

Die Höhenverteilung von Fledermäusen an Windenergieanlagen

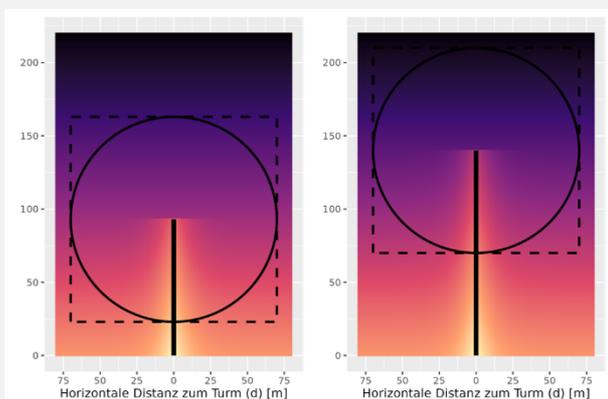
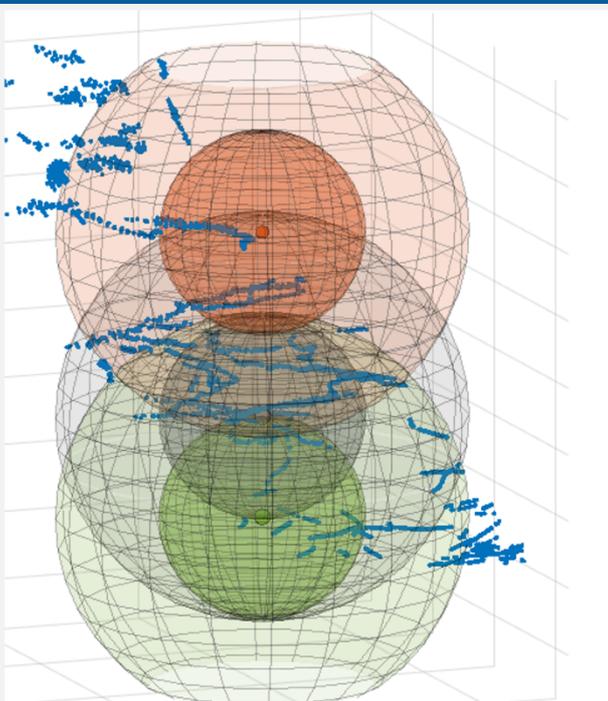
Und der Nutzen eines Turmmikrofons für die Aktivitätserfassung

Oliver Behr, Sören Greule, Johanna Grimm,
Christof Happ, Fränzi Korner-Nievergelt und
Florian Stehr

BfN-Schriften

741

2025





Die Höhenverteilung von Fledermäusen an Windenergieanlagen

Ergebnisse des F + E Vorhabens:

**„Bewertung der derzeitigen Signifikanzschwelle für
Fledermäuse und Windenergieanlagen sowie vergleichende
Erfassung von Fledermäusen mit zusätzlichen
Turmmikrofonen an Windenergieanlagen“
(FKZ 3521 86 0300)**

Oliver Behr

Sören Greule

Johanna Grimm

Christof Happ

Fränzi Korner-Nievergelt

Florian Stehr

Impressum

Titelbild: Installiertes Turmmikrofon und exemplarische Ergebnisgrafiken. (C. Happ, M. Bach, O. Behr)

Adressen der Autorinnen und der Autoren:

Dr. Oliver Behr OekoFor GbR
MSc. Sören Greule Kartäuserstr. 39a, DE-79102 Freiburg
Dr. Florian Stehr E-Mail: behr@oekofoor.de
MSc. Johanna Grimm www.oekofoor.de

Dr. Christof Happ UMIT Tirol, Institut für Mess- und Sensortechnik
Eduard-Wallnöfer-Zentrum 1, A-6060 Hall in Tirol
E-Mail: christof.happ@umit-tirol.at
www.umit-tirol.at

Dr. Fränzi Korner Nievergelt oikostat GmbH
Rothmättli 16, CH- 6218 Ettiswil
E-Mail: fraenzi.korner@oikostat.ch
www.oikostat.ch

Fachbetreuung im BfN:

Nora Köcher Fachgebiet II 4.3: Naturschutz und erneuerbare Energien

Förderhinweis:

Gefördert durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN) mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) (FKZ: 3521 86 0300).

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

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

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

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



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

Druck: Druckerei des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN)

Gedruckt auf 100% Altpapier

ISBN 978-3-89624-505-2

DOI 10.19217/skr741

Bonn 2025

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Abstract	7
1 Hintergrund und Zielsetzung	9
2 Kooperationspartner	11
2.1 Enercon	11
2.2 Fleximaus.....	11
2.3 UMIT.....	11
3 Methode	12
3.1 Datensätze.....	12
3.1.1 Anonymisierung	12
3.1.2 Eigene Erfassungen	12
3.1.3 Gesamtdatensatz	12
3.2 Akustische Erfassung.....	17
3.2.1 Eigene akustische Erfassungen	17
3.2.2 Daten aus Eingriffsgutachten	22
3.2.3 Unterschiedene Arten und Artengruppen	23
3.3 Wärmeoptische 3D-Erfassung.....	24
3.3.1 Erfassungszeiträume	24
3.3.2 Aufbau des Erfassungssystems	26
3.3.3 Sichtfeld.....	26
3.4 Messung der Niederschlagsintensität.....	28
3.5 Einflussvariablen	29
3.6 Statistische Analysen und Modelle	29
3.6.1 Darstellung der Höhenverteilung der Arten	29
3.6.2 Modell zur Aktivitätsvorhersage für Turm- und Gondelmikrofone.....	30
3.6.3 Übertragung von Schlagopferzahlen auf benachbarte, unbeprobte WEA.....	30
4 Ergebnisse	32
4.1 Höhenverteilung der Arten	32
4.2 Vertikale Verteilung der Gesamtaktivität	36
4.2.1 Grundmodell	36
4.2.2 Modell mit Wechselwirkungen	40
4.3 Horizontale Verteilung der Fledermausaktivität	46

4.3.1	Daten aus eigenen Erfassungen	46
4.3.2	In NatForWINSENT II erfasste Daten.....	49
4.4	Schlagopferzahl in Abhängigkeit von der Größe der WEA	50
4.5	Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm.....	55
4.6	Test von Niederschlagssensoren.....	62
5	Erfassungsstandard.....	67
6	Diskussion	68
6.1	Höhenverteilung der Arten	68
6.2	Vertikale Verteilung der Gesamtaktivität	68
6.3	Horizontale Verteilung der Fledermausaktivität	71
6.4	Schlagopferzahl in Abhängigkeit von der Größe der WEA	72
6.5	Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm.....	72
6.6	Empfehlungen	73
6.7	Test von Niederschlagssensoren.....	75
	Danksagung	77
	Literaturverzeichnis	78
	Abbildungsverzeichnis	80
	Tabellenverzeichnis	83
	Abkürzungsverzeichnis.....	84
A	Anhang.....	86
A.1	Berechnung der Aktivitätsverteilung von Fledermäusen im Rotorbereich	86
A.1.1	Aktivitätsdichte	86
A.1.2	Integration der Aktivitätsdichte über den Rotorbereich	87

Zusammenfassung

Die Bestimmung des Kollisionsrisikos für Fledermäuse an Windenergieanlagen (WEA) mittels akustischer Erfassung der Aktivität mit einem Mikrofon an der Gondel ist in Mitteleuropa Standard. Wir untersuchen hier, wie stark die Unsicherheit bei der Bestimmung des Kollisionsrisikos mit der Größe des Rotors der WEA zunimmt und in welchem Umfang sich die Unsicherheit durch ein zweites Mikrofon am Turm der WEA verringern lässt. Zentrale Fragen sind dabei die Verteilung der Fledermausaktivität um die WEA und der Effekt des Abstands zwischen Gondel und Rotorspitze sowie zwischen Rotorspitze und Boden.

Die vertikale Verteilung der Fledermäuse beschreiben wir anhand von 424 WEA-Jahren mit akustischen Gondelerfassungen sowie 37 WEA-Jahren mit kombinierten Gondel- und Turmerfassungen. Der Anteil der Artengruppe Nyctaloid an der Gesamtaktivität nahm mit der Höhe über dem Boden zu, während die Artengruppe Pipistrelloid einen gegenläufigen Effekt zeigte. Beide Effekte waren vor allem in tieferen Luftschichten ausgeprägt und flachten in größeren Höhen ab.

Bei der Erfassung mit den horizontal ausgerichteten Turmmikrofonen lag die Fledermausaktivität 12 % niedriger als bei den vertikal nach unten gerichteten Gondelmikrofonen in derselben Höhe. Je zusätzlichem Höhenmeter des Mikrofons nahm die Aktivität exponentiell um 1,9 % ab, bei einer Erhöhung des Mikrofons um 10 m demnach um 18 % und bei einer Erhöhung um 50 m nahm die Aktivität um 62 % ab. Der relative Effekt der Höhe war an den meisten WEA sehr ähnlich – trotz großer absoluter Unterschiede. Aus stereooptischen Wärmebilderefassungen an zwei WEA ermittelten wir zusätzlich eine horizontale exponentielle Abnahme der Attraktionswirkung der WEA um 11,5 % je zusätzlichem Meter Distanz vom Turm.

Aus den horizontalen und vertikalen Aktivitätsverteilungen leiten wir eine verbesserte Korrektur der Schlagopferberechnung aus akustischen Daten ab. Da diese neue Korrekturformel Nabenhöhe und Rotordurchmesser berücksichtigt, lässt sich aus ihr der Erkenntnisgewinn durch ein zusätzliches Mikrofon am Turm ableiten. Hierzu vergleichen wir die Schlagopferschätzung aus den Daten nur von der Gondel (dieser Ansatz wird im Folgenden mit 1 bezeichnet) und von Gondel und Turm (im Folgenden Ansatz 2). Für 75 % aller WEA-Jahre unterschieden sich die beiden Schätzungen der beiden Ansätze um -11 % bis +29 %, wobei in den nördlichen naturräumlichen Regionen höhere Unterschiede auftraten als in den südlichen.

Um den Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm einzuordnen, vergleichen wir die Größe des Vorhersagefehlers bei einer Schätzung nur mit Gondel Daten (1) mit dem Vorhersagefehler bei der in der Planungspraxis häufigen Übertragung der Ergebnisse von beprobten auf nicht beprobte WEA im selben Windpark-Jahr. Für die nördlichen Regionen waren die Vorhersagefehler bei Schätzung (1) und bei der Übertragung auf unbeprobte WEA ähnlich groß und somit der Nutzen einer zusätzlichen Turmerfassung vergleichbar zur Gondelerfassung an einer sonst gar nicht beprobten WEA. Für die südlichen Regionen waren die Fehler für die Schätzung (1) deutlich geringer als bei der Übertragung auf unbeprobte WEA und somit die Erfassung an einer sonst unbeprobten WEA sinnvoller als eine zusätzliche Erfassung am Turm.

Erfassungen am Turm sind wegen des erschwerten Zugangs und häufigerer Mikrofonausfälle meist aufwändiger als an der Gondel. Nach unserer aktuellen Datenlage ist daher zur Verringerung der Vorhersageunsicherheit eine Gondelbeprobung möglichst vieler WEA in den meisten Windparks effizienter als eine zusätzliche Erfassung am Turm – dies gilt deutschlandweit,

besonders aber für die südlichen Regionen, in denen der Höheneffekt einheitlicher und die Übertragung auf nicht beprobte WEA mit einem größeren Fehler behaftet war.

Aufgrund der Ergebnisse empfehlen wir jedoch eine zusätzliche Erfassung am Turm einerseits für alle WEA mit einem rotorfreien Raum, also Abstand vom tiefsten Rotorpunkt bis zum Boden oder Kronenbereich, unter 30 m und andererseits für WEA mit nahegelegenen großen Quartieren schlaggefährdeter Fledermausarten oder einer Landnutzung, die z. B. aufgrund der Nahrungsverfügbarkeit eine sehr hohe bodennahe Fledermausaktivität bedingt, und deren rotorfreier Raum 60 m unterschreitet. Entsprechende Landnutzungsformen sind z. B. Gewässer, Holzlagerung oder sehr strukturreiche Wälder und Wiesen. An solchen Standorten haben die tiefen Luftschichten einen sehr hohen Einfluss auf das Gesamtschlagrisiko, weshalb durch ein zusätzliches Mikrofon am Turm die Vorhersageunsicherheit meist stärker gesenkt werden kann als durch die Beprobung einer weiteren WEA an der Gondel.

