, zum freien Datenverkehr und zur Aufhebung der Richtlinie 95/46/EG.
- /9/ ProdSG. Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt (Produktsicherheitsgesetz – ProdSG). Fassung vom 27.07.2021.
- /10/ Deutsches Institut für Bautechnik – DIBt: Richtlinie für Windenergieanlagen, Auswirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung, Stand: Oktober 2012 – Korrigierte Fassung März 2015.

Die Berechnung der horizontalen und vertikalen Fluggeschwindigkeiten wäre nicht möglich gewesen ohne die Vielzahl an Personen und Institutionen, die uns für dieses Projekt empirische Daten zur Verfügung gestellt haben.

Bzgl. GPS-Bewegungsdaten zu unterschiedlichen Vogelarten bedanken wir uns herzlich (alphabetisch geordnet) bei:

BioConsult SH (B. Grajetzky, F. Schulze), BIOPLAN GbR (C. Heuck et al.), der Bundesarbeitsgruppe für Greifvogelschutz (B.U. Meyburg), Ökon (R. Vohwinkel), dem Dachverband Deutscher Avifaunisten (DDA – J. Katzenberger, i. A. Bundesamt für Naturschutz), e3 GmbH (M. Rohde, M. Stubbe, V. Jacke), dem IZW Berlin (O. Krone), dem Max-Planck-Institut für Verhaltensbiologie sowie dem LUBW Landesamt für Umwelt (i. A. des Landes Baden-Württemberg) (W. Fiedler, N. Reschke, K. Safi) bzw. dem LifeTrack Golden Eagle Projekt, dem Michael Otto Institut im NABU Bergenhusen (K.-M. Thomsen), der Schweizer Vogelschutzwarte (J. Aschwanden), den frei zugänglichen Daten aus der Publikation (Santos et al., 2022). Stg. Boomtop (J. van Diermen), der Vogelschutzwarte Neschwitz (W. Nachtigall), dem Wildtierkataster Schleswig-Holstein (C. Hertz-Kleptow), sowie dem Wirtschaftsministerium Hessen (I. Otto), dem Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW – F. Musiol).

Bzgl. Kamera-, LRF- und/oder Radardaten bedanken wir uns herzlich (alphabetisch geordnet) bei:

BioConsult SH (B. Grajetzky, F. Schulze), e3 GmbH (M. Rohde, M. Stubbe, V. Jacke), bei OekoFor GbR (H. Reers, S. Greule), der WestWind Projektierungs GmbH (L. Langeleh), dem Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW – F. Musiol) bzw. dem Projekt „NatForWinSent“ (i. A. Bundesamt für Naturschutz).

Hendrik Reers und Sören Greule (OekoFor) danken wir herzlich für viele hilfreiche Diskussionen und Anregungen zur statistischen Analysen der horizontalen und vertikalen Fluggeschwindigkeiten sowie den Definitionen des Reaktions- und Erfassungsbereichs.

Beteiligte am Arbeitsprozess

Wir danken folgenden Personen für die Bereitschaft zur Teilnahme am Arbeitskreis und die aktive Mitwirkung an der Texterstellung:

Mitglieder des Arbeitskreises

Esther Clausen	ProTecBird GmbH (AVES)
Ludovic Douay	Nordex SE
Jonathan Eberlein	Bundesverband Windenergie Schleswig-Holstein
Katharina Eggers	ENERCON Global GmbH
Fritz Heydemann	NABU Schleswig-Holstein e.V.
Nicole Knudsen	Landesverband Erneuerbare Energien Schleswig-Holstein e. V.
Bernd Koop	Ornithologische Arbeitsgemeinschaft Schleswig-Holstein und Hamburg e. V.
Ferdinand Kübler	Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH (BirdVision)
Katharina Pohl	Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH (BirdVision)
Thoralf Raßmann	ProTecBird GmbH (AVES)
Maria Rohde	e3 IDF GmbH (IdentiFlight)
Gerd Simon	BUND Landesverband Schleswig-Holstein e.V.
Moritz Stubbe	e3 IDF GmbH (IdentiFlight)
Irene Wietz	Vestas Deutschland GmbH
Rebecca Wirth	Bürgerwindpark Hohenlohe GmbH (BirdVision)
Irmela Feige	Moderation
Dr. Moritz Mercker	Bionum GmbH - Büro für Biostatistik
Frederik Lautenschlager	TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG
Nikolas Cromm	TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG
Andreas Schneider	TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG
Johannes Fischer	Landesamt für Umwelt Schleswig-Holstein
Nadine Böhre	Landesamt für Umwelt Schleswig-Holstein
Sabine Müller	Landesamt für Umwelt Schleswig-Holstein
Lea Bütje	Landesamt für Umwelt Schleswig-Holstein

Juristische Beratung

Dr. Julia Hoffmann	Weiss & Müller Rechtsanwaltsgesellschaft mbH
Dr. Andreas Weiss	Weiss & Müller Rechtsanwaltsgesellschaft mbH

Anhang A: Berechnung des mittleren, dem Vogel gegenüber präsentierten Rotorradius

Im Kontext der Formel zur Berechnung des Reaktionsradius (siehe Kapitel 3.1.2) wird nicht der gesamte Rotorradius verwendet. Dies würde die Annahme reflektieren, dass der Vogel direkt auf die auf ihn gerichteten Rotorblattspitzen fliegen würde. Vielmehr wird ein Maß für den mittleren dem Vogel präsentierten Rotorradius unter der Annahme beliebiger Winkel zwischen Vogelflugrichtung und Rotorblattebene verwendet. Der berechnete Wert liegt bei 0,637. Numerisch erfolgt die Berechnung, indem für einen Halbkreis (diskretisiert in kleine Fragmente gleichen Abstandes auf dem Kreis) der Mittelwert über seine Tiefe berechnet wird. Jeder der diskretisierten Punkte beschreibt hier eine mögliche Rotorebenenstellung relativ zur Flugrichtung. Zeigen die Rotorblätter genau in Flucht des anfliegenden Vogels, so hat die Tiefe einen Wert von 1, fliegt der Vogel genau rechtwinklig zur Rotorebene an, liegt die Tiefe bei 0.

Der entsprechende R-Code zur Berechnung ist wie folgt:

```
library(dagR)
d <- data.frame()
for(r in seq(0,pi,0.001))
{
d <- rbind(d,anglePoint(c(0,0),r,1))
}
plot(d[,1]~d[,2])
mean(abs(d[,1]))
```

Anhang B: Plausibilisierung der Grenzwerte von Gesamtrate und Schutzrate

Anstelle einer Vorgabe von Mindestwerten für die mittlere Erfassungs- bzw. Erkennungsrate (siehe /1/) wird ein Mindestwert für die untere Grenze des Konfidenzintervalls der Gesamtrate vorgegeben. Bei der Festlegung eines entsprechenden Mindestwertes stand im Fokus, dass dieser Wert einen sinnvollen Kompromiss zwischen naturschutzfachlichen Idealwerten und realistisch umsetzbarem Feldaufwand widerspiegelt. Aus diesem Grund wurden Simulationsstudien durchgeführt. Diese basierten auf realen, im Kontext des vorliegenden Projektes von den Teilnehmenden bereitgestellten Felddaten. Hierbei dienten die realen Daten als Vorlage dafür, wie viele LRF-Punkte im Mittel pro LRF-Track vorliegen und wie stark die Daten zeitlich autokorreliert sind. Basierend auf den jeweils untersuchten hypothetisch angenommenen Gesamtraten wurde schließlich der kombinierte Erfassungs- und Erkennungsschritt mittels Monte-Carlo-Techniken nachsimuliert. Die Auswertung erfolgte mit dem R-Paket MASS gemäß Kapitel 3.3.4.1.

Insbesondere wurde – unter der Annahme verschiedener mittlerer Gesamtraten und Stichprobengrößen – die Höhe der unteren Grenze der Konfidenzintervalle berechnet, visualisiert und in der Runde der Expert*innen diskutiert. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abbildung B10 gezeigt.

Es zeigt sich, dass bereits für Gesamtraten ab etwa 80 % knapp 100 LRF-Tracks ausreichen, um mit der unteren Grenze des Konfidenzintervalls oberhalb von 70 % zu liegen. Diese benötigte Anzahl an LRF-Tracks reduziert sich deutlich mit steigender simulierter Gesamtrate: bei 82 % simulierter Gesamtrate liegt die benötigte Anzahl an LRF-Tracks nur noch bei knapp 80, bei 85 % bei knapp 40 und bei 87 % bei etwa 20 benötigter LRF-Tracks.

Die Plausibilisierung des Grenzwertes von 75% für die untere Grenze des Konfidenzintervalls der Schutzrate erfolgte weitestgehend analog.

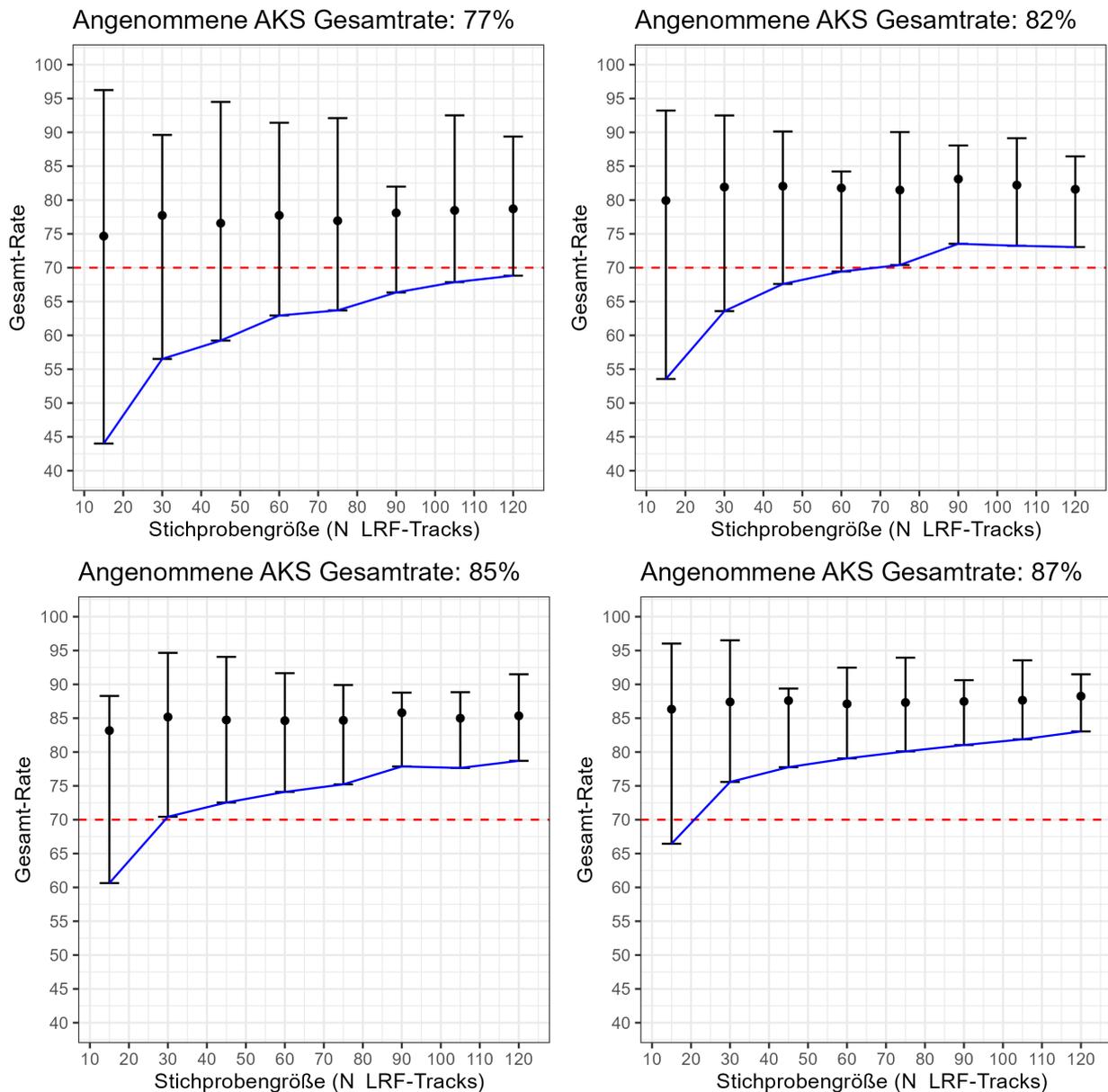


Abbildung B10: Statistische Auswertung der Gesamtrate

Statistische Auswertung der Gesamtrate nebst Konfidenzintervallen basierend auf unterschiedlichen Anzahlen an simulierten LRF-Tracks in Kombination mit spezifischen simulierten AKS-Gesamtraten. Die jeweilige x-Achse zeigt die Anzahl an ausgewerteten LRF-Tracks an, die schwarzen Punkte die empirisch ermittelte mittlere Gesamtrate, die schwarzen Balken die 95%-Konfidenzintervalle und die zugrunde gelegte Gesamtrate ist im Titel der Unterabbildungen angezeigt. Die rote gestrichelte Linie zeigt den geforderten Grenzwert für die untere Grenze des Konfidenzintervalls von 70 % an, die blaue Linie zeigt die untere Grenze der ermittelten Konfidenzintervalle an. Je höher die zugrunde gelegte simulierte Gesamtrate ist, desto kleinere Anzahlen an LRF-Tracks sind notwendig, um mit der unteren Grenze des Konfidenzintervalls über den geforderten Grenzwert von 70 % zu kommen.