In einem Test von Niederschlagssensoren konnten zwei qualitativ hochwertige Messgeräte auch unabhängig vom Installationsort plausible Daten liefern. Daraus leiten wir die Empfehlung eines pauschalen Grenzwertes der Niederschlagsintensität von 5 mm / h ab, der datenbasiert auf bis zu 2 mm / h abgesenkt werden kann.

Abstract

The assessment of the collision risk for bats at wind turbines (WTs) through acoustic activity surveys using a microphone mounted at the nacelle is standard practice in Central Europe. This study investigates the extent to which uncertainty in collision risk estimation increases with turbine size and explores how this uncertainty can be reduced by adding a second microphone at the turbine tower. Key questions include the spatial distribution of bat activity around the turbine and the effect of the distance from the nacelle to the rotor tip, as well as from the rotor tip to the ground.

We describe the vertical distribution of bats using data from 424 WT-years acoustic monitoring at the nacelle and 37 WT-years of combined nacelle and tower monitoring. The proportion of Nyctaloid species activity increased with height above ground, whereas Pipistrelloid species showed an opposite trend. Both effects were most pronounced at lower heights and levelled off at greater heights.

For microphones at the tower, bat activity was 12 % lower compared to nacelle microphones at the same height. Activity decreased exponentially by 1.9 % per additional meter of microphone height, equating to an 18 % reduction for a 10 m increase in height and a 62 % reduction for 50 m. The relative effect of height was consistent across most WTs, despite large absolute differences. Stereo-optic thermal imaging at two WTs revealed an additional horizontal exponential decrease in bat activity of 11.5 % per meter of distance from the tower.

Using these horizontal and vertical activity distributions, we derived an improved correction for estimating collision mortality from acoustic data. This new formula incorporates hub height and rotor diameter, allowing us to quantify the added value of a second microphone at the tower. We compared mortality estimates based on data from the nacelle alone (Approach 1) with those incorporating both nacelle and tower data (Approach 2). Seventy-five percent of discrepancies between the two estimates for individual WT-years ranged from -11 % to +29 %, with higher differences in northern natural regions than in southern ones.

To evaluate the advantage of using an additional tower microphone, we compared the prediction error of estimates based solely on nacelle data (1) with the error caused by the common practice of extrapolating data from monitored to unmonitored turbines within the same wind farm and year. In northern regions, prediction errors for estimates (1) were comparable to those from extrapolation, making tower monitoring as beneficial as monitoring an otherwise unmonitored turbine. In southern regions, prediction errors for estimates (1) were lower than those from extrapolation, rendering surveys at otherwise unmonitored turbines more beneficial than adding an additional microphone at the tower.

Surveys at the tower are often more challenging and more prone to microphone down times than nacelle monitoring due to access issues. Based on current data, reducing prediction uncertainty would, in most wind farms more efficiently be achieved by monitoring as many turbines as possible at the nacelle—especially in southern regions, where height effects were more uniform and extrapolation to unmonitored turbines produced larger errors, but also in northern regions.

However, we recommend tower monitoring for all WTs with a rotor-free zone, i.e. the space between the lowest point of the rotor and the ground or canopy, smaller than 30 m and for turbines with a rotor-free zone under 60 m that are positioned near large roosts of collision-

prone bat species or in land-use areas with high ground-level bat activity. Such land uses include water bodies, wood storage, or highly structured forests and open landscapes. At these sites, lower air layers have a significant impact on overall collision risk, making a tower microphone more effective at reducing prediction uncertainty than monitoring an additional turbine at the nacelle level.

In a test of precipitation sensors, two high-quality devices provided plausible data regardless of installation location. We recommend a general precipitation intensity threshold of 5 mm / h, that can be reduced to 2 mm / h based on site-specific data.

1 Hintergrund und Zielsetzung

Das F+E Vorhaben „Bewertung der derzeitigen Signifikanzschwelle für Fledermäuse und Windenergieanlagen sowie vergleichende Erfassung von Fledermäusen mit zusätzlichen Turmmikrofonen an Windenergieanlagen“ (FKZ 3521 86 0300) befasste sich einerseits mit der wissenschaftlichen Herleitung einer Signifikanzschwelle für die Tötung von Fledermäusen an Windenergieanlagen (WEA), die bereits in Dietz, Fritzsche et al. (2024) veröffentlicht wurde, und andererseits mit der Frage, wie groß der Erkenntnisgewinn ist, der durch den Einbau zusätzlicher Mikrofone am Turm der WEA beim Gondelmonitoring erreicht werden kann. Dieser Bericht stellt die Ergebnisse für die zuletzt genannte Fragestellung zusätzlicher Turmmikrofone dar.

Hintergrund der Frage nach dem Erkenntnisgewinn durch zusätzliche Mikrofone am Turm einer WEA beim sogenannten Gondelmonitoring, also der akustischen Erfassung von Fledermäusen im Rotorbereich, ist eine bereits seit längerem geführte Debatte um den kombinierten Effekt von Rotordurchmesser und Anlagenhöhe auf das Kollisionsrisiko von Fledermäusen (z. B. Lindemann, Runkel et al. 2018; Bach, Bach et al. 2020; Melber, Hermanns et al. 2023).

Es liegen bereits seit einigen Jahren erste Erkenntnisse zur räumlichen Verteilung der Fledermausaktivität um WEA vor, woraus in Hochradel, Adomeit et al. (2015) eine einfache Korrekturformel¹ für verschiedene Rotorgrößen bei der Vorhersage des Schlagrisikos aus akustischen Aktivitätsdaten entwickelt wurde, die von einer radialen Abnahme der Fledermausaktivität mit dem Abstand zur Gondel ausgeht. Die Nabenhöhe der WEA wurde bislang implizit dadurch berücksichtigt, dass die Mikrofone in der Gondel installiert werden, die Erfassung also unabhängig von der Nabenhöhe immer in Gondelnähe im unteren Rotorbereich stattfindet.

Es stellt sich jedoch die Frage, welchen Effekt der bei größeren Anlagentypen höhere Abstand zwischen Mikrophon und Rotorspitze auf die Korrelation der aufgenommenen akustischen Aktivität mit der Anzahl von Schlagopfern hat (Abstand Mikrophon-Rotorspitze). Wichtig ist auch die Frage, was passiert, wenn sich der Rotordurchmesser erhöht, die Nabenhöhe jedoch gleichbleibt und daher die Rotorspitze näher an den Boden heranreicht oder im umgekehrten Fall durch eine Vergrößerung der Nabenhöhe der Abstand der Rotorspitze zum Boden zunimmt (Abstand Rotorspitze-Boden).

Antworten hierzu können aus der vertikalen Verteilung der Fledermäuse im Luftraum um die WEA abgeleitet werden. Daten zu dieser Verteilung lagen bislang vor allem aus einigen Untersuchungen an Messmasten und Kränen vor (Hurst, Biedermann et al. 2016; Roemer, Disca et al. 2017; Wellig, Nusslé et al. 2018; Roemer, Bas et al. 2019; noch nicht veröffentlichte Daten aus dem Windtestfeld Baden-Württemberg). Darüber hinaus wurden in den letzten Jahren vermehrt Standortgutachten mit einem am Turm der WEA installierten Mikrophon zusätzlich zum standardmäßig in der Gondel installierten Mikrophon durchgeführt. In den wenigen Fällen, in denen diese Daten allgemein zugänglich sind (Bach, Bach et al. 2020), lassen sich Informationen auf die Höhenverteilung von Fledermäusen ableiten.

¹ Wärmeoptische Stereobildbeobachtungen in RENEBA II haben gezeigt, dass die Konzentration von Fledermäusen im Rotorbereich einer WEA mit dem Abstand zur Gondel exponentiell abnimmt. Aus den erfassten Daten wurde die Formel $K = 0,015625 * d - 0,1019$ abgeleitet, wobei d den Durchmesser des Rotors bezeichnet. Die berechnete Anzahl Schlagopfer muss bei einem von 70 m abweichenden Rotordurchmesser jeweils mit diesem K -Wert multipliziert werden.

Anhand der akustischen Aktivitätsdaten aus den eigenen Freilanderfassungen im Projekt und den uns zur Verfügung gestellten Informationen aus Eingriffsgutachten beschreiben wir hier die vertikale Verteilung der Fledermausaktivität (Abnahme der Aktivität mit zunehmender Höhe über dem Boden). Mit unserem Kooperationspartner UMIT konnten wir außerdem in stereooptischen Erfassungen Erkenntnisse vor allem zur horizontalen Verteilung von Fledermäusen um WEA (Abnahme der Aktivität mit dem horizontalen Abstand zur WEA) gewinnen, die gemeinsam mit den akustischen Daten eine differenziertere Beschreibung der Aktivitätsverteilung um WEA und des resultierenden Schlagrisikos ermöglichen.

Aus dieser differenzierten Aktivitätsverteilung leiten wir eine verbesserte Korrektur der Schlagpferberechnung aus akustischen Daten für verschiedene Nabenhöhen und Rotordurchmesser ab, die z.B. in die Software ProBat (www.ProBat.org) integriert werden kann. Da diese neue Korrekturformel Effekte sowohl der Nabenhöhe als auch des Rotordurchmessers berücksichtigt, lässt sich mit ihr ableiten, wie hoch der Erkenntnisgewinn durch ein zusätzliches Mikrofon am Turm einer WEA für die Vorhersage des Kollisionsrisikos und zur Berechnung von Betriebsalgorithmen zum Schutz von Fledermäusen ist. Es lässt sich somit die Frage beantworten, wie sehr ein zusätzliches Mikrofon die Darstellung der Effekte unterschiedlicher Nabenhöhen und Rotordurchmesser auf das Schlagrisiko verbessert.

Aus unseren im Projekt erzielten Ergebnissen und aus den Daten und Erfahrungen, die andere Bearbeiter*innen in Eingriffsgutachten gewonnen haben, definieren wir einen Standard für die akustische Erfassung der Fledermausaktivität am Turm von WEA.

Zudem konnten wir in einem Nebenprojekt mit unseren Kooperationspartnern Enercon und Fleximaus in vier Windparks die Zuverlässigkeit von Messwerten von Niederschlagssensoren prüfen, vergleichen und mit der parallel im Park gemessenen Fledermausaktivität korrelieren. Die Ergebnisse zeigen, dass qualitativ hochwertige Sensoren auch unabhängig vom Installationsort an der Gondel oder auf dem Boden plausible Daten liefern, während ein sehr günstiger Sensor auch an der Gondel keine verlässlichen Daten lieferte.

2 Kooperationspartner

2.1 Enercon

In den Jahren 2023 und 2024 kooperierten wir mit dem WEA-Hersteller Enercon (WRD Wobben Research and Development GmbH) in einem Projekt, in dem in einem Norddeutschen Windpark die Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit verschiedener Niederschlagssensoren getestet wurden. Zentraler Baustein war hierbei der Vergleich von Messungen an der Gondel (wie sie meist in der Praxis umgesetzt werden) und am Boden (wie für die meisten Sensortypen spezifiziert). Parallel zur Registrierung der Niederschlagswerte erfassten wir die akustische Fledermausaktivität in den Jahren 2023 und 2024 an einer WEA desselben Windparks. Wir stellen das Ergebnis des von Enercon durchgeführten Vergleichs verschiedener Sensoren dar und korrelieren die Niederschlagswerte mit den von uns erfassten Fledermausdaten.

2.2 Fleximaus

Das auf intelligente Abschaltlösungen für WEA spezialisierte Unternehmen Fleximaus GmbH installierte im Jahr 2023 an zwei der von uns beprobten Standorte jeweils einen Niederschlagssensor, deren Daten wir verwenden und prüfen konnten.

2.3 UMIT

Wir kooperieren mit Christof Happ, Dr. Klaus Hochradel und Prof. Alexander Sutor vom Lehrstuhl für Biomedizinische Informatik und Mechatronik der UMIT Tirol (www.umat-tirol.at), die für das Windtestfeld Baden-Württemberg eine wärmeoptische 3D Erfassung für Fledermäuse an WEA entwickeln (Hochradel, Hartmann et al. 2021; Happ, Hochradel et al. 2024). Für das System war eine zweijährige Datenerfassung auch in unserem Projekt angedacht, letztlich war es jedoch nur im Jahr 2022 an einem Standort möglich, wärmeoptische 3D Daten parallel zu unserer akustischen Erfassung aufzunehmen (siehe Abschnitt 3.3.1).

Dankenswerterweise wurden uns jedoch die im Jahr 2024 im Windtestfeld Baden-Württemberg erfassten Daten für unsere Fragestellung zur räumlichen Verteilung von Fledermäusen um WEA aufbereitet und zur Verfügung gestellt.

3 Methode

3.1 Datensätze

3.1.1 Anonymisierung

Betreibern, die uns freundlicherweise eine Erfassung auf ihren WEA ermöglicht oder der Übermittlung von Daten aus Erfassungen an ihren WEA zugestimmt haben, wurde zuvor vertraglich zugesichert, dass die Ergebnisse nur in einer anonymisierten Form publiziert werden, die keine Zuordnung von Daten oder Ergebnissen zu einer spezifischen WEA zulässt. Wir geben daher in diesem Bericht weder die exakten Koordinaten noch die Eigenschaften einzelner WEA wieder.

3.1.2 Eigene Erfassungen

Die Standorte der sechs WEA, an denen wir eigene Erfassungen durchführen konnten, werden in ProBat (vgl. Korner-Nievergelt, Almasi et al. 2018) den naturräumlichen Regionen KU (Küste – 1 WEA), NW (Nordwestdeutsches Tiefland – 1 WEA), NO (Nordostdeutsches Tiefland – 2 WEA) und OM (östliche Mittelgebirge – 2 WEA) zugeordnet (siehe Tab. 1 und Abb. 1). Alle von uns beprobten WEA stehen im Offenland.

Die Gondel- und Turmmikrofone wurden an den sechs in diesem Projekt beprobten WEA (drei WEA pro Jahr) zwischen Anfang und Ende März bei entsprechenden Wetterlagen installiert (Vermeidung von Regenperioden und Starkwindzeiten vor allem bei der Verlegung der Mikrofonkabel außen am Turm). Durch eine kalte und windige Tiefdruckwetterlage verzögerte sich die Installation an einer WEA im Jahr 2023 bis Ende März (die Mikrofone hätten in diesem Zeitraum sehr wahrscheinlich keine Fledermausaktivität registriert). An allen anderen WEA wurde bis spätestens Mitte März installiert. Den Zeitraum ab Installation bis zum Ende der Erfassung Ende November konnten wir mit mindestens 95 % gültiger Detektorlaufzeiten für alle Mikrofon-Jahre beproben (ein Ausreißer mit 89 %). Ausgewertet wurde der Zeitraum von 5 Stunden vor Sonnenuntergang bis 1 Stunde nach Sonnenaufgang.

Meteorologische Daten der Sensoren der WEA zur Erfassung von Windgeschwindigkeit, Temperatur und ggf. Niederschlag wurden uns von den Betreibern zur Verfügung gestellt. Gültige Daten zur Windgeschwindigkeit und Außentemperatur an der Gondel der WEA lagen uns nahezu lückenlos für den gesamten akustischen Erfassungszeitraum vor. Außerdem standen uns teilweise die Daten zusätzlich installierter Sensoren für Temperatur und Niederschlag (siehe Abschnitt 3.4) zur Verfügung.

Sowohl die Ergebnisse der akustischen Erfassung als auch die uns zur Verfügung gestellten Betriebsdaten der beprobten WEA wurden allen für die Verwendung in ProBat erforderlichen und vorgeschlagenen Datenprüfungen und ggf. -korrekturen unterzogen (siehe Behr, Simon et al. 2015; Baumbauer, Nagy et al. 2018 und für die aktuellsten Hinweise die Hilfefunktionen in ProBat - www.ProBat.org).

3.1.3 Gesamtdatensatz

Neben den eigenen Erfassungen im Projekt (sechs WEA-Jahre, siehe Abschnitt 3.1.2) lagen uns für die Analyse auch Daten aus Eingriffsgutachten aus 424 WEA-Jahren² an 267 WEA (1)

² Die meisten dieser Datensätze wurden uns seit der Veröffentlichung der ProBat Software im Jahr 2014 von Nutzer*innen der Software für die Weiterentwicklung der Software zur Verfügung gestellt.

nur mit Gondelerfassungen vor (inklusive der Erfassungen in den RENEBAAT Projekten – siehe Tab. 1) sowie aus 31 WEA-Jahren an 24 WEA (2) mit Gondel- und Turmerfassung (jeweils ein Turmmikrofon) vor, die mit unterschiedlichen Detektortypen und -einstellungen erfasst wurden (siehe Tab. 2). Die Daten aus Eingriffsgutachten umfassten WEA im Offenland und an Waldstandorten.

Die Zusammensetzung des Gesamtdatensatzes ist in den Abb. 1 bis Abb. 4 im Hinblick auf verschiedene Aspekte dargestellt:

- geografische Verteilung der beprobten WEA im Bundesgebiet (Abb. 1),
- Anzahl der Erfassungen (1) nur mit Gondel- oder (2) mit Gondel- und Turmmikrofonen sowie die Höhe, in der die Mikrofone in der Gondel und am Turm der WEA installiert waren (Abb. 2),
- Anzahl und Höhe der Erfassungen je naturräumlicher Region (Abb. 3) und
- Größe (Nabenhöhe, Rotordurchmesser und tiefster Rotorpunkt) der beprobten WEA (Abb. 4).

Die Stichprobe für die Region OM (Östliche Mittelgebirge) war mit 14 WEA-Jahren am geringsten. Ergebnisse für diese Region müssen daher vorsichtig interpretiert werden.

Alle ab 2018 beprobten WEA (schließt alle Erfassungen mit Turmmikrofonen ein), für die uns Informationen zum Betrieb vorlagen, wurden mit Abschaltungen zum Schutz von Fledermäusen betrieben. Meist handelte es sich um vorsorgliche pauschale Abschaltzeiten bei Windgeschwindigkeiten unter 6 m / s und Temperaturen über 10 °C im Zeitraum vom 01.04. bis 31.10. Für Beprobungen vor 2018 fehlte meist die Information zu Abschaltvorgaben, außer für die Erfassungen in RENEBAAT I und II (Behr, Brinkmann et al. 2011a; Behr, Brinkmann et al. 2015), die an WEA ohne Abschaltvorgaben durchgeführt wurden.

Tab. 1: Anzahl erfasster WEA-Jahre aus verschiedenen Datensätzen mit (1) nur Gondeldaten aus den Jahren 2008 bis 2023 und mit (2) sowohl Gondel als auch Turm Daten aus den Jahren 2018 bis 2023 (letztere schließen die eigenen Erfassungen in sechs WEA-Jahren im Projekt mit ein). Erfassungen in unterschiedlichen Jahren an derselben WEA gingen mehrfach ein; Erfassungen mit mehreren Mikrofonen im selben Jahr an derselben WEA wurden nur einfach gezählt.

Naturraum	Anzahl erfasster WEA-Jahre	
	nur Gondel	Gondel & Turm
Küste (KU)	21	6
Nordostdeutsches Tiefland (NO)	89	9
Nordwestdeutsches Tiefland (NW)	71	14
Östliche Mittelgebirge (OM)	12	2
Westliche Mittelgebirge (WM)	186	6
Südwestdeutsche Mittelgebirge (SW)	45	0
Summe	424	37

Tab. 2: Anzahl der Messnächte pro Detektortyp und Naturraum. Die zweite Zeile im Spaltentitel bezeichnet Erfassungen (1) nur an der Gondel (G) oder (2) kombiniert an der Gondel und am Turm (G&T). Abkürzungen für die Naturräume siehe Tab. 1. Die in der Tabelle dargestellten Detektoren und Einstellungen: Avisoft/BATmode System mit Erfassungsschwelle 37 dB SPL, Batcorder mit Erfassungsschwelle -36 dBFS = 60 dB SPL, Batcorder mit Erfassungsschwelle -27 dBFS = 69 dB SPL und Anabat SD1 mit Kalibrierung entsprechend dem Standard aus RENEBAT I (Behr, Brinkmann et al. 2011c). Für 312 mit Avisoft/BATmode nur an der Gondel erfasste Nächte in der Region Küste wurde die alte Avisoft Erfassungsschwelle 50 dB SPL verwendet. Wie in Tab. 1 gingen Erfassungen in unterschiedlichen Jahren an derselben WEA mehrfach ein; Erfassungen mit mehreren Mikrofonen im selben Jahr an derselben WEA wurden nur einfach gezählt.

Anzahl der Messnächte pro Detektortyp und Naturraum										
Naturraum	Alle Detektoren		Avisoft/BATmode		Baticorder -36 dB		Baticorder -27 dB		Anabat SD1	
	G	G&T	G	G&T	G	G&T	G	G&T	G	G&T
KU	3.274	3.536	312	3.536	1.768	0	0	0	1.194	0
NO	18.357	4.328	0	1.956	11.830	2.372	0	0	6.527	0
NW	16.771	5.973	10.449	5.973	1.948	0	0	0	4.374	0
OM	2.856	1.956	486	1956	1.884	0	486	0	0	0
WM	40.996	2.441	426	0	26.692	2.441	10.808	0	3.070	0
SW	8.646	0	0	0	4.364	0	3.594	0	688	0
Summe	90.900	18.234	11.361	13.421	48.486	4.813	14.888	0	15.853	0

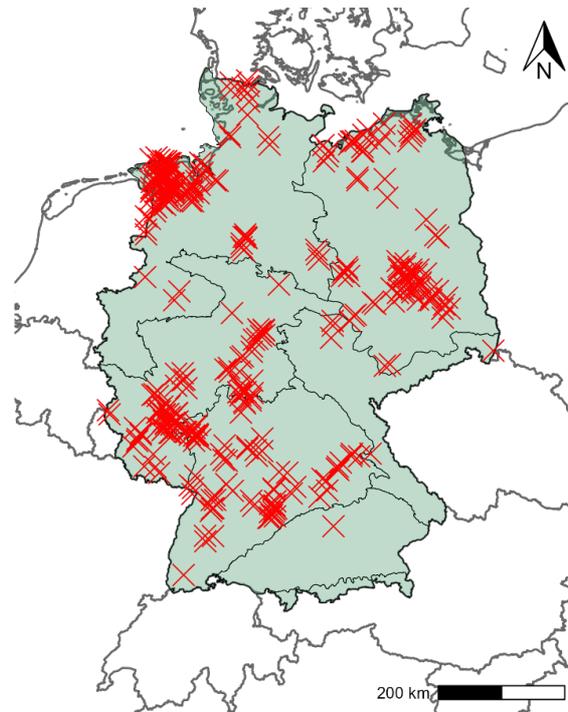


Abb. 1: Räumliche Verteilung der WEA im Datensatz. Das Bundesgebiet ist unterteilt dargestellt in die in ProBat unterschiedenen naturräumlichen Regionen – im Uhrzeigersinn: Küste (KU), Nordostdeutsches Tiefland (NO), Östliche Mittelgebirge (OM), Südwestdeutsche Mittelgebirge (SW – einschließlich Voralpenland), Westliche Mittelgebirge (WM) und Nordwestdeutsches Tiefland (NW). Die Standorte sind mit einer zufälligen geografischen Unschärfe (jitter) dargestellt, um eine Zuordnung individueller WEA zu verhindern (Quelle der Landesgrenzen: Open Street Maps).

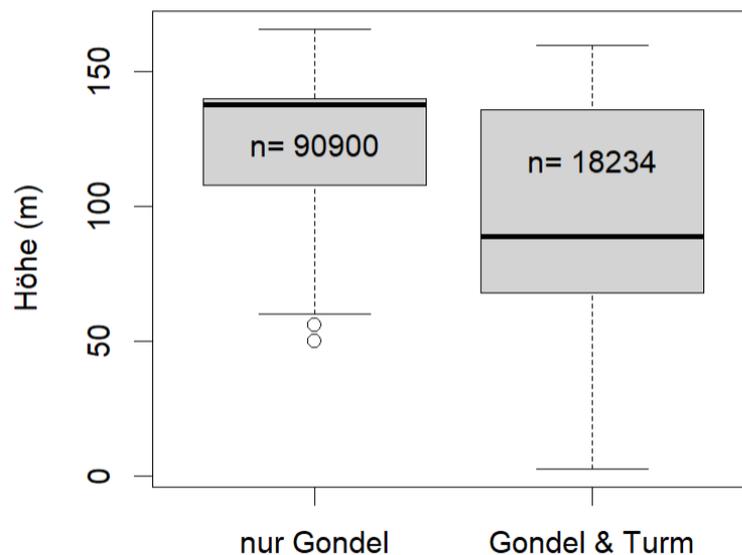


Abb. 2: Anzahl der Mikrofon-Nächte und Höhe der Erfassungspunkte für aus Erfassungen (1) nur mit Gondelmikrofonen („nur Gondel“) und (2) mit Gondel- und Turmmikrofon(en) einschließlich Mikrofone in Bodennähe („Gondel & Turm“). Erfassungen mit Gondel & Turmmikrofonen enthielten 8213 Nächte von Gondelmikrofonen und 10021 Nächte von Turmmikrofonen. y-Achse: Mikrofonhöhe in Metern über dem Boden; Beschriftung in den Boxen: Anzahl der Mikrofon-Nächte.