Anhang C: Berechnung von artspezifischen Fluggeschwindigkeiten und Höhendifferenzen

Basierend auf einer umfangreichen empirischen Datengrundlage von Vogelbewegungsdaten wurden vertikale und horizontale artspezifische Fluggeschwindigkeiten bestimmt. Der Fokus lag auf den in Anlage 1 zu § 45b Absatz 1-5 BNatSchG beschriebenen 15 windkraftsensiblen Brutvogelarten. Die durchgeführten Berechnungen dienen der Vereinheitlichung der im Kontext der Berechnung des Reaktionsradius rechnerisch verwendeten Geschwindigkeiten.

DATEN UND METHODEN

Für die Analyse der horizontalen und vertikalen Fluggeschwindigkeiten wurden im Vorfeld folgende Punkte diskutiert und die grundsätzliche Vorgehensweise festgelegt:

- Ist die Ermittlung der realen Fluggeschwindigkeit sinnvoll? Vögel zeigen ein komplexes, i. d. R. kurvigtes Flugverhalten. Bezogen auf AKS ist jedoch nur relevant, wie die „effektive Geschwindigkeit über Grund“ auf der Länge des Reaktionsradius ist. Durch das kurvige Flugverhalten kann die Geschwindigkeit also niedriger ausfallen als die reale Geschwindigkeit. Auf der anderen Seite zeigen Vögel unterschiedliche Verhaltensmodi im Flug wie beispielsweise gerichteten, schnellen Flug oder langsames Suchverhalten. Die Berechnung von Mittelwerten über alle Bewegungsdaten könnte zu einer Unterschätzung des kritischeren Modus (assoziiert mit hoher Geschwindigkeit) führen. Basierend auf diesen beiden Überlegungen wurden im Vorfeld exemplarische Szenarien analysiert, bei denen die Berechnung simpler Mittelwerte mit komplexeren Berechnungen verglichen wurden. Letztere berücksichtigen sowohl nur Daten des kritischeren Verhaltensmodus (schneller, gerichteter Flug – klassifiziert über die Methoden von Garriga et al., 2016) als auch die effektive Fluggeschwindigkeit (über die Länge des jeweiligen Reaktionsradius) statt der realen Geschwindigkeit – um beiden Bedenken gleichzeitig Rechnung zu tragen. Exemplarisch evaluiert für verschiedene Vogelarten lagen beide Werte oft nah beieinander, und keine der beiden Methoden

zeigte konsequent höhere bzw. niedrigere Werte. Dies liegt vermutlich daran, dass sich die beiden bei der komplexen Berechnung berücksichtigten Effekte etwa gegenseitig aufheben. Aus diesem Grund wurde sich darauf geeinigt, die einfachere Berechnungsmethode zu verwenden, nämlich die Ermittlung von realen Fluggeschwindigkeiten aus der Menge aller verfügbaren Flugdaten unabhängig vom Verhaltensmodus. Diese Methode ist durch die geringere Komplexität weniger fehleranfällig und besser vermittelbar.

- Vertikale Fluggeschwindigkeiten sind i. d. R. deutlich geringer als die horizontalen Fluggeschwindigkeiten, eine Ausdehnung des Reaktionsradius in die vertikale Achse ist daher nicht sinnvoll. Stattdessen werden die vertikalen Fluggeschwindigkeiten artspezifisch ermittelt. Sofern keine deutlichen artspezifischen Differenzen auftreten, kann eine artübergreifende Höhe des vertikalen Puffers des Erfassungsbereiches definiert werden.

Datengrundlage

Die Berechnung der horizontalen und vertikalen Fluggeschwindigkeiten basiert auf einem umfassenden Datensatz bestehend aus GPS-Trackingdaten, LRF-Erfassungen sowie kamera- und radarbasierten Erfassungen. Diese Daten wurden in einer Vielzahl von Projekten erhoben und umfassen insgesamt 34.589.963 Datenpunkte. Die Verteilung der Datenpunkte auf die einzelnen Arten kann jeweils in Abbildung C12 bis Abbildung C25 entnommen werden.

Berechnung horizontale Fluggeschwindigkeit

Bei der statistischen Analyse von Bewegungsdaten muss berücksichtigt werden, dass es sich um Zeitreihen und somit um i. d. R. zeitlich autokorrelierte Daten handelt (Mercker et al., 2021). Zudem kommt erschwerend hinzu, dass die Daten zeitlich diskretisiert vorliegen, wobei sowohl die Regelmäßigkeit als auch die mittlere Größe der Diskretisierungsintervalle in hohem Maße von der Erfassungsmethode abhängt: im Falle von kamera- bzw. radarbasierten Daten kann die Diskretisierung im Sekunden- oder sogar Millisekundenbereich liegen, wohingegen GPS-basierte Daten i. d. R. in einer Taktung von 1 Sekunde bis hin zu vielen Minuten vorliegen. LRF-Daten sind hingegen in hohem Maße unregelmäßig diskretisiert, wobei sich die Diskretisierung hier i. d. R. im Bereich

zwischen einer Sekunde und einer Minute bewegt. Auf die Diskretisierung muss bei der vorliegenden Analyse in besonderem Maße geachtet werden, da die approximierte Fluggeschwindigkeit ($v = \Delta \text{Strecke} / \Delta \text{Zeit}$) wiederum von dem Grad der Diskretisierung abhängt: Da ein Vogel meist keine lineare Flugbahn zeigt, wird das berechnete v umso kleiner, je gröber die Taktung ist, weil kurvig fliegen zwischen den Diskretisierungspunkten nicht berücksichtigt werden kann. Um sowohl diesen Sachverhalt adäquat zu berücksichtigen als auch die große Heterogenität an Bewegungsdaten integrativ analysieren zu können, wurden die Daten separat für jede betrachtete Art wie folgt analysiert. „Punkt“ bezeichnet im Folgenden ein in der 2D-Ebene verorteter Punkt mit Zeitstempel.

1. Alle Punkte eines Tracks im Subsekundenbereich wurden für jede volle Sekunde gemittelt. Dies vermindert die Stärke des örtlichen Fehlers, der u. U. besonders im kleinskaligen zeitlichen Bereich relativ stark verglichen zur zurückgelegten Strecke ist. Zudem wurden nur Flugpunkte in einer Höhe von 25 - 300 Meter inkludiert, um das im Vogelschlagkontext relevante Flugverhalten zu untersuchen. Bspw. das Suchverhalten dicht über dem Boden oder thermisches Kreisen in größeren Höhen könnten die Ergebnisse verzerren. Einzig bei der Kornweihe wurde diese Dateneinschränkung nicht vorgenommen, da es sonst insgesamt zu wenig Daten gegeben hätte. Dies könnte für diese Art aufgrund des Suchverhaltens in Bodennähe zu einer Unterschätzung der Fluggeschwindigkeit auf Rotorhöhe geführt haben.
2. Für jeden Punkt wurde ein approximierter Geschwindigkeitswert über $v = \Delta \text{Strecke} / \Delta \text{Zeit}$ (betrachtet zum vorherigen Punkt) berechnet.
3. Werte von $> 1000 \text{ m/s}$ wurden entfernt, da sich diese i. d. R. auf Punkte unterschiedlicher Tracks beziehen.
4. Beinhalteten die Daten GPS-Trackingdaten, wurden die Geschwindigkeiten mit einem Histogramm oder Dichteplot analysiert. Dieser zeigte dann meist ein deutlich bimodales Muster, wobei das Maximum assoziiert mit den Fluggeschwindigkeiten nahe Null dem Ruheverhalten zuzuordnen war. Für die weitere Analyse wurden nur diejenigen Geschwindigkeiten verwendet, die oberhalb des Minimums zwischen den beiden Maxima lagen und somit dem Flugverhalten zugeordnet werden konnten. Beispiele sind in Abbildung C11 gegeben.

5. Die verbliebenen Fluggeschwindigkeitsdaten konnten meist nicht direkt mit geeigneten Regressionsmethoden analysiert werden, da sie oft ein außerordentliches Maß an zeitlicher Autokorrelation zeigten – insbesondere, wenn es sich um zeitlich hochaufgelöste Radar- oder Kameradaten handelte. Aus diesem Grund wurden aus jeder Klasse an zeitlichen Differenzen d_t zwischen den Datenpunkten (1 Sekunde, 2 Sekunden, ..., N Sekunden) zufällig 5.000 Punkte aus dem Gesamtdatensatz ausgewählt und alle Punkte zu einem finalen Datensatz vereint. Der Wert N wurde basierend auf der artspezifisch verfügbaren Datengrundlage so gewählt, dass zum einen möglichst der Bereich besonders kleiner d_t -Werte analysiert wurde (da in diesem Bereich die approximierten Geschwindigkeiten der realen Geschwindigkeit nahekommen), zum anderen genügend Datenpunkte für die Analyse zur Verfügung standen. Mittels pACF-Plot-basierten Analysen (Korner-Nievergelt et al., 2015; Zuur et al., 2017) wurde schlussendlich das reduzierte Maß an verbliebener zeitlicher Autokorrelation überprüft und quantifiziert.
6. Der so generierte finale Datensatz wurde dann mit geeigneten Regressionsmethoden (Linearen Additiven Modellen – Hastie und Tibshirani, 1990; Wood, 2017) ausgewertet, indem die Geschwindigkeit v als abhängige Variable und als Prediktor die zeitliche Differenz zum vorhergegangenen Trackingpunkt (d_t) verwendet wurde. Da der Verlauf der Abhängigkeit der approximierten Fluggeschwindigkeit v von der Zeitschrittweite d_t i. d. R. nichtlinear ist, wurde statt des linearen Prediktors d_t ein nichtlinearer (Spline-) Prediktor $s(d_t)$ mit 3-4 Knoten verwendet (Wood, 2017). Zudem wurde die zeitliche Autokorrelation in Form einer AR1-Struktur integriert (Korner-Nievergelt et al., 2015; Zuur et al., 2017). Die wahre Fluggeschwindigkeit kann dann über die Vorhersage des Modells für den Wert $d_t=0$ geschätzt werden.

Aufgrund der komplexen Datensituation im Zusammenspiel mit sehr langen potenziellen Rechenzeiten wurde die Tatsache, dass mehrere Punkte gleichen Individuen und/oder Tracks zugeordnet werden können im Regressionskontext nicht mittels „Mixed Modelling“-Techniken berücksichtigt. Dies kann prinzipiell zu einer Verzerrung der Ergebnisse bzw. zu einer Unterschätzung der berechneten Konfidenzintervalle geführt haben (Hurlbert, 1984). Um diese Wahrscheinlichkeit weiter zu minimieren, wurden die Daten

vor der Analyse so behandelt, dass Vogel- oder Track-IDs mit relativ gesehen besonders vielen Datenpunkten eingekürzt wurden. Insbesondere wurde das 90%-Quantil der Datenpunktzahl pro ID berechnet und im Anschluss alle IDs die mehr Datenpunkte beinhalteten durch das zufällige Entfernen von Punkten auf die Datenpunktzahl des o. g. 90%-Quantils ausgedünnt. So kann gewährleistet werden, dass nicht die Daten einzelner Individuen die berechneten Mittelwerte und/oder Regressionsabschätzungen dominierten indem die relativen Anzahlen der Datenpunkte pro ID angeglichen wurden.

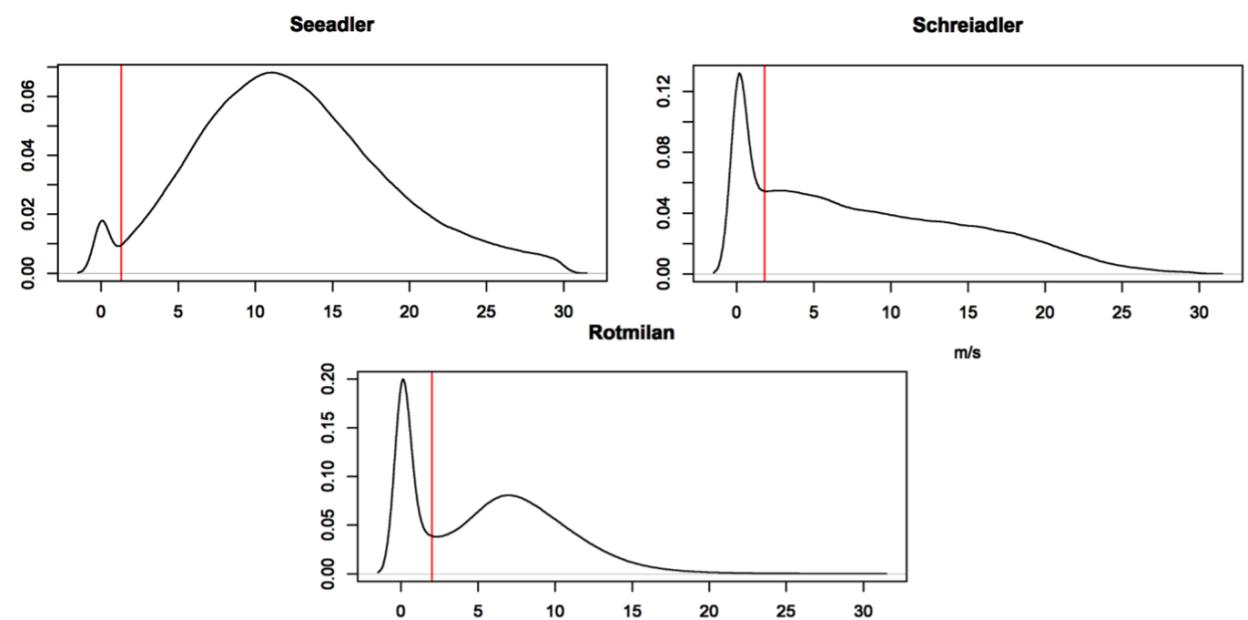


Abbildung C11: DichtepLOTS von berechneten Geschwindigkeiten für drei verschiedene exemplarische Vogelarten, wobei die senkrechte Linie jeweils angibt, bei welchem Geschwindigkeitswert die Grenze zwischen „ruhend“ und „fliegend“ gezogen wird.

Berechnung vertikale Fluggeschwindigkeit

Die Ermittlung der vertikalen Fluggeschwindigkeit wurde dadurch erschwert, dass die mit den Trackingpunkten assoziierten Flughöhenwerte oft mit einem relativ starken Fehler behaftet sind. Daher eignet sich eine Ermittlung der Höhendifferenz aus direkt aufeinanderfolgenden Punkten nicht, sondern die Daten müssen zuvor geglättet werden. Aus diesem Grund wurde separat für jede betrachtete Art der folgende Algorithmus angewandt, nachdem zuvor analog zur Vorgehensweise bei der Berechnung horizontaler

Fluggeschwindigkeiten Daten von einzelnen dominierenden Tracks / IDs eingekürzt wurden:

1. Aus dem Gesamtdatensatz wurde ein zufälliger Trackingpunkt und die 30 zeitlich darauffolgenden Punkte gezogen unter der Bedingung, dass der erste und der letzte Punkt dieser Datenreihe nicht weiter als 60 Sekunden auseinanderliegen. Diese Analysen eignen sich daher nur für Arten, für die Daten mit hoher Taktung vorliegen; die Analyse von vertikalen Geschwindigkeiten basierend auf örtlich-zeitlich weit auseinanderliegenden Trackingpunkten ist u. E. nicht sinnvoll möglich. Zudem wurden auch hier nur Flugpunkte in einer Höhe von 25 - 300 Meter inkludiert, um das im Vogelschlagkontext relevante Flugverhalten zu untersuchen. Das Suchverhalten dicht über dem Boden oder thermisches Kreisen in größeren Höhen könnten die Ergebnisse verzerren.
2. Im Anschluss wurde die Flughöhenverteilung des Unterdatensatzes mittels Linearen Additiven Modellen geglättet, wobei die Zeit als nichtlinearer Prediktor (Spline) verwendet wurde und das optimale Maß an Glättung mittels generalisierter Kreuzvalidierung bestimmt wurde (Wood, 2017).
3. In einem letzten Schritt wurde die maximale Differenz der geglätteten Höhe durch die Differenz in der Zeit (Endzeitpunkt minus Anfangszeitpunkt) geteilt und der Wert gespeichert. Hierbei wurde zwischen steigendem und sinkendem Flug unterschieden. Der gesamte Prozess (Punkt 1-3) wurde 1.000-mal wiederholt, und die resultierenden Daten statistisch ausgewertet (Mittelwert und Konfidenzintervalle).

Die hier berechneten Konfidenzintervalle reflektieren nicht alle existierenden Unsicherheiten; insbesondere methodische Setzungen (z. B. die o. g. 60 Sekunden) können das Ergebnis beeinflussen, werden aber nicht in den Konfidenzintervallen reflektiert. Dies ist im vorliegenden Projekt vertretbar, da in erster Linie die berechneten Mittelwerte relevant sind.

ERGEBNISSE

Für 14 der 15 in Anlage 1 zu § 45b Absatz 1-5 BNatSchG genannten kollisionsgefährdeten Arten konnten horizontale Fluggeschwindigkeiten berechnet werden, für 11 der 15 Arten vertikale Geschwindigkeiten und einzig für die Sumpfohreule waren keinerlei Daten verfügbar. Die Ergebnisse sind in Abbildung C12 bis Abbildung C25 sowie Tabelle C1 gezeigt.

Horizontale Fluggeschwindigkeiten

Die ermittelten horizontalen Fluggeschwindigkeiten entsprechen in hohem Maße stichprobenartigen Überprüfungen von Literaturangaben:

Rotmilan: 7,9 m/s (Spröttge/planungsgruppe grün GmbH, S.31 in (Bruns et al., 2019)); 9,2 m/s (Tennekes, 1997); 10,1 m/s (Bruderer & Boldt, 2001); 7,9 m/s bzw. 10,9 m/s (Pennycuick, 2001); 5,1 m/s (Früh & Stark, 2020); 8,5 m/s (Spaar, 1997); sowie 8,3 m/s (Mercker et al., 2023) und 9,2 m/s (Reichenbach et al., 2023). Es ergibt sich aus diesen Studien ein Mittelwert von 8,65 m/s; im vorliegenden Projekt werden 8,54 m/s ermittelt.

Weißstorch: drei verschiedene Berechnungen in Bruderer & Boldt (2001), die sich auf unterschiedliche Verhaltensweisen und Messmethoden beziehen: 13,5 m/s; 9,1 m/s sowie 12,9 m/s. Im Mittelwert über diese Studien ergibt sich 11,83 m/s. Im vorliegenden Projekt werden 11,77 m/s ermittelt.

Es gibt aber auch Arten, für welche die im vorliegenden Projekt durchgeführten Messungen von bisherigen Schätzungen deutlicher abweichen:

Seeadler: 13,1 m/s (Bruderer & Boldt, 2001), sowie 11,2 m/s bzw. 12,6 m/s (Pennycuick, 2001). Hier liegt der Mittelwert über diese Studien bei 12,3 m/s. Im vorliegenden Projekt wurden 13,79 m/s ermittelt. Dieser Unterschied von etwa 1,5 m/s ist vermutlich dadurch zu erklären, dass der Seeadler eine besonders in größeren Höhen oft thermisch bedingt kreisende Art ist, was mit einer eher langsamen Fluggeschwindigkeit assoziiert ist. Im vorliegenden Projekt werden jedoch nur Daten auf potenzieller Rotorhöhe ausgewertet, die vermutlich einen höheren Anteil an gerichtetem Flug (und damit assoziierten höheren Geschwindigkeiten) aufweisen.

Vertikale Fluggeschwindigkeiten

Die Ergebnisse zeigen, dass die vertikalen Fluggeschwindigkeiten in hohem Maße artunabhängig sind, bzw. keine starken Ausreißer nach oben für die untersuchten Vogelarten zu beobachten sind. Zudem sind die vertikalen Fluggeschwindigkeiten im Sink- vs. Steigflug oft von ähnlicher Größenordnung. Die stärkste Differenz zwischen Sink- vs. Steigflug zeigt der Wanderfalke mit deutlich höheren Sinkgeschwindigkeiten. In den meisten Fällen liegen die vertikalen Geschwindigkeiten bei unter einem Meter pro Sekunde, in Einzelfällen etwas darüber. Daher wird für die 15 o. g. Arten eine (naturschutzfachlich in den meisten Fällen vorsorgliche – siehe Tabelle C1) generelle vertikale Fluggeschwindigkeit von 1m/s festgelegt.

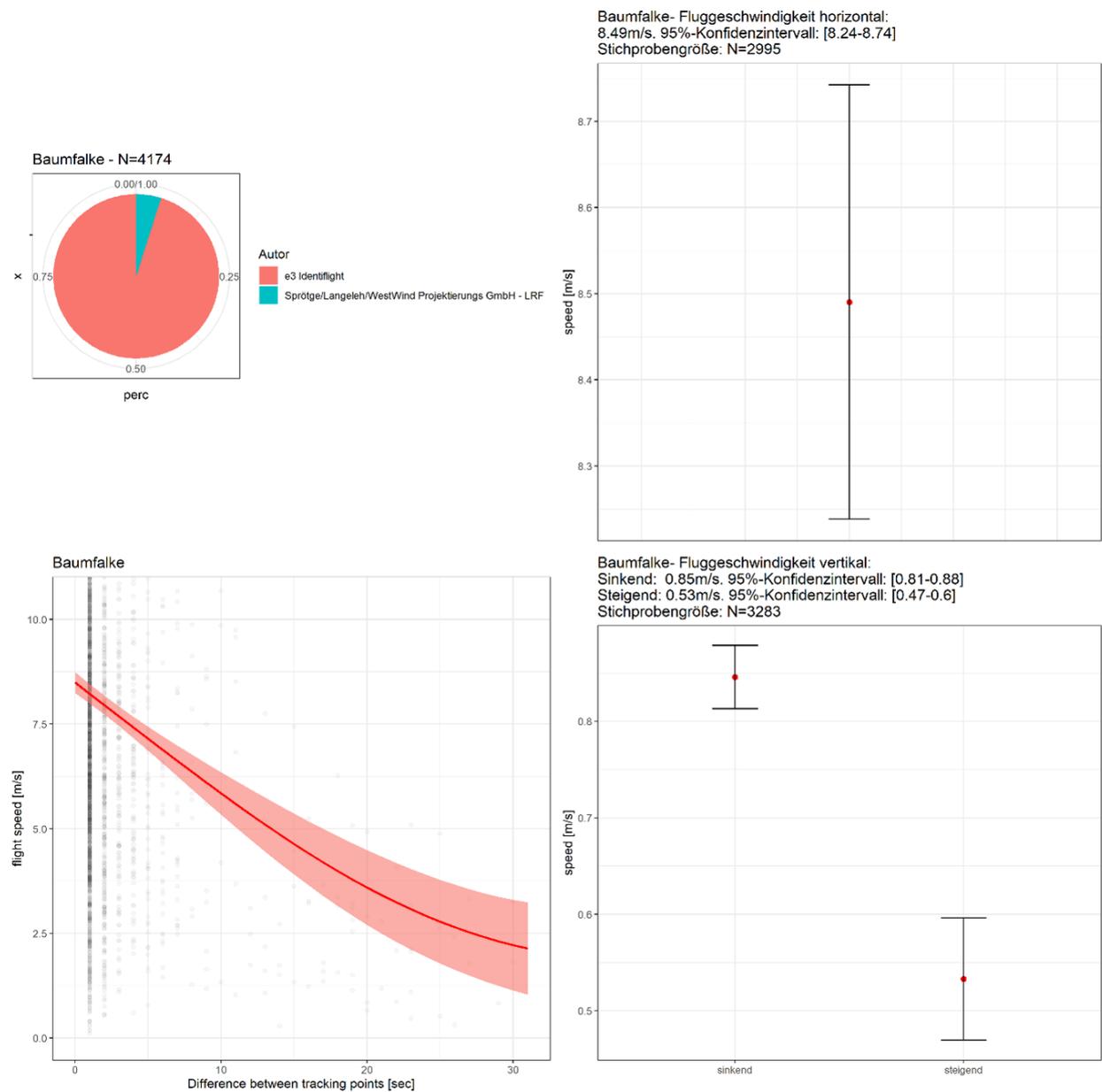


Abbildung C12: Ergebnisse zum Baumfalken

Oben links: Datengrundlage und Autoren. Oben rechts: berechnete mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen. Unten links: Visualisierung der zugrundeliegenden Regressionsergebnisse (Abhängigkeit der approximierten horizontalen Fluggeschwindigkeit von der Zeitschrittweite der Bewegungsdaten). Rote Linie: geschätzter mittlerer Verlauf; rot schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle; schwarze Punkte: Rohdaten. Unten rechts: berechnete mittlere vertikale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen.