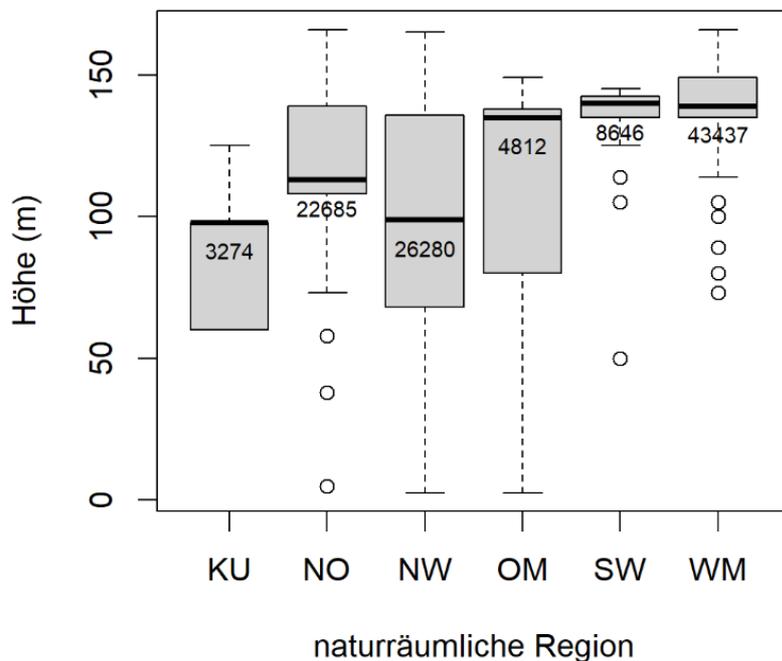


Abb. 3: Anzahl der Mikrofon-Nächte und Höhe des Erfassungspunktes je naturräumlicher Region. y-Achse: Mikrofonhöhe in Metern über dem Boden; x-Achse: Regionen, Lage und Akronyme der Regionen siehe Abb. 1; Beschriftung unterhalb der Mediane: Anzahl der Mikrofon-Nächte (alle Gondel- und Turmerfassungen).

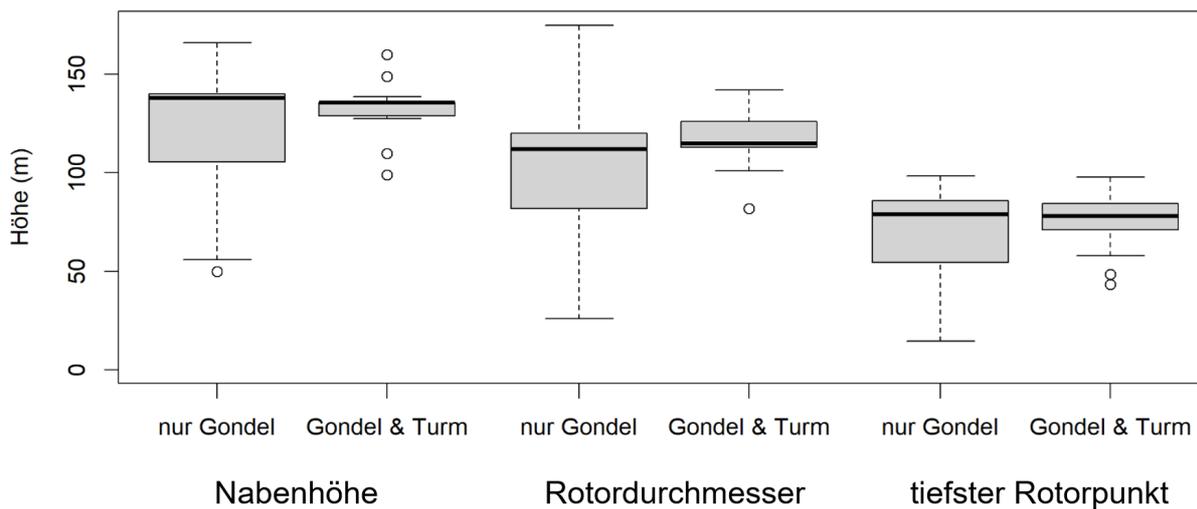


Abb. 4: Anlagengröße der beprobten WEA. Dargestellt sind die Nabhöhe (in Metern über dem Boden), der Rotordurchmesser (in Metern) und der resultierende tiefste vom Rotor überstrichene Punkt (in Metern über dem Boden) jeweils für WEA, die (1) nur an der Gondel (n = 267 WEA) oder (2) an der Gondel und am Turm (n = 24 WEA) beprobt wurden.

3.2 Akustische Erfassung

3.2.1 Eigene akustische Erfassungen

3.2.1.1 Erfassungstechnik und Installation

Wir verwendeten jeweils zwei Fledermausdetektoren vom Typ BATmode 2S+ (bioacoustic-technology GmbH – bis zu vier Eingangskanäle, der Anschluss von Turmmikrofonen über Kabel ist seit längerem in der Praxis erprobt) pro WEA für die akustische Erfassung der Fledermausaktivität in insgesamt vier verschiedenen Höhen über dem Boden. Ein Gerät wurde jeweils in der Gondel und eines im Fuß der WEA installiert. Die Erfassung orientierte sich an den ProBat Standards (Behr, Brinkmann et al. 2011c; Weber, Nagy et al. 2018: Kalibrierung, Detektoreinstellungen, Position des Gondelmikrofons, etc.). Neben jeweils einem Mikrofon in der Gondel (Gondelmikrofonscheibe GM90 von bioacoustictechnology; Standardinstallation nach RE-NEBAT mit nach unten gerichtetem Scheibenmikrofon im Boden der Gondel) und in Bodennähe (Turmmikrofon TM20 von bioacoustictechnology; Installation in einer Kabeldurchführung mit Durchmesser M32 an den dort vorhandenen Strukturen der WEA in etwa 2 m bis 4 m Höhe über dem Boden – siehe Abb. 5 und Abb. 6) wurden zwei Mikrofone (Turmmikrofon TM20 von bioacoustictechnology) in möglichst gleichmäßigen Abständen am Turm installiert. Die zwei Mikrofone am Turm wurden entweder von innen nach außen durch eine für Befeuerungslampen vorgesehene Bohrung im Betonturm gesteckt (in einer Kunststoffröhre mit Innendurchmesser 20 mm – siehe Abb. 6) oder von außen am Stahlturm mit einer Magnethalterung befestigt (Anbieter bioacoustictechnology – siehe Abb. 5; für die Installationshöhen siehe Abb. 4). In beiden Fällen befand sich die Mikrofonkapsel in einem Abstand von etwa 10 cm bis 15 cm von der Außenwand des Turmes. Eine mit der Außenwand bündige Installation wäre bei der durch den Turm gesteckten Variante zwar möglich und hätte akustische Vorteile, wie die Reduktion von Echos und Interferenzen, wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit verschiedener Mikrofon-Varianten und vor allem zugunsten eines besseren Witterungsschutzes, z. B. die Vermeidung von am Turm herablaufendem Regenwasser, jedoch nicht gewählt. Die Ausrichtung der Turmmikrofone war Ost bis Südost, ebenfalls um die Mikrofonkapseln möglichst wenig direktem Niederschlag auszusetzen.

Die Befestigung der Kabel am Turm erfolgte auf der Innenseite mit Kabelbindern an vorhandenen Leitern und Kabelkanälen und auf der Außenseite der Stahltürme mit UV-beständigen Magnethaltern (siehe Abb. 6). Für die Turmmikrofone ergaben sich je nach Installationshöhe und Führung der geschirmten Signalkabel (Anbieter bioacoustictechnology) außen oder innen am Turm Kabellängen von 40 m bis 110 m bis zum Detektor. Für die Signalabschwächung durch Leitungsverluste wurden die Erfassungsschwellen entsprechend den Angaben von bioacoustictechnology korrigiert. Der BATmode verwendet in den von uns eingesetzten Mikrofonen einen Vorverstärker, der ein differentielles analoges Signal zum Detektor überträgt, das deutlich resistenter gegen elektromagnetische Störungen ist als eine einfache Übertragung des unverstärkten Mikrofonsignals (Behr, Barré et al. 2023). Wir konnten keine erhöhte Empfindlichkeit der Detektoren gegenüber elektromagnetischen Störsignalen feststellen, auch nicht bei den längeren von uns verwendeten Kabelvarianten.

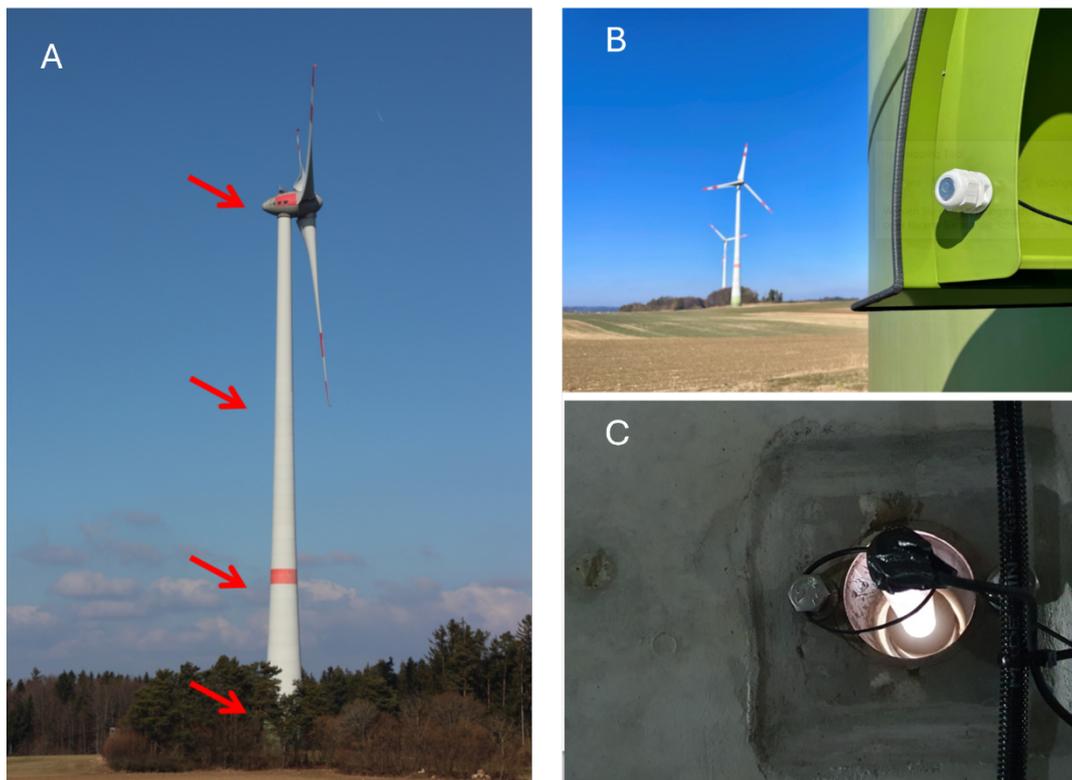


Abb. 5: Installation der vier Mikrofone in unterschiedlichen Höhen an einer E115 des Herstellers Enercon in Süddeutschland (A). Neben dem üblichen Gondelmikrofon konnten hier für die zwei Beprobungen am Turm die für die Befuerung vorgesehenen Öffnungen verwendet werden: jeweils eine Befuerungslampe auf der Ostseite des Turms wurde durch ein in einer durchsichtigen Kunststoffröhre mit entsprechendem Radius eingepasstes Mikrofon ersetzt (C). Die Mikrofonkabel konnten im Inneren der WEA entlang von Kabelkanälen und Leitern bis zum Detektor am Boden verlegt werden. Das Mikrofon in Bodennähe wurde hier am Regendach der Eingangstür installiert (B). (Quelle: Oliver Behr, eigene Aufnahmen)

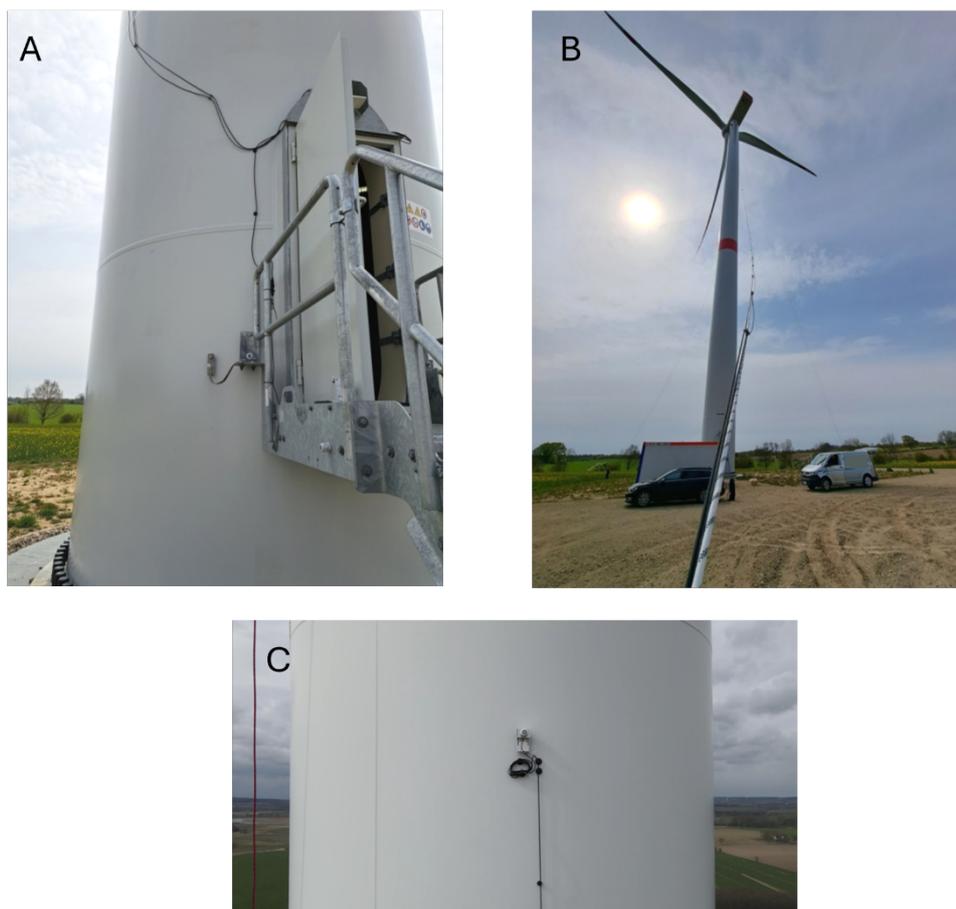


Abb. 6: Installation der Turmmikrofone an einer N133 des Herstellers Nordex in Nordostdeutschland. Es war hier nicht möglich, Kabel durch den Stahlurm von innen nach außen zu führen, weshalb die Kabel der Turmmikrofone mit Magnethaltern außen an der WEA vom Fuß bis zur Beprobungshöhe (Mikrofon in Bild C) geführt wurden. Zur Installation wurde das Mikrofonskabel an einem Statikseil befestigt und dann von einem Industriekletterer am Turm angebracht (B) In Bild A sind die aus dem Fuß der WEA nach oben führenden Mikrofonskabel und auch das im horizontalen Stahlträger der Treppe angebrachte Mikrofon in Bodennähe (C) zu erkennen. (Quelle: Oliver Behr, eigene Aufnahmen)

3.2.1.2 Kalibrierung

Um mit anderen Untersuchungen vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, müssen Mikrofone vor ihrer Installation am Beginn der Erfassungssaison vom Hersteller kalibriert werden. Mikrofone verlieren jedoch oft auch während der Laufzeit an Empfindlichkeit (häufig beobachtet z. B. bei den Mikrofonen der Batcorder). Wenn die Empfindlichkeit stark (mehr als 6 dB) von der ursprünglich kalibrierten abweicht, kann nicht mit der in den RENEBAAT Projekten entwickelten Formel aus der Zahl der Aufnahmen die Zahl der Schlagopfer geschätzt werden. Teil der Datenerfassung sollte daher auch immer eine regelmäßige Kontrolle der Empfindlichkeit der Mikrofone sein.

Die Mikrofone für die Erfassung in diesem Projekt wurden vor und bei Auffälligkeiten auch nach der Erfassung kalibriert. Die Rekalibrierung nach der Erfassung zeigte außer bei Mikrofonen, die wegen einer abweichenden Empfindlichkeit getauscht wurden, keine problematischen Abweichungen. Darüber hinaus wurde die Empfindlichkeit der Mikrofone über einen in

die Mikrofonscheibe integrierten Testsignalgeber täglich gemessen und über Datenfernabfrage geprüft. Lag die Empfindlichkeit länger als drei Tage in Folge außerhalb des Toleranzbereiches, wurde der Zeitraum als ungültig gewertet und das Mikrofon getauscht.

3.2.1.3 Prüfung der Zeitstempel

Die BATmode Fledermausdetektoren basieren auf einem Windows PC, der kontinuierlich online ist, was korrekte Zeitstempel der Rufaufnahmen gewährleistet. Es ist jedoch nach wie vor sehr wichtig, die Zeitstempel der WEA-Daten zu kontrollieren, damit der Zusammenhang von Fledermausaktivität und z. B. Windgeschwindigkeit korrekt beschrieben wird. Falsche Uhrzeiten im Sinne eines um Sekunden oder Minuten verschobenen Zeitstempels treten fast ausschließlich bei älteren Datensätzen auf. Auch bei neueren WEA besteht jedoch bei den Betreibern und Herstellern nach wie vor häufig Unsicherheit über die im Zeitstempel verwendete Zeitzone (z. B. UTC, CEST/CET, UTC+1 oder UTC+2 für das ganze Jahr). Die von uns eingelesenen WEA-Daten wurden daher z. B. hinsichtlich der Umstellung von Sommer- und Winterzeit und der im Zeitstempel verwendeten Zeitzone entsprechend dem Vorgehen in der ProBat Software kontrolliert und ggf. korrigiert: Dazu werden die Temperaturdaten verwendet, die durch das SCADA-System der WEA parallel zu den Winddaten erfasst wurden. Die Temperaturwerte werden gemittelt im Tagesverlauf relativ zum Sonnenaufgang geplottet. Ein falsches Zeitformat (z.B. Winter- statt Sommerzeit, also UTC+1 statt UTC+2) ist in dieser Abbildung daran zu erkennen, dass das Temperaturminimum im Tagesverlauf nicht mit dem Sonnenaufgang zusammenfällt. Kleinere Abweichungen können je nach Standort jedoch auftreten.

3.2.1.4 Automatisierte und manuelle Fledermaus- und Art(gruppen)bestimmung

Zunächst wurden alle 497.665 in den Jahren 2022 und 2023 registrierten Aufnahmen aus dem bearbeiteten Zeitraum mit der Software Avisoft-Recorder (Avisoft Bioacoustics) automatisch klassifiziert. Hierbei wurden von Avisoft-Recorder 315.495 Aufnahmen als Fledermaus kategorisiert, der Rest als Störungen. Die automatische Fledermauserkennung mit Avisoft-Recorder ist aus Gründen der Vergleichbarkeit verschiedener Datensätze Voraussetzung für die Verwendung von ProBat. Die „BMU“ Settings³ sind so gewählt, dass relativ viele Fledermausaufnahmen auch als solche erkannt werden. Entsprechend werden jedoch auch relativ viele Störsignale als Fledermäuse bestimmt (Weber, Nagy et al. 2018). Die automatische Bestimmung mit Avisoft-Recorder unterliegt wie jede automatische und auch manuelle Analyse von Fledermausaufnahmen zahlreichen Einschränkungen. Avisoft-Recorder bietet eine relativ grobe Klassifizierung meist nur auf Artgruppenniveau.

Alle von Avisoft-Recorder als Fledermaus identifizierten Aufnahmen, die zwischen vier Stunden vor Sonnenuntergang und einer halben Stunde nach Sonnenaufgang lagen, wurden im nächsten Schritt zusätzlich mit der im Jahr 2022 veröffentlichten Software BATscreen Pro (Version 3.0.9, bioacousticstechnology) automatisch klassifiziert. Die Software verwendet Convolutional Neuronal Networks (CNN) und einen Maximum-Likelihood-Ratio-Test (MLRT) um im ersten Schritt eine gegenüber Avisoft-Recorder verbesserte Unterscheidung von Fledermausrufen und Störgeräuschen und im zweiten Schritt eine Art(gruppen)bestimmung durchzuführen.

³ In den RENEBAT Projekten wurde eine Standardanalyse mit Avisoft-Recorder für Aufnahmen mit dem Avisoft/BATmode Detektor definiert, die eine Vergleichbarkeit von Erfassungen gewährleistet und die als „BMU“ Settings Eingang in die Software gefunden hat (siehe Behr, Simon et al. 2015).

Um die Effizienz und Fehlerrate der Fledermauserkennung von BATscreen Pro für die Aufnahmen an den einzelnen Standorten zu bestimmen und zu kontrollieren, wurden für alle vier Erfassungspunkte aller sechs WEA 20 % der mit BATscreen Pro klassifizierten Aufnahmen zufallsausgewählt und zusätzlich manuell in Fledermausrufe und Störsignale unterschieden. Anschließend wurde das Ergebnis der manuellen Bestimmung mit den Ergebnissen der automatisierten BATscreen Pro Bestimmung verglichen: Ermittelt wurde der prozentuale Anteil falsch-negativer und falsch-positiver⁴ automatisierter Bestimmungen. Lag eine der beiden ermittelten Fehlerraten bei über 2 %, so wurden für diesen Erfassungspunkt alle Aufnahmen des gesamten Erfassungszeitraums (traf auf einen Erfassungspunkt zu) oder ein Teil des Erfassungszeitraums mit besonders vielen Störungsaufnahmen (traf auf zwei Erfassungspunkte zu) zusätzlich manuell kategorisiert.

Zudem wurden alle automatisch erkannten Fledermausaufnahmen in Zeiten mit sehr niedriger Fledermausaktivität im März und November sowie im ersten (0-0.1) und letzten (0.9-1) Nachtintervall, bei Windgeschwindigkeiten $\geq 5,5 \text{ ms}^{-1}$, bei Temperaturen $\leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ und bei Niederschlagsintensitäten $\geq 0,5 \text{ mmh}^{-1}$ über die Zufallsstichprobe von 20 % hinaus manuell auf Störungen geprüft und die BATscreen Pro Kategorisierung gegebenenfalls korrigiert. Aufnahmen, die in der manuellen Analyse nur akustische oder elektromagnetische Störsignale enthielten, wurden dabei aus dem Datensatz entfernt.

Mit dem beschriebenen Vorgehen wurden 242.278 der 497.665 Dateien als Fledermausrufe und der Rest als Störungen klassifiziert. Dieser Datensatz ging in die weiteren Analysen und Berechnungen ein. Bei der manuellen Analyse wurde keine Bestimmung auf Artniveau durchgeführt, lediglich hochrufende (Pipistrelloid) und tiefrufende Arten (Nyctaloid) wurden differenziert.

Die von BATscreen Pro angegebenen Artbestimmungen für die an WEA häufigen und akustisch relativ einfach zu bestimmenden Arten(gruppen) wurden übernommen. Dabei wurde pro Aufnahme jeweils nur die als am wahrscheinlichsten angegebene Art ausgewählt. Das heißt, die automatischen Bestimmungen für die Arten Zwergfledermaus, *P. pipistrellus*, Flughautfledermaus, *P. nathusii*, und Großer Abendsegler, *N. noctula*, sowie die Artengruppen Nyctaloid (tieffrequent rufende Arten aus den Gattungen *Nyctalus*, *Eptesicus* und *Vespertilio*) und Pipistrelloid (hochfrequent rufende Arten aus der Gattung *Pipistrellus*) wurden in unserer Auswertung verwendet.

Bei dem von uns verwendeten und hier beschriebenen automatisierten Verfahren der Rufbestimmung ist für die seltenen Arten eine manuelle Nachbestimmung Voraussetzung, um sinnvolle Prozentanteile an der Gesamtaktivität oder auch nur einen sicheren Artnachweis anzugeben. Wir verzichteten daher wie auch bei den Gutachtendatensätzen (Abschnitt 3.2.2) darauf, die Höhenverteilungen für die selteneren Arten und Gattungen, wie z. B. die Gattungen *Plecotus* und *Myotis* und die Mopsfledermaus, *Barbastella barbastellus*, darzustellen. Es ist

⁴ Anteil falsch negativer Bestimmungen: Anteil von BATscreen Pro als Störung bestimmter, jedoch manuell als Fledermaus kategorisierter Aufnahmen von allen Fledermausaufnahmen. Anteil falsch positiver Bestimmungen: Anteil von BATscreen Pro als Fledermaus bestimmter, jedoch manuell als Störung kategorisierter Aufnahmen von allen Fledermausaufnahmen (ebenfalls als Anteil der Fledermausaufnahmen, da die Zahl der Störungsaufnahmen für verschiedene Mikrofone sehr unterschiedlich war).

jedoch davon auszugehen, dass die genannten Arten, die bei Gondelerfassungen nur in Ausnahmefällen auftreten, am Boden und in den tieferen Luftschichten regelmäßig nachweisbar sind.