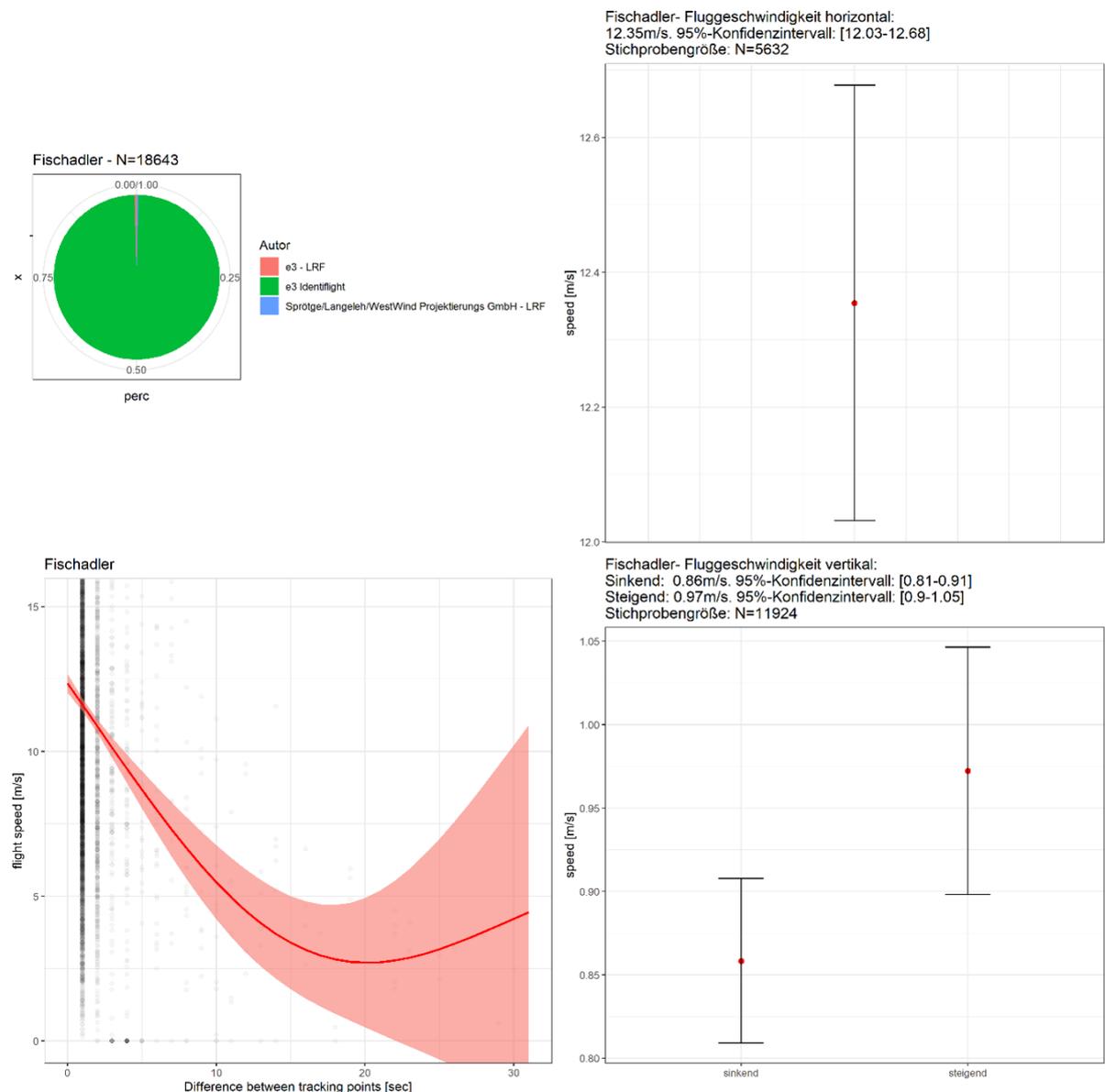


Abbildung C13: Ergebnisse zum Fischadler

Oben links: Datengrundlage und Autoren. Oben rechts: berechnete mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen. Unten links: Visualisierung der zugrundeliegenden Regressionsergebnisse (Abhängigkeit der approximierten horizontalen Fluggeschwindigkeit von der Zeitschrittweite der Bewegungsdaten). Rote Linie: geschätzter mittlerer Verlauf; rot schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle; schwarze Punkte: Rohdaten. Unten rechts: berechnete mittlere vertikale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen.

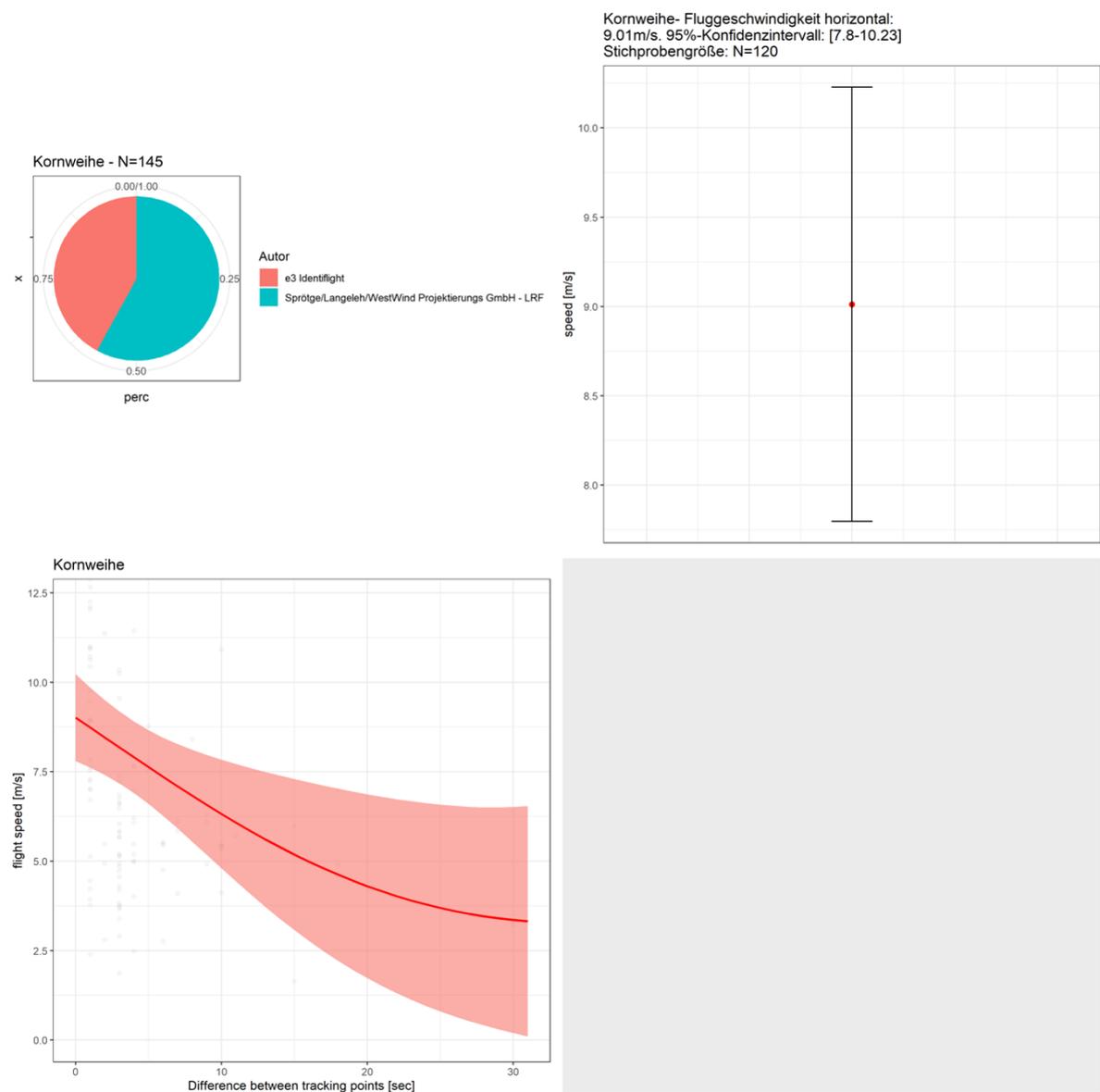


Abbildung C14: Ergebnisse zur Kornweihe

Oben links: Datengrundlage und Autoren. Oben rechts: berechnete mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen. Unten links: Visualisierung der zugrundeliegenden Regressionsergebnisse (Abhängigkeit der approximierten horizontalen Fluggeschwindigkeit von der Zeitschrittweite der Bewegungsdaten). Rote Linie: geschätzter mittlerer Verlauf; rot schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle; schwarze Punkte: Rohdaten.

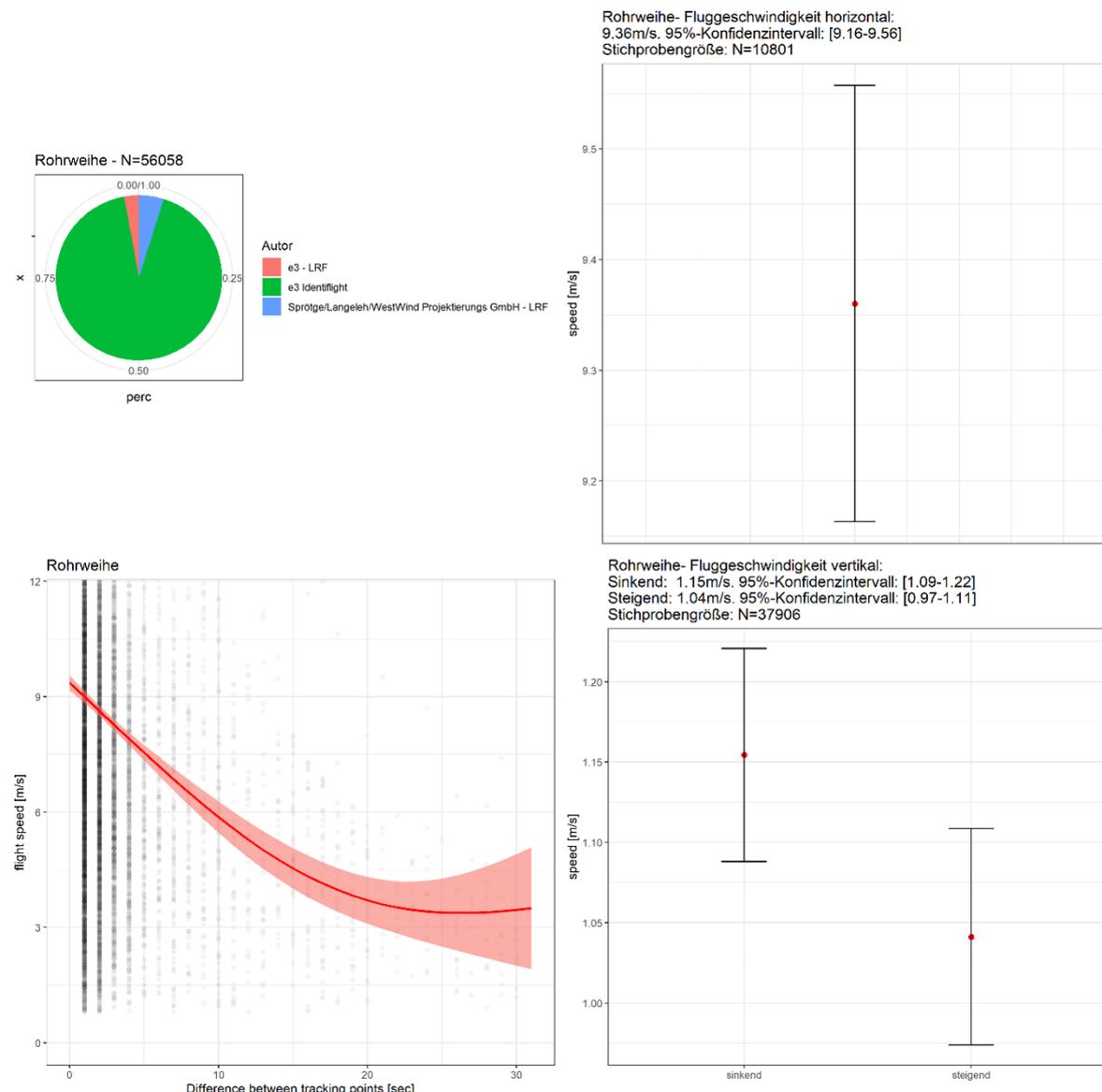


Abbildung C15: Ergebnisse zur Rohrweihe

Oben links: Datengrundlage und Autoren. Oben rechts: berechnete mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen. Unten links: Visualisierung der zugrundeliegenden Regressionsergebnisse (Abhängigkeit der approximierten horizontalen Fluggeschwindigkeit von der Zeitschrittweite der Bewegungsdaten). Rote Linie: geschätzter mittlerer Verlauf; rot schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle; schwarze Punkte: Rohdaten. Unten rechts: berechnete mittlere vertikale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen.