3.2.2 Daten aus Eingriffsgutachten

Eines der Ergebnisse der RENEBAT Projekte war die Etablierung einer akustischen Aktivitätserfassung im Rotorbereich von WEA ("Gondelmonitoring": Behr, Brinkmann et al. 2011c). Der methodische Ansatz wurde so weit standardisiert, dass an verschiedenen Anlagen und mit verschiedenen Detektoren erzielte Ergebnisse miteinander vergleichbar sind (Korner-Nievergelt, Almasi et al. 2018). Entsprechend den Vorgaben der RENEBAT Projekte können aktuell drei verschiedene Detektortypen für die automatisierte akustische Fledermauserfassung eingesetzt werden: Der Batcorder der Firma EcoObs, der Anabat SD1 der Firma Titley und der BATmode der Firma bioacoustictechnology (bzw. das zugrunde liegende System der Firma Avisoft). Teilweise sind unterschiedliche Empfindlichkeitseinstellungen möglich.

In den uns freundlicherweise für die Weiterentwicklung von ProBat von diversen Bearbeiter*innen seit dem Jahr 2014 zur Verfügung gestellten Datensätzen kamen folgende Detektoren und Einstellungen (für Details zu den Detektoren und Einstellungen siehe Behr, Barré et al. 2023) zum Einsatz (vgl. Tab. 2): Avisoft/BATmode (bioacoustic technology) System mit Erfassungsschwelle 37 dB SPL, ein altes Avisoft System mit einer Erfassungsschwelle von 50 dB SPL, Batcorder (Firma ecoObs) mit den Erfassungsschwellen -36 dBFS = 60 dB SPL und -27 dBFS = 69 dB SPL sowie Anabat SD1 mit Kalibrierung entsprechend dem Standard aus RENEBAT I (Behr, Brinkmann et al. 2011c).

Die uns zur Verfügung gestellten Daten wurden eingehend auf Plausibilität geprüft (u. a. Prüfung der Zeitstempel der WEA-Daten – siehe Abschnitt 3.2.1.3) und ggf. in zahlreichen Rücksprachen mit den Erfassenden korrigiert oder bei nicht behebbaren Unsicherheiten ganz ausgeschlossen. Geprüft wurde hierbei die Plausibilität sowohl der WEA-Daten (vor allem Verteilungen der Windgeschwindigkeit und Temperatur insgesamt und im Jahresverlauf) als auch der Daten zur Fledermausaktivität (Plausibilität des Artenspektrums sowie der Aktivitätsverteilungen über das Jahr, über die Nacht, über der Windgeschwindigkeit und Temperatur). Informationen zur Kalibrierung der jeweils verwendeten Mikrofone und zur möglichst täglichen Prüfung der Empfindlichkeit lagen nur für einen kleinen Teil der zur Verfügung gestellten Datensätze vor. Bei schwer erklärlichen Aktivitätslücken wie z. B. einem völligen Fehlen von Aufnahmen in einem warmen Sommerzeitraum an Standorten mit sonst zumindest mittlerer Aktivität, wurde ebenfalls Rücksprache mit den Erfassenden gehalten und bei verbleibenden Unsicherheiten einzelne WEA-Jahre oder ggf. komplette Datensätze ausgeschlossen.

Für die an WEA häufigen und akustisch relativ einfach zu bestimmenden Arten(gruppen) verwendeten wir in unserer Auswertung die in den Gutachtendatensätzen angegebenen Artbestimmungen: Nyctaloid (tieffrequent rufende Arten aus den Gattungen *Nyctalus*, *Eptesicus* und *Vespertilio*), Pipistrelloid (hochfrequent rufende Arten aus den Gattungen *Pipistrellus* und *Hypsugo*) sowie die Arten Zwergfledermaus, *P. pipistrellus*, Flughautfledermaus, *P. nathusii*, und Großer Abendsegler, *N. noctula*.

Nur für einige der uns zur Verfügung gestellten Datensätze liegt uns die Information vor, dass die automatische Artbestimmung der Aufnahmen manuell geprüft wurde. Für die seltenen Arten ist eine solche manuelle Nachbestimmung Voraussetzung, um sinnvolle Prozentanteile an der Gesamtaktivität oder auch nur einen sicheren Artnachweis anzugeben. Wir verzichten daher hier, wie auch bei den eigenen Daten (Abschnitt 3.2.1.4), darauf, die Höhenverteilungen

für die selteneren Arten und Gattungen, wie z. B. die Gattungen *Plecotus* und *Myotis* und die Mopsfledermaus, *Barbastella barbastellus*, darzustellen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die genannten Arten, die bei Gondelerfassungen nur in Ausnahmefällen auftreten, am Boden und in den tieferen Luftschichten regelmäßig nachweisbar sind.

3.2.3 Unterschiedene Arten und Artengruppen

Die deutschen und wissenschaftlichen Bezeichnungen der hauptsächlich relevanten Arten und Artengruppen bei der Erfassung im Gondelbereich von WEA in Mitteleuropa sind in Tab. 3 angegeben. Dargestellt sind sowohl die Kategorien für auf Artniveau bestimmte Aufnahmen als auch solche für Aufnahmen, bei denen eine Bestimmung nur bis zu einer bestimmten Artengruppe oder nur allgemein als Fledermaus (Chiroptera) möglich ist.

Weniger differenzierte Gruppen schließen die in ihnen enthaltenen differenzierteren Gruppen ein. Zum Beispiel enthält die Gruppe Pipistrelloid alle Aufnahmen, die Arten der Gattungen *Pipistrellus* (und *Hypsugo*) zugeordnet werden und zusätzlich die Aufnahmen, die nur als Pipistrelloid (also als Ruftyp *Pipistrellus/Hypsugo*) bestimmt werden. Die Kategorie Chiroptera enthält entsprechend sämtliche als Fledermausrufe erkannte Aufnahmen. In unserem Zusammenhang wichtige Ruftypen oder Artengruppen sind:

- *Nyctalus noctula*, *Nyctalus leisleri*, *Eptesicus serotinus* und *Vespertilio murinus*
→ in der Gruppe „Nyctaloid“ zusammengefasst
- *Pipistrellus pipistrellus*, *Pipistrellus pygmaeus* und *Pipistrellus nathusii*
→ in der Gruppe „Pipistrelloid“ zusammengefasst

Tab. 3: Die deutschen und wissenschaftlichen Bezeichnungen der hauptsächlich relevanten Arten und Artengruppen bei der Erfassung im Gondelbereich von WEA in Mitteleuropa. Im Text wird vom Gattungsnamen (erster Teil des wissenschaftlichen Namens) nur der erste Buchstabe angegeben. Zu den Arten der Artengruppen Nyctaloid und Pipistrelloid siehe Auflistung im Text.

Wissenschaftlicher Artname (kursiv) bzw. Bezeichnung einer Artengruppe (Ruftyp)	Deutscher Artname bzw. Beschreibung einer Artengruppe	Kurzbezeichnung der Art oder Artgruppe bei der automatisierten Rufbestimmung
Chiroptera	Alle Fledermausarten	Chiroptera
Nyctaloid	Große Arten mit tiefen Ruffrequenzen	Nyctaloid
<i>Nyctalus noctula</i>	Großer Abendsegler	Nnoc
<i>Nyctalus leisleri</i>	Kleinabendsegler	Nlei
<i>Vespertilio murinus</i>	Zweifarbflodermas	Vmur
<i>Eptesicus serotinus</i>	Breitflügelflodermas	Eser
Pipistrelloid	Kleine Arten mit hohen Ruffrequenzen	Pipistrelloid
<i>Pipistrellus pipistrellus</i>	Zwergflodermas	Ppip
<i>Pipistrellus nathusii</i>	Rauhhaufledermas	Pnat
<i>Barbastella barbastellus</i>	Mopsflodermas	Bbar

3.3 Wärmeoptische 3D-Erfassung

Wir konnten in Kooperation mit der UMIT (siehe Abschnitt 2.2) in vier Nächten im Jahr 2022 eigene wärmeoptische Erfassungen der räumlichen Verteilung der Fledermausaktivität an einer WEA durchführen. Die für das Jahr 2023 geplanten Erfassungen waren leider nicht möglich, da die Kameras für Erfassungen in einem anderen Projekt benötigt wurden, dessen Start sich verzögert hatte. Dankenswerterweise wurden uns jedoch die im Windtestfeld Baden-Württemberg⁵ erfassten Daten für unsere Fragestellung zur räumlichen Verteilung von Fledermäusen um WEA zur Verfügung gestellt. Wir konnten den Datensatz aus der Erfassungssaison 2024 für unsere Auswertung verwenden (vgl. Abb. 7), der den für Fledermausschlag an WEA relevanten Zeitraum fast vollständig abdeckte und somit auch phänologische Unterschiede abbildet.

3.3.1 Erfassungszeiträume

3.3.1.1 Eigene Erfassungen

Vom 22.06.2022 bis zum 27.06.2022 erfassten Christof Happ und Klaus Hochradel von der UMIT in 4 Nächten (Tab. 4) die Fledermausaktivität mit einem Stereokamerasystem an einer WEA, die in ProBat der naturräumlichen Region OM (Östliche Mittelgebirge) zugeordnet wird und die in der gesamten Erfassungssaison 2022 von uns mit vier Mikrofonen in unterschiedlichen Höhen akustisch beprobt wurde.

Tab. 4: Zeiträume der wärmeoptischen 3D Erfassung.

Datum Start	Uhrzeit Start	Datum Ende	Uhrzeit Ende
22.06.22	22:34:00	22.06.22	23:36:00
23.06.22	21:54:00	24.06.22	00:12:00
25.06.22	21:49:00	26.06.22	0:19:00
26.06.22	21:40:00	27.06.22	0:21:00

3.3.1.2 Erfassungen in NatForWINSENT II

In die hier dargestellte Auswertung gingen die Daten der wärmeoptischen Erfassung im Projekt NatForWINSENT II⁵ im Jahr 2024 ein. Der uns freundlicherweise aufbereitet zur Verfügung gestellte Datensatz umfasst den Zeitraum 10.4.2024 bis 28.10.2024 mit kontinuierlicher nächtlicher Erfassung und einigen Ausfällen (Abb. 7).

⁵ BfN-Projekt NatForWINSENT II – Naturschutzforschung im onshore Windenergie-Testfeld WINSENT (FKZ: 3518 86 0100 und 3523 15 1900) gefördert mit Mitteln des BMUV.