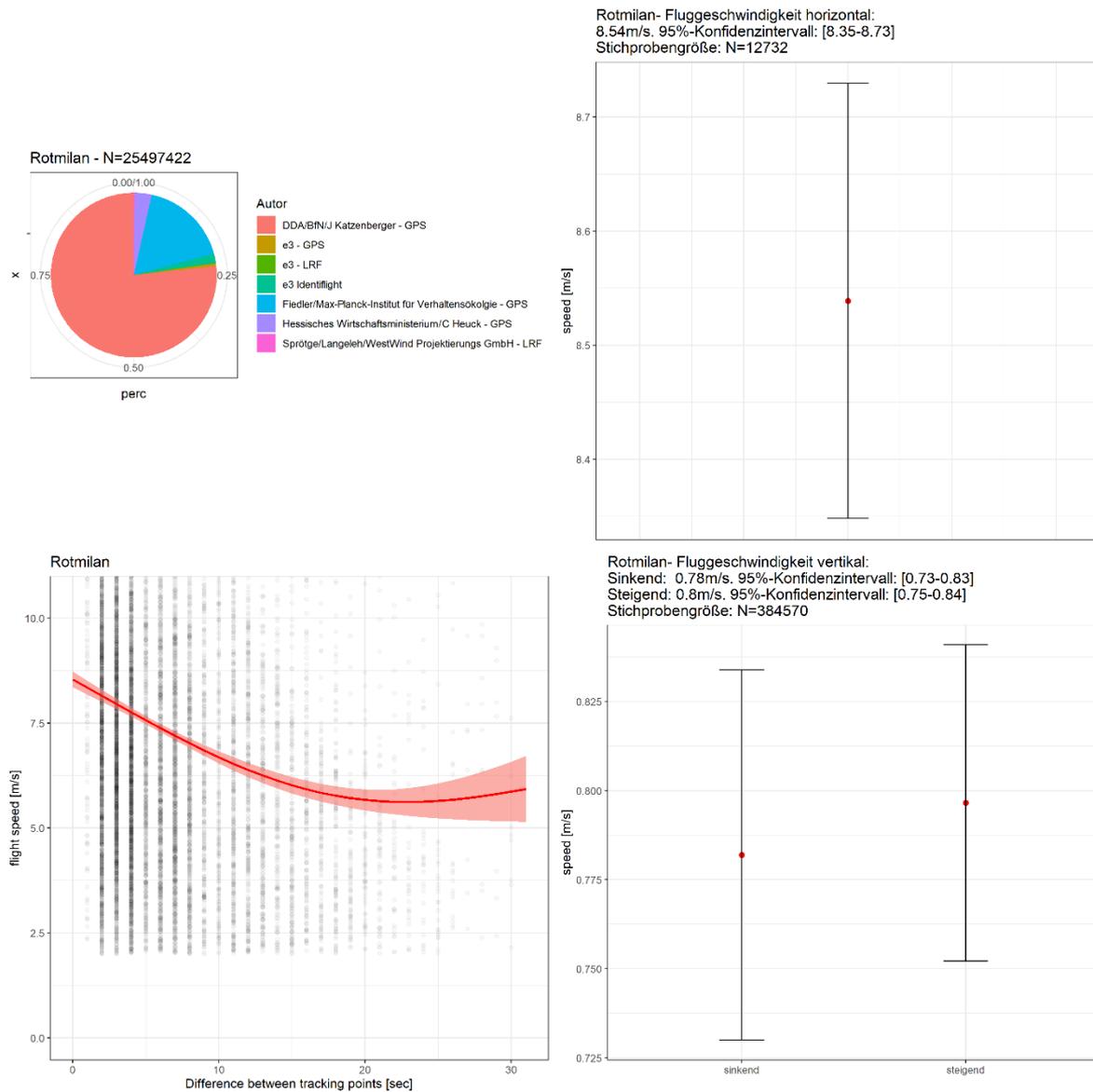


Abbildung C16: Ergebnisse zum Rotmilan

Oben links: Datengrundlage und Autoren. Oben rechts: berechnete mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen. Unten links: Visualisierung der zugrundeliegenden Regressionsergebnisse (Abhängigkeit der approximierten horizontalen Fluggeschwindigkeit von der Zeitschrittweite der Bewegungsdaten). Rote Linie: geschätzter mittlerer Verlauf; rot schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle; schwarze Punkte: Rohdaten. Unten rechts: berechnete mittlere vertikale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen.

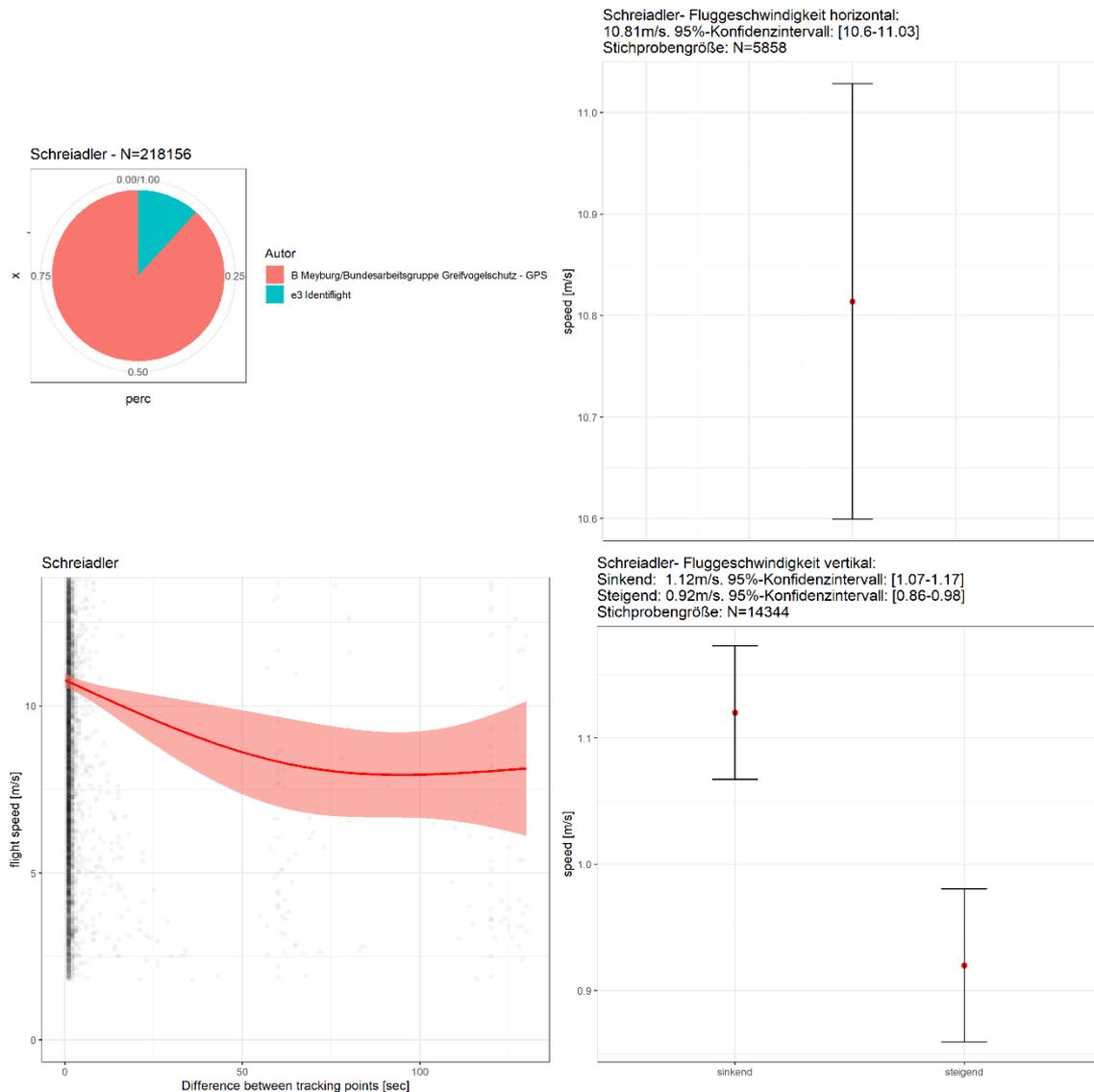


Abbildung C17: Ergebnisse zum Schreiadler

Oben links: Datengrundlage und Autoren. Oben rechts: berechnete mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen. Unten links: Visualisierung der zugrundeliegenden Regressionsergebnisse (Abhängigkeit der approximierten horizontalen Fluggeschwindigkeit von der Zeitschrittweite der Bewegungsdaten). Rote Linie: geschätzter mittlerer Verlauf; rot schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle; schwarze Punkte: Rohdaten. Unten rechts: berechnete mittlere vertikale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen.

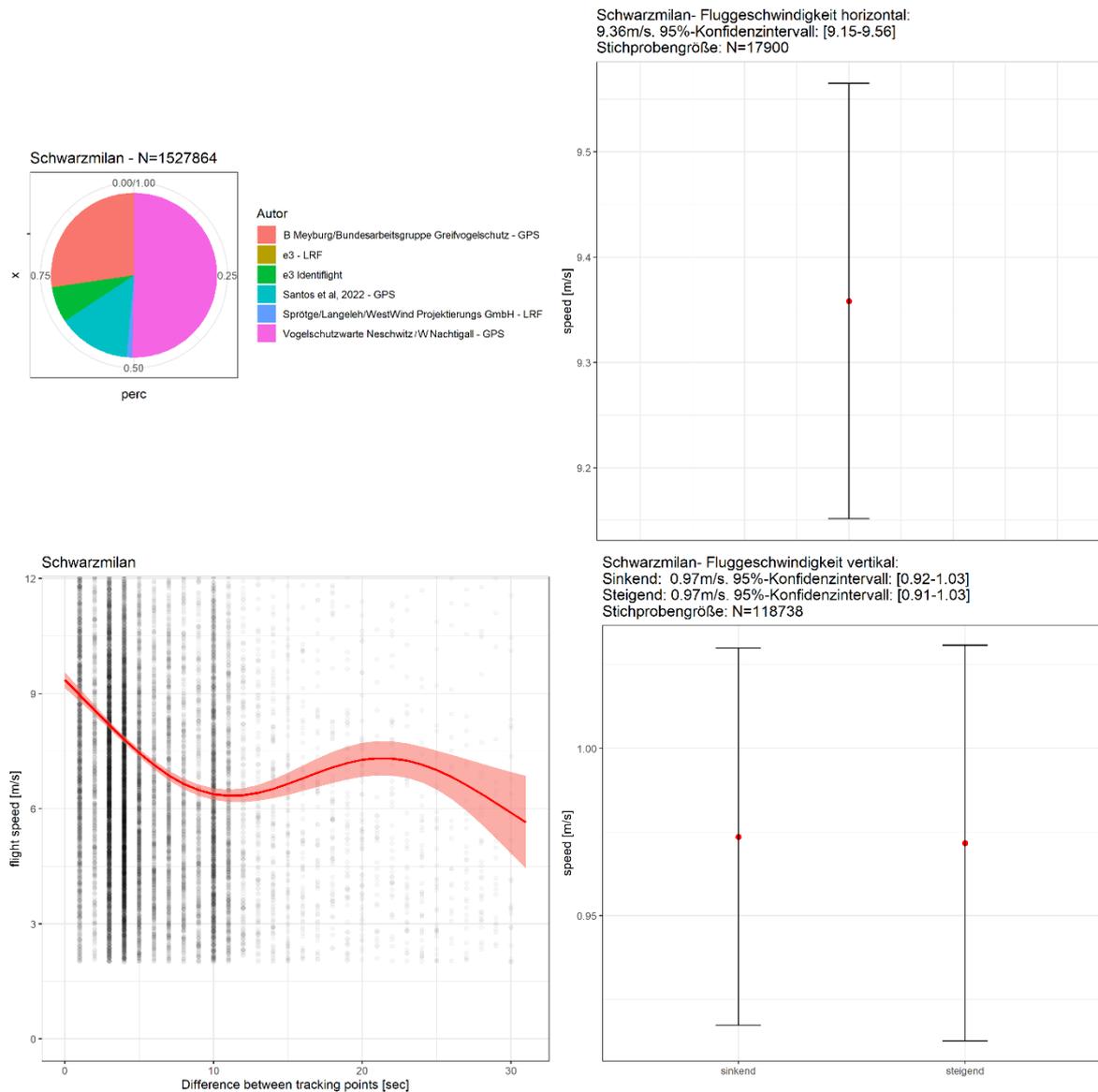


Abbildung C18: Ergebnisse zum Schwarzmilan

Oben links: Datengrundlage und Autoren. Oben rechts: berechnete mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen. Unten links: Visualisierung der zugrundeliegenden Regressionsergebnisse (Abhängigkeit der approximierten horizontalen Fluggeschwindigkeit von der Zeitschrittweite der Bewegungsdaten). Rote Linie: geschätzter mittlerer Verlauf; rot schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle; schwarze Punkte: Rohdaten. Unten rechts: berechnete mittlere vertikale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen.

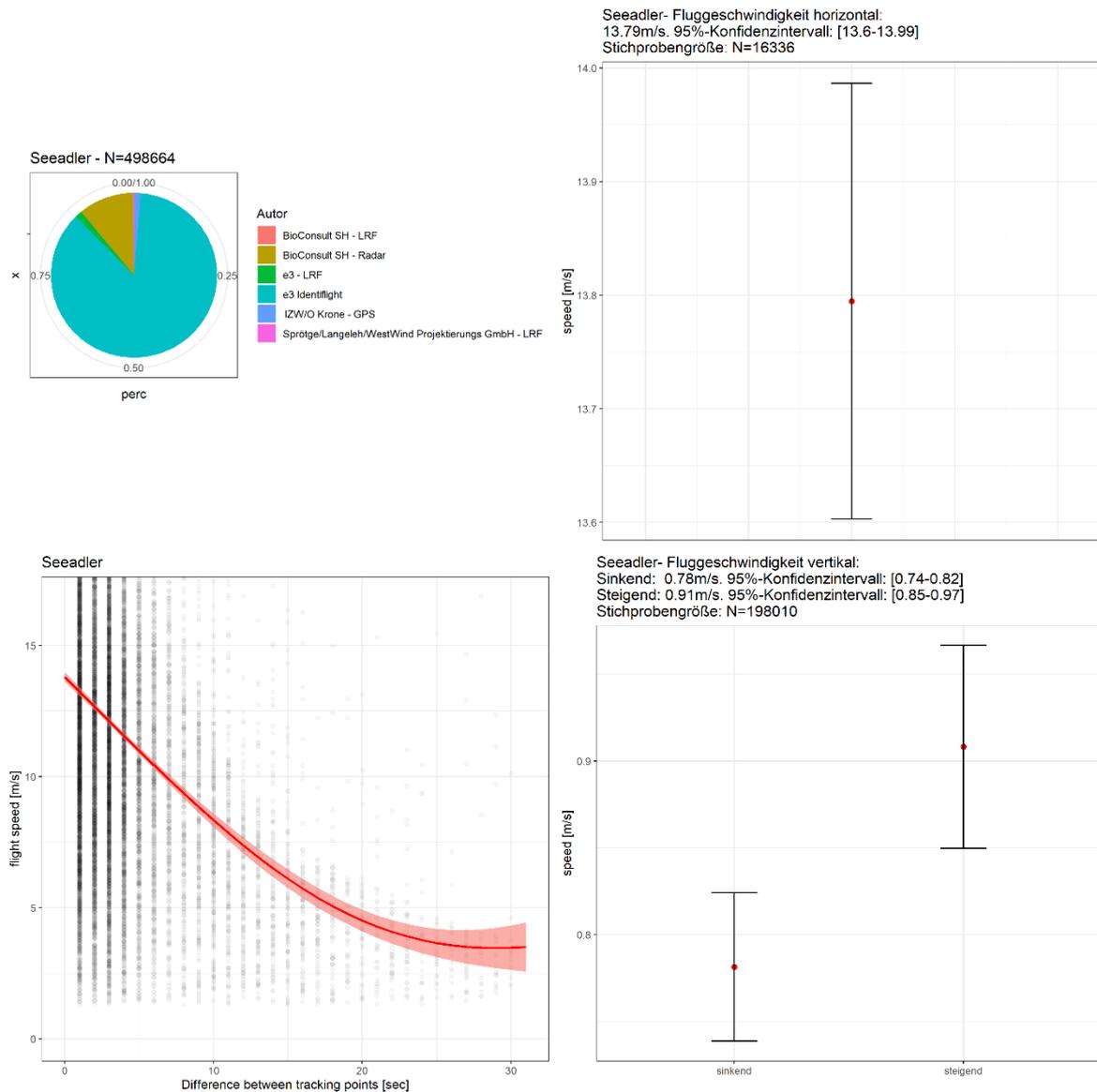


Abbildung C19: Ergebnisse zum Seeadler

Oben links: Datengrundlage und Autoren. Oben rechts: berechnete mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen. Unten links: Visualisierung der zugrundeliegenden Regressionsergebnisse (Abhängigkeit der approximierten horizontalen Fluggeschwindigkeit von der Zeitschrittweite der Bewegungsdaten). Rote Linie: geschätzter mittlerer Verlauf; rot schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle; schwarze Punkte: Rohdaten. Unten rechts: berechnete mittlere vertikale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen.

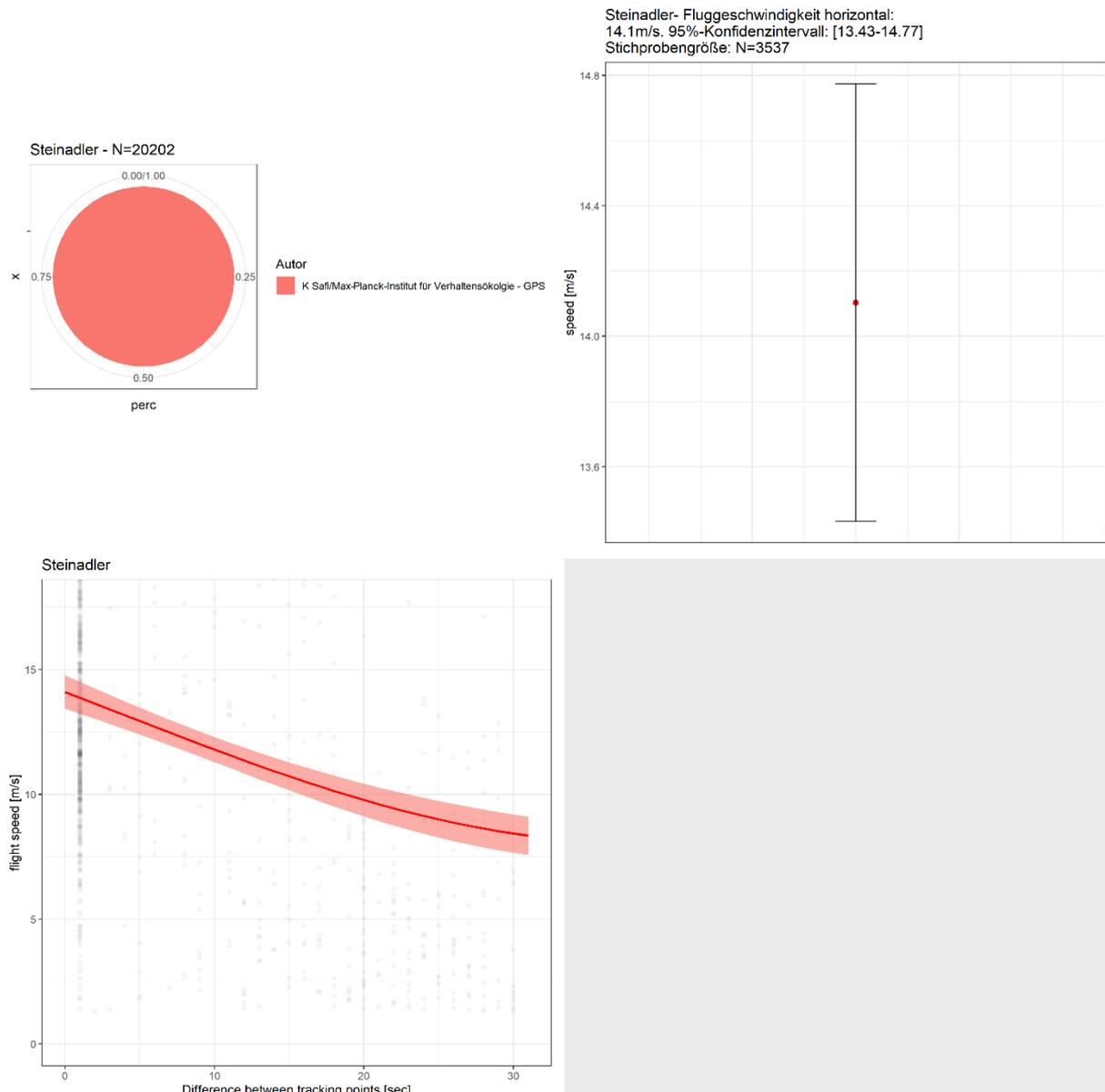


Abbildung C20: Ergebnisse zum Steinadler

Oben links: Datengrundlage und Autoren. Oben rechts: berechnete mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen. Unten links: Visualisierung der zugrundeliegenden Regressionsergebnisse (Abhängigkeit der approximierten horizontalen Fluggeschwindigkeit von der Zeitschrittweite der Bewegungsdaten). Rote Linie: geschätzter mittlerer Verlauf; rot schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle; schwarze Punkte: Rohdaten.

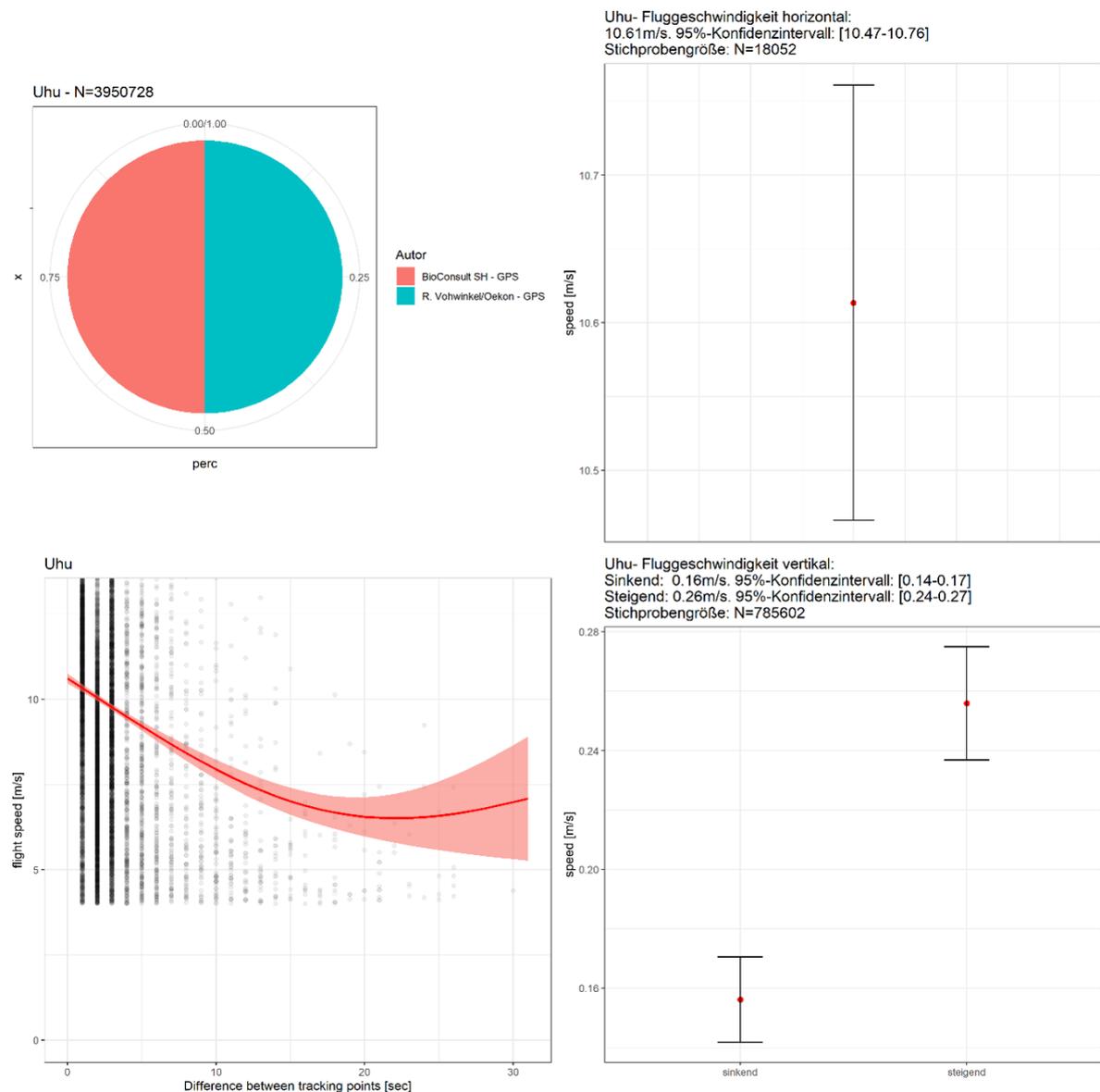


Abbildung C21: Ergebnisse zum Uhu

Oben links: Datengrundlage und Autoren. Oben rechts: berechnete mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen. Unten links: Visualisierung der zugrundeliegenden Regressionsergebnisse (Abhängigkeit der approximierten horizontalen Fluggeschwindigkeit von der Zeitschrittweite der Bewegungsdaten). Rote Linie: geschätzter mittlerer Verlauf; rot schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle; schwarze Punkte: Rohdaten. Unten rechts: berechnete mittlere vertikale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen.

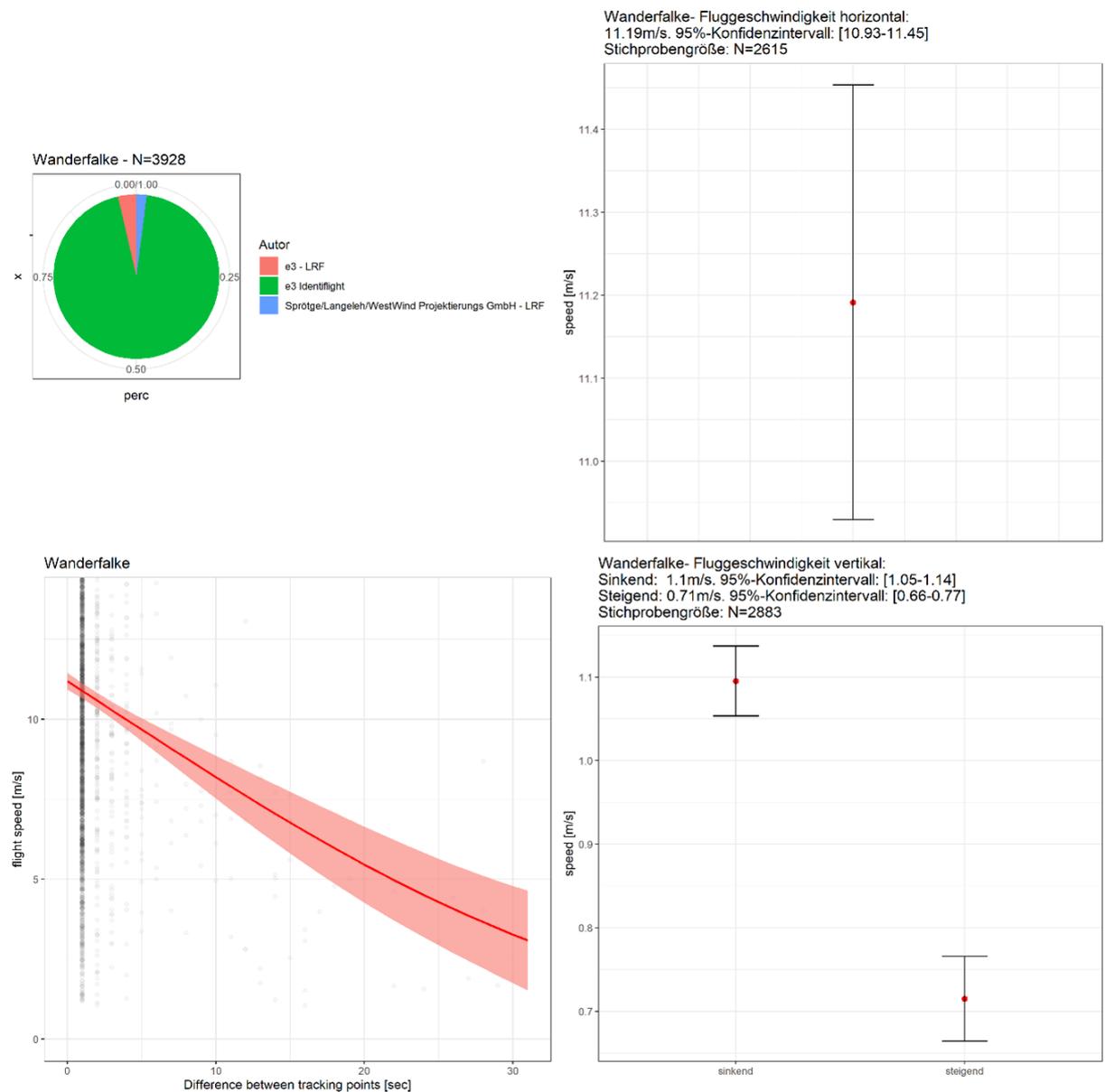


Abbildung C22: Ergebnisse zum Wanderfalken

Oben links: Datengrundlage und Autoren. Oben rechts: berechnete mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen. Unten links: Visualisierung der zugrundeliegenden Regressionsergebnisse (Abhängigkeit der approximierten horizontalen Fluggeschwindigkeit von der Zeitschrittweite der Bewegungsdaten). Rote Linie: geschätzter mittlerer Verlauf; rot schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle; schwarze Punkte: Rohdaten. Unten rechts: berechnete mittlere vertikale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen.