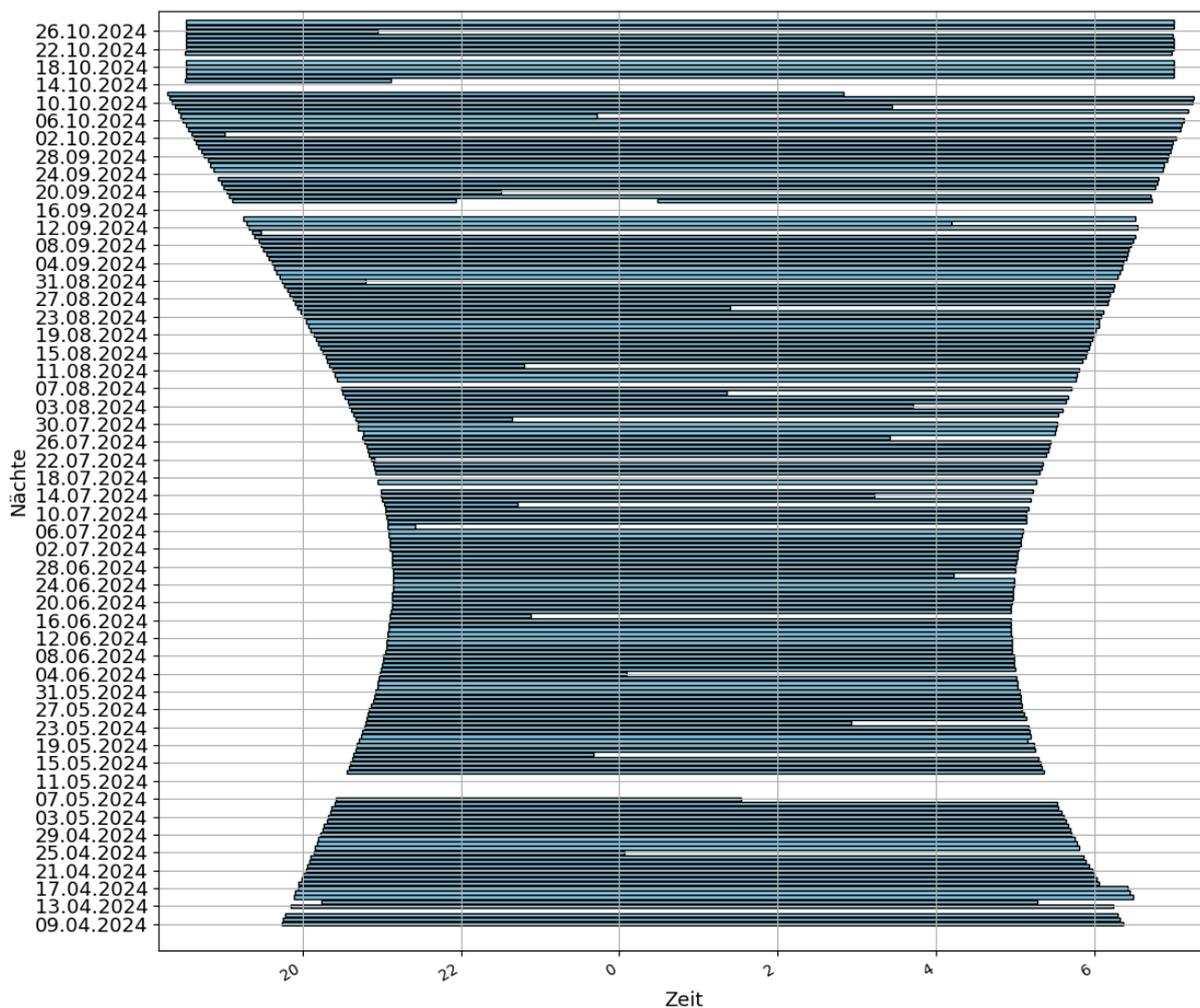


Abb. 7: Gültige Erfassungszeiträume der wärmeoptischen 3D-Erfassung im Projekt NatForWINSSENT II, die uns für unsere Auswertung zur Verfügung gestellt wurden. Die y-Achse listet das Datum, auf der x-Achse ist die Uhrzeit aufgetragen.

In der Analyse wurden nur unterhalb der Gondelhöhe von 75 m detektierte Fledermauspositionen verwendet. Lücken in den Flugbahnen (einzelne Bilder innerhalb einer Flugbahn ohne Detektionen) wurden linear interpoliert. Aus den Detektionspunkten wurde die Aktivitätsdichte (Detektionen pro Raumvolumen) für Zylinder mit unterschiedlichen Radien um den Turm der WEA berechnet (Abb. 8). Für einen Teil der Auswertungen wurden die Zylinderhälften vor und hinter der WEA unterschieden.

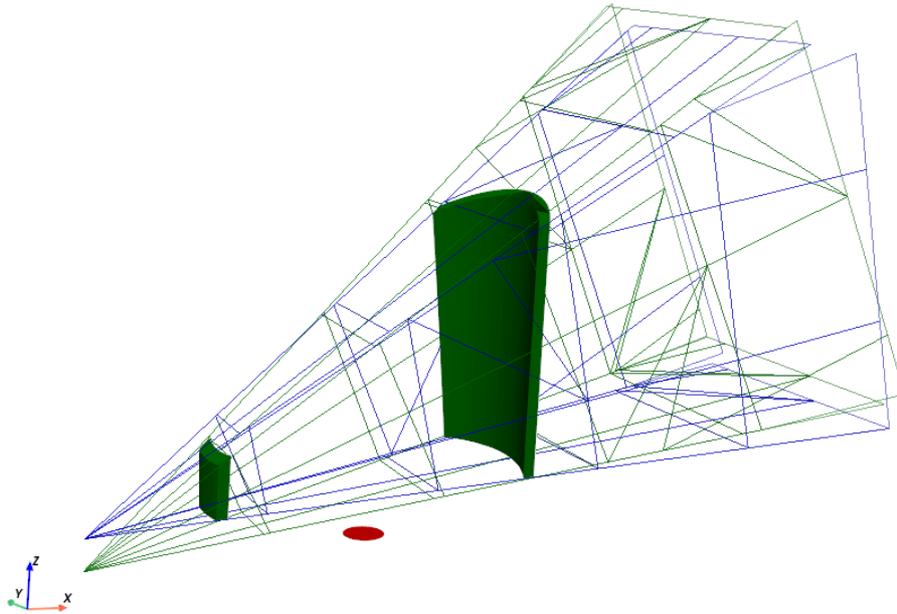


Abb. 8: Bestimmung der Fledermausaktivität in Abhängigkeit vom horizontalen Abstand zur WEA. Die Aktivitätsdichte wurde berechnet als Zahl der Detektionen pro Raumvolumen für Zylinderschalen mit unterschiedlichem Radius um den Turm der WEA. Gezeigt ist die Zylinderschale mit 80 m Abstand zur WEA in Grün, soweit sie sich innerhalb des Stereosichtfeldes befand. Für einen Teil der Auswertung wurden die Zylinderhälften vor und hinter der WEA unterschieden. Der Fuß der WEA ist als roter Punkt markiert, die Kameras befinden sich in der linken unteren Ecke.

3.3.2 Aufbau des Erfassungssystems

Es wurden in allen optischen Erfassungen zwei Wärmebildkameras vom Typ Headx 600 der Firma Infratec in einem Stereosetup für die Erfassung mit Daueraufnahmen verwendet (Auflösung 640 x 480 Pixel, thermische Auflösung 20 mK, Bildwiederholfrequenz 15 Hz). Die Kameras wurden in einer Entfernung von etwa 100 m vom Turmfuß bodennah aufgebaut (siehe Abb. 9). Der horizontale Abstand der beiden Kameras betrug etwa 12 m.

3.3.3 Sichtfeld

Die beiden Wärmebildkameras waren bei allen Erfassungen hochkant orientiert, um einen möglichst großen Bereich der WEA abdecken zu können. Das Stereosichtfeld in Gondelnähe betrug bei der gewählten Brennweite 70 x 50 m. Von den vier Mikrofonen, die während der **eigenen optischen Erfassung** ebenfalls an der WEA installiert waren, lagen die beiden oberen in 80 m Höhe über dem Boden am Turm und in 135 m an der Gondel im Sichtfeld der Wärmebildkameras (der Erfassungsbereich des Mikrofons auf 40 Höhe nur zu einem kleinen Teil). Vor allen optischen Aufnahmen wurden jeweils mindestens zwei Kalibrierungsflüge mit einer GPS-Drohne durchgeführt, um die Genauigkeit der 3D-Lokalisierung zu messen.

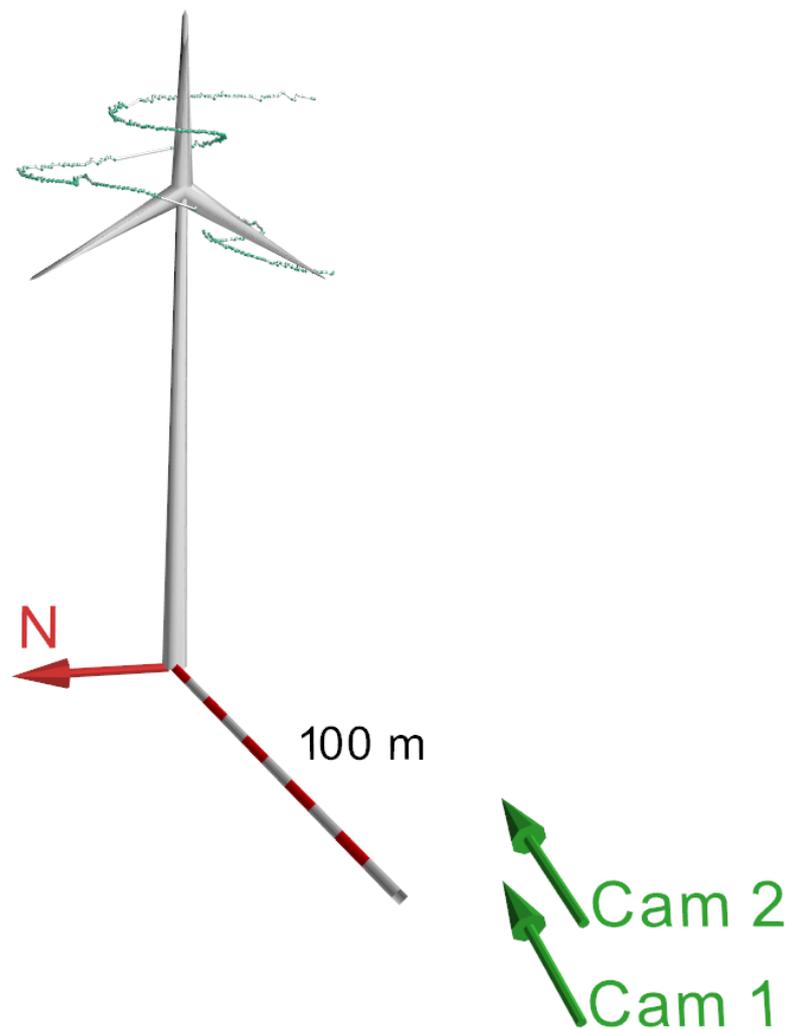


Abb. 9: Beispielbild einer mit wärmeoptischer 3D-Erfassung aufgezeichneten Flugbahn. Gezeigt sind die Flugbahn und der Abstand (Messbalken mit Länge 100 m, Abstand der Kameras zur WEA 135 m) der Kamerapositionen (grün) zu WEA und der geografische Norden als roter Pfeil. Rotorposition nur beispielhaft.

Durch die Höhenbegrenzung der Auswertung der **Daten aus NatForWINSSENT II** auf die Gondelhöhe von 75 m (siehe Abschnitt 3.3.1.2) umfasste das ausgewertete Volumen vor und hinter der WEA einen ähnlichen Höhenbereich, wodurch der Effekt der Abnahme der Aktivität mit der Höhe vor und hinter der WEA ähnlich war (Abb. 10). Durch die wesentlich höhere Gondel bei unseren eigenen Erfassungen waren hier die ausgewerteten Volumina und somit der Höheneffekt auf die Aktivität vor und hinter der WEA unterschiedlicher.

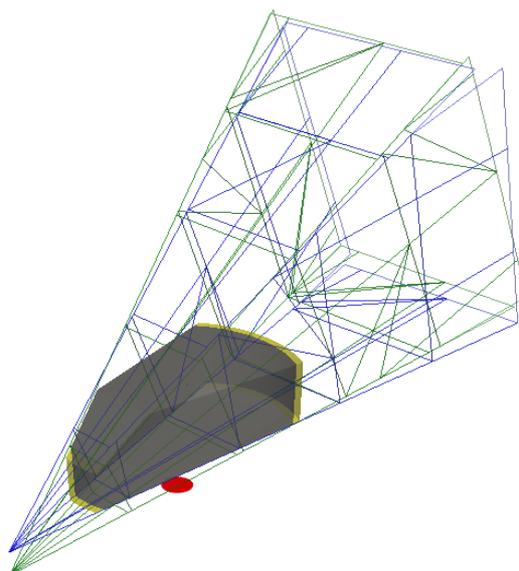


Abb. 10: Erfassung in NatForWINSSENT II: Sichtfeld der beiden Kameras im Stereosetup in grün und blau (Kameras in der linken unteren Bild Ecke im Abstand von 135 m von der WEA). Der Fuß der WEA ist als roter Punkt markiert. Darüber grau dargestellt das ausgewertete Raumvolumen im Bereich von 80 m vor und hinter dem Turm der WEA und bis zur Gondelhöhe von 75 m.

3.4 Messung der Niederschlagsintensität

In den Jahren 2023 und 2024 kooperierten wir mit dem WEA-Hersteller Enercon in einem Projekt, in dem in einem Norddeutschen Windpark die Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit verschiedener Niederschlagssensoren getestet wurden. Für eine datenbasierte, praxisorientierte Sensorwahl und den späteren qualifizierten Einsatz eines Niederschlagssensors wurden in einer 1-jährigen Messkampagne unter Begleitung des TÜV Nord folgende Sensoren untersucht: Thies Clima Sensor US, Thies Laser-Niederschlags-Monitor, Thies Niederschlagssensor sowie Luft Radar-Niederschlagssensor WS100.