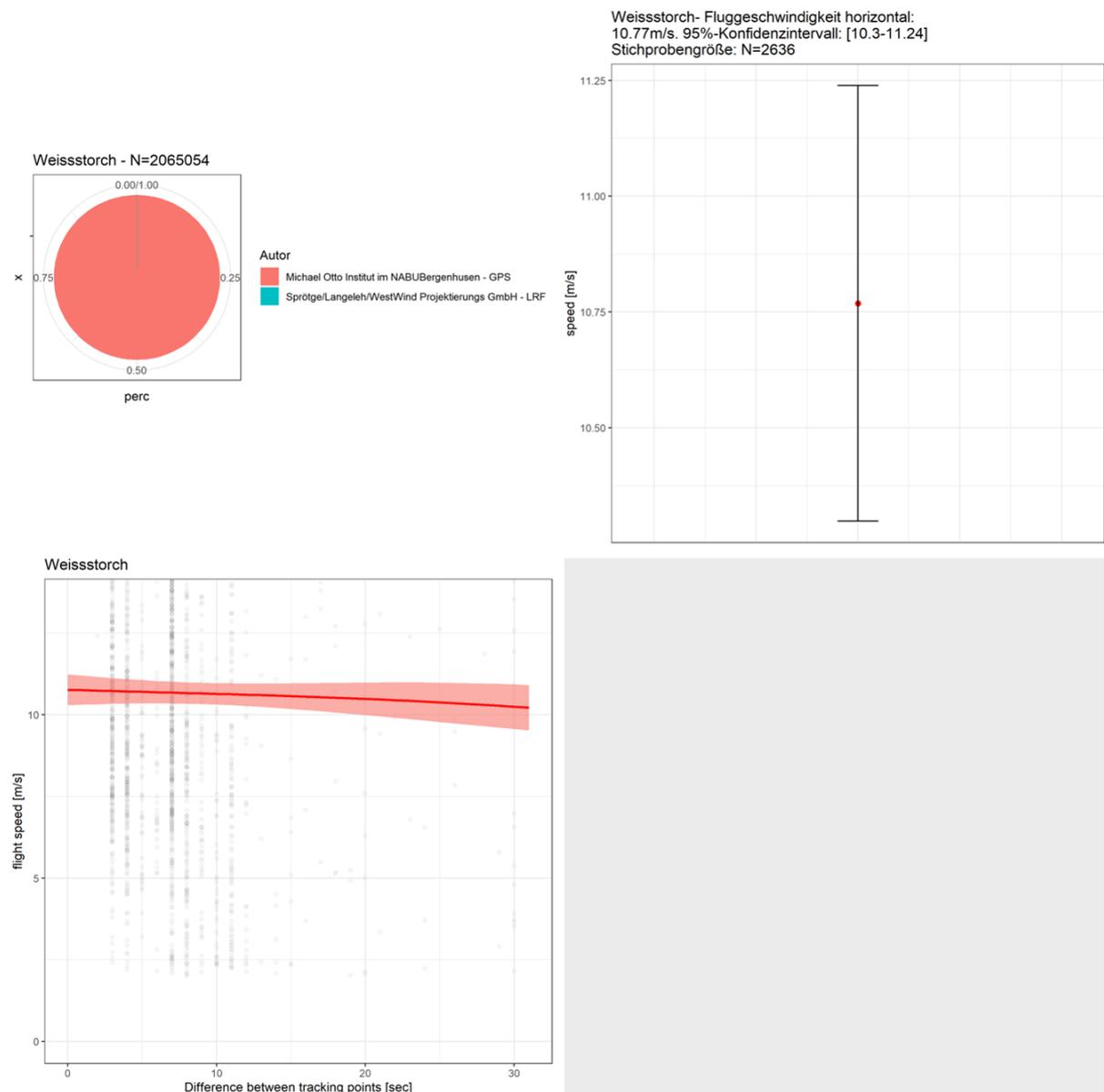


Abbildung C23: Ergebnisse zum Weißstorch

Oben links: Datengrundlage und Autoren. Oben rechts: berechnete mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen. Unten links: Visualisierung der zugrundeliegenden Regressionsergebnisse (Abhängigkeit der approximierten horizontalen Fluggeschwindigkeit von der Zeitschrittweite der Bewegungsdaten). Rote Linie: geschätzter mittlerer Verlauf; rot schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle; schwarze Punkte: Rohdaten.

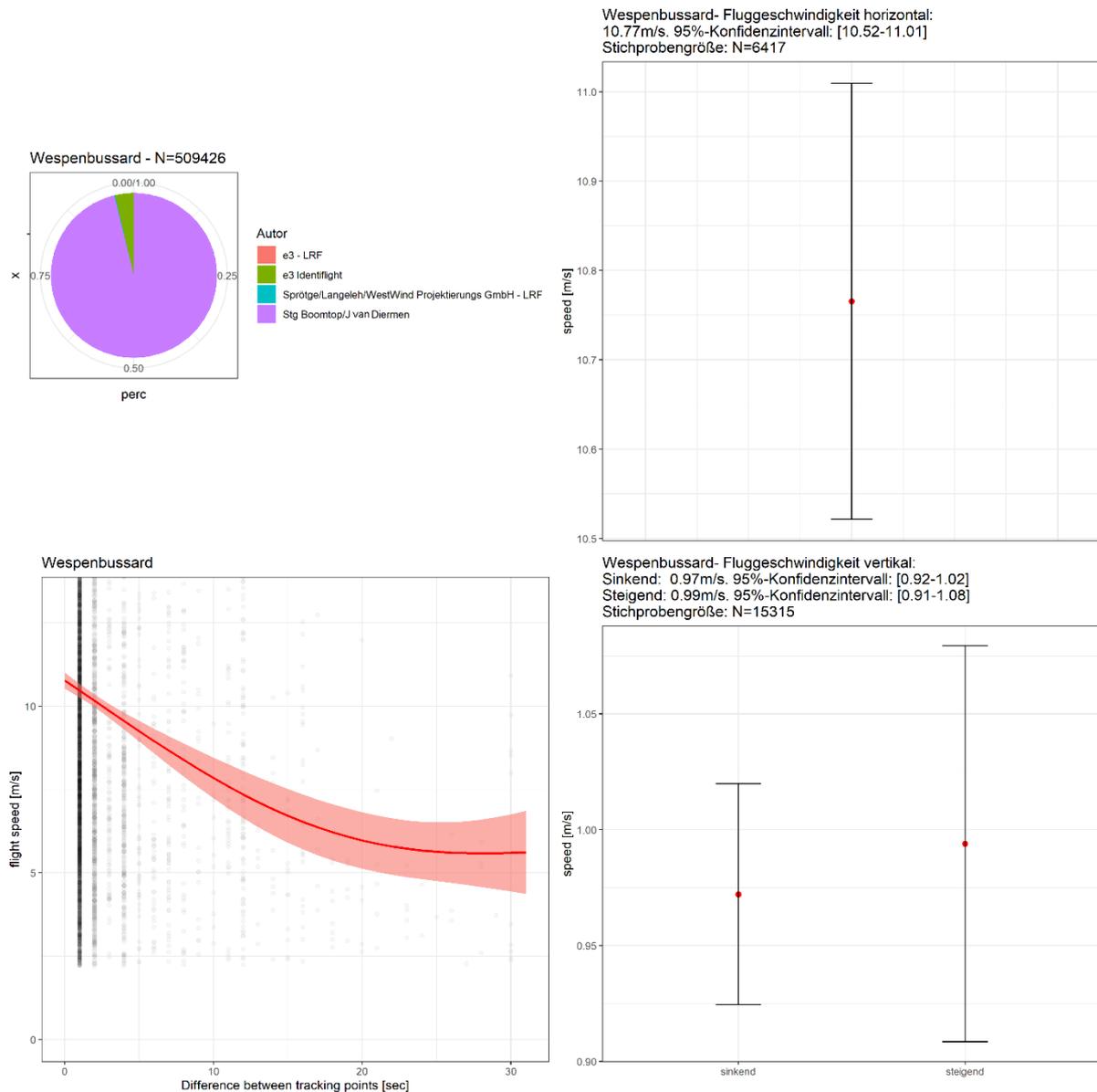


Abbildung C24: Ergebnisse zum Wespensussard

Oben links: Datengrundlage und Autoren. Oben rechts: berechnete mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen. Unten links: Visualisierung der zugrundeliegenden Regressionsergebnisse (Abhängigkeit der approximierten horizontalen Fluggeschwindigkeit von der Zeitschrittweite der Bewegungsdaten). Rote Linie: geschätzter mittlerer Verlauf; rot schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle; schwarze Punkte: Rohdaten. Unten rechts: berechnete mittlere vertikale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen.

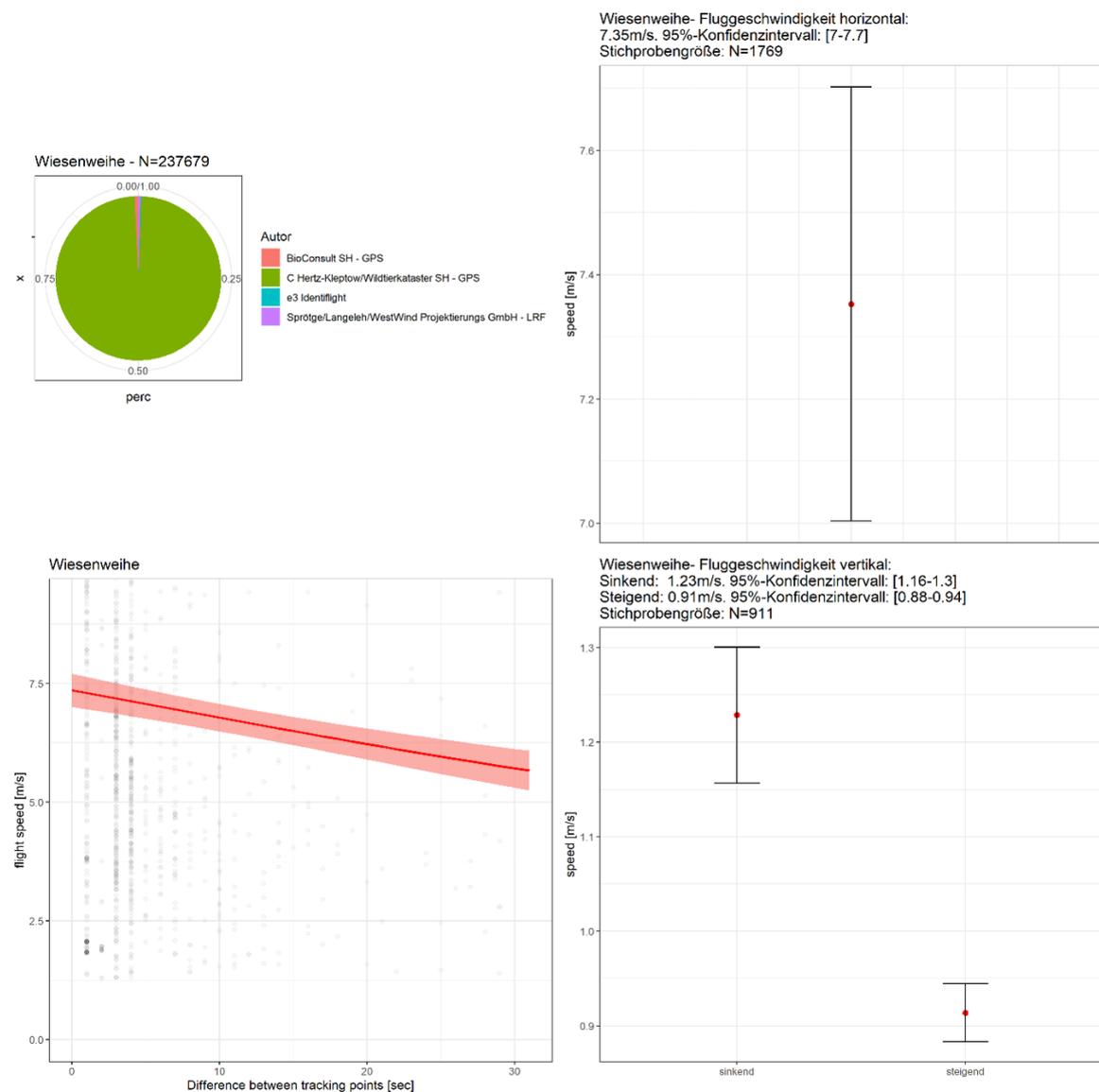


Abbildung C25: Ergebnisse zur Wiesenweihe

Oben links: Datengrundlage und Autoren. Oben rechts: berechnete mittlere horizontale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen. Unten links: Visualisierung der zugrundeliegenden Regressionsergebnisse (Abhängigkeit der approximierten horizontalen Fluggeschwindigkeit von der Zeitschrittweite der Bewegungsdaten). Rote Linie: geschätzter mittlerer Verlauf; rot schattierte Bereiche: 95%-Konfidenzintervalle; schwarze Punkte: Rohdaten. Unten rechts: berechnete mittlere vertikale Fluggeschwindigkeit nebst 95%-Konfidenzintervallen.

Tabelle C1: Horizontale und vertikale Fluggeschwindigkeiten. Aus Realdaten berechnete Fluggeschwindigkeiten. Für die Berechnung des Reaktionsradius sind die hier dargestellten Werte für die horizontale Fluggeschwindigkeit verbindlich zu nutzen. Für Berechnungen, bei denen die vertikale Fluggeschwindigkeit benötigt wird, muss immer der Wert von 1 m/s genutzt werden.

Art	Horizontale Fluggeschwindigkeit [m/s]	Vertikale Fluggeschwindigkeit [m/s], sinkend	Vertikale Fluggeschwindigkeit [m/s], steigend
Baumfalke <i>Falco subbuteo</i>	8,49	0,85	0,53
Fischadler <i>Pandion haliaetus</i>	12,35	0,86	0,97
Kornweihe <i>Circus cyaneus</i>	9,01	-	-
Rohrweihe <i>Circus aeruginosus</i>	9,36	1,15	1,04
Rotmilan <i>Milvus milvus</i>	8,54	0,78	0,8
Schreiadler <i>Clanga pomarina</i>	10,81	1,12	0,92
Schwarzmilan <i>Milvus migrans</i>	9,36	0,97	0,97
Seeadler <i>Haliaeetus albicilla</i>	13,79	0,78	0,91
Steinadler <i>Aquila chrysaetos</i>	14,1	-	-
Sumpfohreule <i>Asio flammeus</i>	-	-	-
Uhu <i>Bubo bubo</i>	10,61	0,16	0,26
Wanderfalke <i>Falco peregrinus</i>	11,19	1,1	0,7

Anhang C: Berechnung von artspezifischen Fluggeschwindigkeiten und
Höhendifferenzen

Art	Horizontale Fluggeschwindig- keit [m/s]	Vertikale Fluggeschwindig- keit [m/s], sinkend	Vertikale Fluggeschwindig- keit [m/s], steigend
Weißstorch <i>Ciconia ciconia</i>	10,77	-	-
Wespenbussard <i>Pernis apivorus</i>	10,77	0,97	0,99
Wiesenweihe <i>Circus pygargus</i>	7,35	1,23	0,91

LITERATUR ZUR BESTIMMUNG DER FLUGGESCHWINDIGKEITEN

Bruderer, B., Boldt, A., 2001. Flight characteristics of birds: I. radar measurements of speeds. *Ibis* 143, 178–204.

Bruns, E., Aschwanden, J., Musiol, F., Früh, D., Kleyheeg-Hartman, J., Sprötge, M., Reichenbach, M., Reers, H., Mehrgott, H., Weiss, A., Schuster, E., 2019. KNE-Fachkonferenz Vogelschutz an Windenergieanlagen – Detektionssysteme als Chance für einen naturverträglichen Windenergieausbau? Dokumentation zur KNE-Fachkonferenz am 15. und 16. Mai 2019 in Kassel, in: Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende KNE gGmbH (Ed.), Berlin (DEU), p. 58.

Früh, D., Stark, H., 2020. Endbericht Raumnutzungsanalyse Großvögel im Windpark Osterburg. Sachsen-Anhalt, Landkreis Stendal. FEFA/SWISS BIRD RADAR.

Garriga, J., Palmer, J.R.B., Oltra, A., Bartumeus, F., 2016. Expectation-Maximization Binary Clustering for Behavioural Annotation. *PLoS One* 11, 1–26.

Hastie, T., Tibshirani, R.J., 1990. *Generalized Additive Models*. London, UK: Chapman and Hall.

Hurlbert, S.H., 1984. Pseudoreplication and the Design of Ecological Field Experiments. *Ecological Monographs* 54, 187–211.

Korner-Nievergelt, F., Roth, T., von Felten, S., Guelat, J., Almasi, B., Korner-Nievergelt, P., 2015. *Bayesian Data Analysis in Ecology Using Linear Models with R, BUGS, and Stan*. Elsevier, London.

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

Mercker, M., Schwemmer, P., Peschko, V., Enners, L., Garthe, S., 2021. Analysis of local habitat selection and large-scale attraction/avoidance based on animal tracking data: is there a single best method? *Movement Ecology* 9, 20.

Pennycuik, C.J., 2001. Speeds and wingbeat frequencies of migrating birds compared with calculated benchmarks. *Journal of Experimental Biology* 204, 3283–3294.

Reichenbach, M., Greule, S., Steinkamp, T., Reers, H., Akili, J., Roselius, L., 2023. Fachgutachten zur Ermittlung des Flugverhaltens des Rotmilans im Windparkbereich unter Einsatz von Detektionssystemen in Hessen. Publikation in Vorbereitung, Auftraggeber: Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen; Auftragnehmer: ARSU GmbH.

Spaar, R., 1997. Flight strategies of migrating raptors; a comparative study of interspecific variation in flight characteristics. *Ibis* 139, 523–535.

Tennekes, H., 1997. Anhang: Daten ausgewählter Vögel, in: *Kolibris Und Jumbo-Jets: Die Simple Kunst Des Fliegens*. Birkhäuser Verlag, pp. 157–176.

Wood, S., 2017. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Chapman & Hall/CRC.

Zuur, A.F., Ieno, E.N., Saveliev, A.A., 2017. *Spatial, Temporal and Spatial-Temporal Ecological Data Analysis with R-INLA, Volume I-II*. Highland Statistics Ltd.

Anhang D: Vereinfachter Beispiel-R-Code zur Berechnung einer mittleren Rate nebst 95%-Konfidenzintervall

```
#*****  
#Test-Datensatz (bitte durch reale Daten ersetzen) – am Beispiel Gesamtrate, die  
Schutzrate wird analog analysiert.  
#*****  
Gesamtrate <-  
c(0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)  
Track_ID <-  
c(1,1,1,1,2,2,2,3,3,3,3,4,4,4,5,5,5,5,5,6,6,6,6,7,7,7,7,7,7,8,8,8,8,9,9,9,9,9)  
MeineDaten <- data.frame(Gesamtrate=Gesamtrate,Track_ID=Track_ID)  
MeineDaten$Gesamtrate <- factor(MeineDaten$Gesamtrate)  
MeineDaten$Track_ID <- factor(MeineDaten$Track_ID)  
#*****  
#Statistische Analyse durch GLMMs  
#*****  
#ACHTUNG: Dies ist ein vereinfachtes Testbeispiel und ersetzt keine gründliche sta-  
tistische Analyse. Entsprechend können die Ergebnisse verzerrt sein. Z. B. gilt:  
#(1) Zeitliche Autokorrelation wird nicht berücksichtigt und ist in der unten genutzten  
Funktion auch nur bis zur AR1-Ordnung möglich  
#(2) Es gibt verschiedenste alternative R-Pakete/Funktionen die u. U. unter bestimm-  
ten Datensituationen robuster/valider arbeiten  
#(3) Eine Modell-Validierung (z. B. bzgl. verschiedener zu überprüfender Regressions-  
annahmen) wird hier nicht präsentiert, ist aber für eine valide Analyse notwendig.  
#####  
mod <- MASS::glmmPQL(Gesamtrate~1,random=~1|Track_ID,data=MeineDaten,fam-  
ily=binomial(),verbose=FALSE)  
sum <- summary(mod)$tTable  
M <- sum[1,1]  
SE <- sum[1,2]  
Up <- M+1.96*SE  
Do <- M-1.96*SE  
M <- round(100*plogis(M),digits=1)  
Up <- round(100*plogis(Up),digits=1)  
Do <- round(100*plogis(Do),digits=1)  
cat("Mittelwert der Rate (in Prozent): ",M," , 95%-Konfidenzintervall: [",Do,"-",Up,"]\n")
```

Anhang E: Leitfaden für LRF-Bedienung

Allgemeine Vorgaben

- Schulung der Benutzer*innen zum Verständnis der allgemeinen Funktionsweise sowie Anwendung im Feld
- Bedienungsanleitung des Herstellers und ggf. Konkretisierung des Auftraggebers (AG) muss zur Verfügung gestellt werden
- Definition des zu überwachenden Luftraums (Erfassungsbereich)
- Verwendung eines standardisierten Beobachtungsbogens für zusätzliche Informationen der aufgenommenen LRF-Flugbewegungen. Dabei sind vor allem Informationen zum Flugverhalten oder auch Informationen zur weiteren Einordnung des Tracks hilfreich wie z. B. „Gleitflug am Waldrand“
- Dokumentation Modellnummer des LRF
- Definition der Anzahl der Untersuchungstage, des Untersuchungszeitraums und der Tageszeit, ggf. Pausenregelung (möglichst hohe zu erwartende Flugaktivität, aber auch verschiedene relevante Jahreszeiten und Wetterbedingungen)
- Wahlweise Einsatz eines Stativs möglich
- Standort der Beobachtenden muss vor Beginn der Untersuchung in Absprache mit AG und unabhängiger Stelle festgelegt werden, fester Beobachtungspunkt über gesamten Beobachtungszeitraum. Mindestens 150 m vom AKS entfernt, damit sie einerseits möglichst den gleichen Sichtbereich wie das Kamerasystem abdecken, sich andererseits nicht durch die Bewegungen und Geräusche des Systems ablenken lassen (es sollen zwei unabhängige Stichproben entstehen). Falls sich ein Standort im Laufe der Beobachtungen als ungünstig erweist, kann dieser in Absprache optimiert werden.
- Anzahl der Beobachtenden: 2, einer bedient LRF mit Priorisierung auf Zielart, der andere beobachtet den gesamten Erfassungsbereich und unterstützt mit Hinweisen auf Flugbewegung, Artbestimmung, Ausfüllen des Beobachtungsbogens, Stoppen der Zeit
- Das Smartphone, welches für den Einsatz der LRF vorgesehen ist, muss täglich mit dem Zeitserver, welchen das AKS nutzt, synchronisiert werden

- Einzuhaltende Abstände (zu metallischen Gegenständen) während der Untersuchungen gem. Bedienungsanleitung unbedingt einhalten

Am Standort vor jedem Einsatz

- Geopositionen richtig aufnehmen; Sicherstellen, dass die eigene Position genau und stabil erfasst wird
- Kalibrierung des Kompasses gem. Bedienungsanleitung bzw. Konkretisierung durch AG

Am Standort während des Einsatzes

- Alle Flugbewegungen von Individuen mit einer Flügelspannweite > ca. 1,20 m werden getrackt, Zielvögel werden immer priorisiert. Dabei wird jedes Individuum möglichst häufig getrackt. Die vom LRF aufgenommenen Daten (Uhrzeit, Koordinaten) werden per Bluetooth oder Verbindungskabel auf ein Smartphone übertragen und gem. Vorgaben des AG regelmäßig gesichert. Ist es nicht mehr möglich, für die Flugbahn des Vogels weitere Koordinaten in Sichtweite des AKS aufzunehmen, gilt dieser Track als abgeschlossen. Der zweite Beobachtende notiert zusätzliche Informationen zum Flugverhalten des angepeilten Vogels und hält außerdem Ausschau nach weiteren (Ziel-)vögeln im Untersuchungsgebiet.
- Während der Untersuchungen sind stündlich zwei bis drei zuvor abgesprochene Landmarken aufzunehmen. Diese Landmarken werden jeweils mit einem Datenpunkt aufgenommen und entsprechend in dem Beobachtungsbogen und der Übertragungsapp als Landmarken markiert.

Nach jedem Einsatz

- Übermittlung der Rohdaten erfolgt spätestens am Folgetag an den von einer unabhängigen Stelle zur Verfügung gestellten Server. Hochzuladen sind dabei zum einen die vom LRF generierten Datenpunkte und zum anderen der Beobachtungsbogen mit Zusatzinformationen zu den Tracks im Excel-Format. Zusätzlich dazu können die aufgenommenen Daten über eine App (falls vorhanden) eingetragen werden. Diese ermöglicht das Einlesen der .csv-Dateien des LRF und bietet eine Benutzeroberfläche, um für alle Messpunkte eine Zuweisung vorzunehmen (Zielart, Landmarke, Fehlmessung, usw.) und die Daten übersichtlich und eindeutig zu übermitteln.
- Falls diese Daten im Feld per Hand in den Beobachtungsbogen eingetragen werden und nicht direkt digital in die Exceltabelle, sollen die Daten vor der Übertragung auf den von einer unabhängigen Stelle bereitgestellten Server digital in die Exceltabelle eingetragen werden.