Zur Validierung der Niederschlagsmessungen an der Gondel und um den Einfluss der WEA selbst auf die Messungen einschätzen zu können, wurden die Sensoren sowohl am Boden als auch auf der Gondel in 160 m Höhe platziert (doppelter Testaufbau, Parallelbetrieb). Um eine Beeinflussung durch weitere WEA im Windpark zu vermeiden, wurde die in Hauptwindrichtung vorderste Anlage für die Installation ausgewählt. Die Bodenmessstation befand sich ebenfalls in Hauptwindrichtung vor der gewählten Anlage und außerhalb des Rotoreinflusses.

Die Erfassung der Niederschlagswerte wurde von Enercon durchgeführt und die gleichzeitige Fledermauserfassung an einer anderen WEA im Park mit vier Mikrofonen in unterschiedlicher Höhe durch die Bearbeiter*innen des vorliegenden Projektes.

Außerdem wurde durch die Fleximaus GmbH an drei der von uns im Jahr 2023 beprobten Standorte ein wiegender Niederschlagssensor rain[e] der Firma Lambrecht Meteo (zwei Standorte) oder ein Thies Niederschlagssensor (ein Standort) installiert. Anders als bei den Erfassungen in Kooperation mit Enercon wurde der rain[e] direkt über der Eingangstür der

WEA installiert, was je nach Windrichtung zu einer deutlichen Verringerung (Regenschatten) oder Erhöhung (Regenstau) der gemessenen Niederschlagswerte führen kann.

3.5 Einflussvariablen

Wir modellieren den Effekt verschiedener Einflussvariablen auf die akustische Fledermausaktivität. Entsprechend der ProBat Software unterscheiden wir im Bundesgebiet die **naturräumlichen Regionen** (modifiziert nach Ssymank, Hauke et al. 1998) Küste (KU), Nordostdeutsches Tiefland (NO), Östliche Mittelgebirge (OM), Südwestdeutsche Mittelgebirge (SW – einschließlich Voralpenland), Westliche Mittelgebirge (WM) und Nordwestdeutsches Tiefland (NW). Auch die verschiedenen **Detektortypen und -einstellungen** (siehe Tab. 2 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) gingen als Einflussvariablen in die Modellierung ein.

Für einige Abbildungen und Analysen wurden kontinuierliche Einflussvariablen kategorisiert. Die an sich kontinuierliche numerische Skala der Variablen wurde dabei in diskrete Intervalle unterteilt, die dann als Faktorstufen verwendet wurden:

Um Nächte verschiedener Länge miteinander vergleichen und den Effekt auf die Aktivität bestimmen zu können, wurde die **Uhrzeit** in relative Werte umgerechnet (**Nachtzeit**). Der Sonnenuntergang erhielt den Wert 0, der Sonnenaufgang den Wert 1. Uhrzeiten wurden entsprechend umgerechnet (d.h. 0,5 entspricht der zeitlichen Mitte der Nacht). Wegen der relativ komplexen Abhängigkeit der Fledermausaktivität von der Nachtzeit, die sich nur schlecht über einen einfachen (z. B. linearen oder quadratischen) mathematischen Zusammenhang darstellen ließ, wurden die relativen Werte der Nachtzeit kategorisiert (Werte von 0 bis 1 in Schritten von 0.1) und als Faktor in die Analyse aufgenommen. Zusätzlich wurden 15 % der Nachtlänge vor Sonnenuntergang (ein Intervall mit negativen Werten von -0.15 bis 0) in die Analyse eingeschlossen. Nach Sonnenaufgang wurde keine Fledermausaktivität nachgewiesen.

Auch der **Monat** zeigt einen relativ komplexen Zusammenhang mit der Fledermausaktivität, der sich ebenfalls nur schlecht über einen einfachen mathematischen (linearen oder quadratischen) Zusammenhang darstellen lässt. Daher wurde auch der Monat (Werte von 3 – März bis 11 – November) als Faktor in die Analyse aufgenommen.

Der Installationsort des Mikrofons an der Gondel (vertikal nach unten gerichtet) oder am Turm (horizontale Ausrichtung) ging als bivariate Variable in die Analyse ein.

Messwerte der Niederschlagsintensität sind in mm / h angegeben. Für die grafische Darstellung der Messwerte verwenden wir die logarithmischen Faktorstufen 0-0.01, 0.01-0.1, 0.1-0.5, 0.5-1, 1-10 und ≥ 10 mmh⁻¹ (zusätzliche Faktorstufe zwischen 0.1 und 1, da ab diesem Intensitätsbereich an vielen Standorten keine Fledermausaktivität mehr verzeichnet wird).

3.6 Statistische Analysen und Modelle

Für alle Analysen und Plots verwendeten wir die Software R (Version 4.4.1 RCoreTeam 2024).

3.6.1 Darstellung der Höhenverteilung der Arten

Die Beziehung zwischen Höhe über dem Boden (Einflussvariable) und der Aktivität der verschiedenen Fledermaus-Artgruppen (Zielvariable) wurde mittels Generalisierter Additiver Modelle (GAM) für jeden der sechs Naturräume separat modelliert. Die Modelle berücksichtigen die hierarchische Datenstruktur von Windenergieanlagen genestet innerhalb von Windparks durch entsprechende Zufallseffekte und wurden mit der Funktion gam aus dem Paket mgcv

unter Verwendung einer quasibinomialen Verteilung geschätzt. Die Modelle wurden separat für jede Art und Region berechnet⁶.

3.6.2 Modell zur Aktivitätsvorhersage für Turm- und Gondelmikrofone

Wir modellieren die Gesamtaktivität aller Fledermausarten (Zahl der Aufnahmen pro Nacht) in einem GLMM (generalisiertes lineares gemischtes Modell – Funktion `glmmPQL` im R-Package MASS, family = quasipoisson) aus den Einflussvariablen Höhe des Mikrofons über dem Boden, Gondel/Turmmikrofon, Detektortyp, Median der Windgeschwindigkeit pro Nacht, Monat und naturräumliche Region⁷. Die individuelle WEA ging als Zufallsfaktor in die Berechnung ein, um für wiederholte Messungen an derselben WEA zu korrigieren (Pseudoreplikation).

Verschiedene andere Modellvarianten wurden berechnet und nach einer Prüfung der Anpassungsgüte des Modells mittels standard diagnostischer Residuenanalyse und posterior predictive model checking (Gelman, Meng et al. 1996) verworfen. So war ein GLMM mit angenommener Poisson-Verteilung (family = poisson) nicht in der Lage, die hohe Varianz der Aufnahmezahlen (overdispersion) und die hohe Zahl der Nullwerte (zero inflation) abzubilden. Ein GLMM mit angenommener Normalverteilung (family = gaussian) und log-transformierten Aufnahmezahlen war zwar hinsichtlich der genannten Effekte geeignet, unterschätzte jedoch die mittlere Zahl der Aufnahmen deutlich.

Die höchste Autokorrelation der Residuen trat bei direkt aufeinander folgenden Nächten auf (ACF für Lag 1). Sie lag mit 0,124 relativ niedrig und bei Berücksichtigung dieser Autokorrelation im Modell ergaben sich für die geschätzten Modellparameter und ihre Konfidenzintervalle nur geringfügige Abweichungen⁸. Wir stellen deshalb hier das einfacher strukturierte Grundmodell ohne Berücksichtigung der Autokorrelation dar. Lediglich der Parameter für den Installationsort des Mikrofons in der Gondel oder am Turm wurde in den beiden Modellvarianten etwas unterschiedlich geschätzt und ist deshalb mit gewisser Vorsicht zu interpretieren.

Basierend auf dem Grundmodell, aus dem wir den bundesweit und über das Jahr gemittelten Effekt der Höhe über dem Boden auf die Fledermausaktivität ableiten, wurde ein erweitertes Modell berechnet, das neben den Einflussvariablen des Grundmodells zusätzlich folgende Wechselwirkungen zwischen Einflussvariablen berücksichtigte: Monat * Höhe (Effekt des Monats auf die Fledermausaktivität in Abhängigkeit von der Mikrofonhöhe über dem Boden), Windgeschwindigkeit * Region (Effekt der an der Gondel gemessenen Windgeschwindigkeit auf die Fledermausaktivität in Abhängigkeit von der naturräumlichen Region), Höhe * Region (Effekt der Mikrofonhöhe über dem Boden auf die Fledermausaktivität in Abhängigkeit von der naturräumlichen Region).

3.6.3 Übertragung von Schlagopferzahlen auf benachbarte, unbeprobte WEA

Um den Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm einer WEA einzuordnen, vergleichen wir die Größe des Vorhersagefehlers bei einer Messung nur mit dem Gondelmikrofon mit dem Vorhersagefehler bei der Übertragung der Ergebnisse von beprobten auf nicht beprobte WEA

⁶ R-Code des Modells: `mgcv::gam(cbind(Art_sum, Chir_sum-Art_sum) ~ s(Hoehe, k = 6) + s(Windpark, bs = 're'), family = quasibinomial(link = 'logit'), data = x)`

⁷ R-Code des Modells: `MASS::glmmPQL(Chiroptera ~ Hoehe + Turmmikrofon + Detektor_Modell + Windgeschwindigkeit + Monat + Region, random = ~ 1 | WEA_Jahr), data = data, family = "quasipoisson")`

⁸ Die Korrelationsstruktur erster Ordnung wurde mit der Funktion `corAR1` aus dem Paket `nlme` erstellt und als Argument „correlation“ in der Funktion `glmmPQL` verwendet.

innerhalb desselben Windpark-Jahres⁹. Den Fehler bei Übertragung auf unbeprobte WEA berechneten wir als den Quotienten aus dem Median der für die WEA eines Windparks geschätzten Schlagopferzahlen geteilt durch die für eine einzelne WEA in diesem Windpark ermittelte Schlagopferzahl. Die einzelne WEA selbst wurde bei der Berechnung des Medians jeweils ausgeschlossen. Es gingen nur Windpark-Jahre mit mindestens zwei WEA und nur Gondelerfassungen ein. Die Schätzung der Schlagopferzahlen erfolgte mit ProBat Version 7.1.

Wir berechneten die Fehlerwerte für die nördlichen Regionen (KU, NW und NO; n = 110 WEA-Jahre), die südlichen Regionen (WM, OM, SW; n = 92 WEA-Jahre) und für den Gesamtdatensatz (n = 202 WEA-Jahre).

⁹ Eine solche Übertragung von Ergebnissen auf unbeprobte WEA wird in allen Länderpapieren ab einer festgelegten Zahl von WEA im Park empfohlen, um den Erfassungsaufwand in großen Windparks zu reduzieren.

4 Ergebnisse

4.1 Höhenverteilung der Arten

Abb. 11 bis Abb. 13 zeigen den Anteil verschiedener Arten(gruppen) an der Gesamtheit aller Fledermausaufnahmen in verschiedenen Höhenstufen für einzelne naturräumliche Regionen sowie für den gesamten Datensatz (Gondel- und Turmmikrofone zusammengefasst). Bei der Interpretation der Abbildungen ist zu beachten, dass jeweils der relative Anteil einer Art an der Gesamtzahl der Aufnahmen dargestellt ist. In den Abbildungen ist daher die starke Abnahme der absoluten Zahl der Aufnahmen mit der Höhe, die in Abschnitt 4.2 behandelt wird, nicht zu erkennen.

Bei der Artengruppe Nyctaloid (Abb. 11A) nahm der Anteil an der Gesamtaktivität mit steigender Höhe über dem Boden zu, wobei der Anteil in höheren Luftschichten eine Sättigung erreichte. Zu erkennen ist auch der insgesamt wesentlich geringere Anteil der Artengruppe Nyctaloid im Naturraum Westliche Mittelgebirge (WM).

Der Große Abendsegler, *N. noctula*, (Abb. 11B) zeigte ähnliche Verläufe des Aktivitätsanteils mit der Höhe über dem Boden wie die Gruppe Nyctaloid, deren häufigster Vertreter an WEA er ist. Anders als bei der Gesamtgruppe Nyctaloid war der Anteil des Großen Abendseglers neben der Region Westliches Mittelgebirge (WM) auch in der Region Südwestdeutsche Mittelgebirge (SW) insgesamt geringer als in den weiter östlich und nördlich gelegenen Regionen. Die Werte für die Region Küste zeigten einen sehr unregelmäßigen Verlauf bedingt durch sehr unterschiedliche Anteile an den beprobten Standorten.

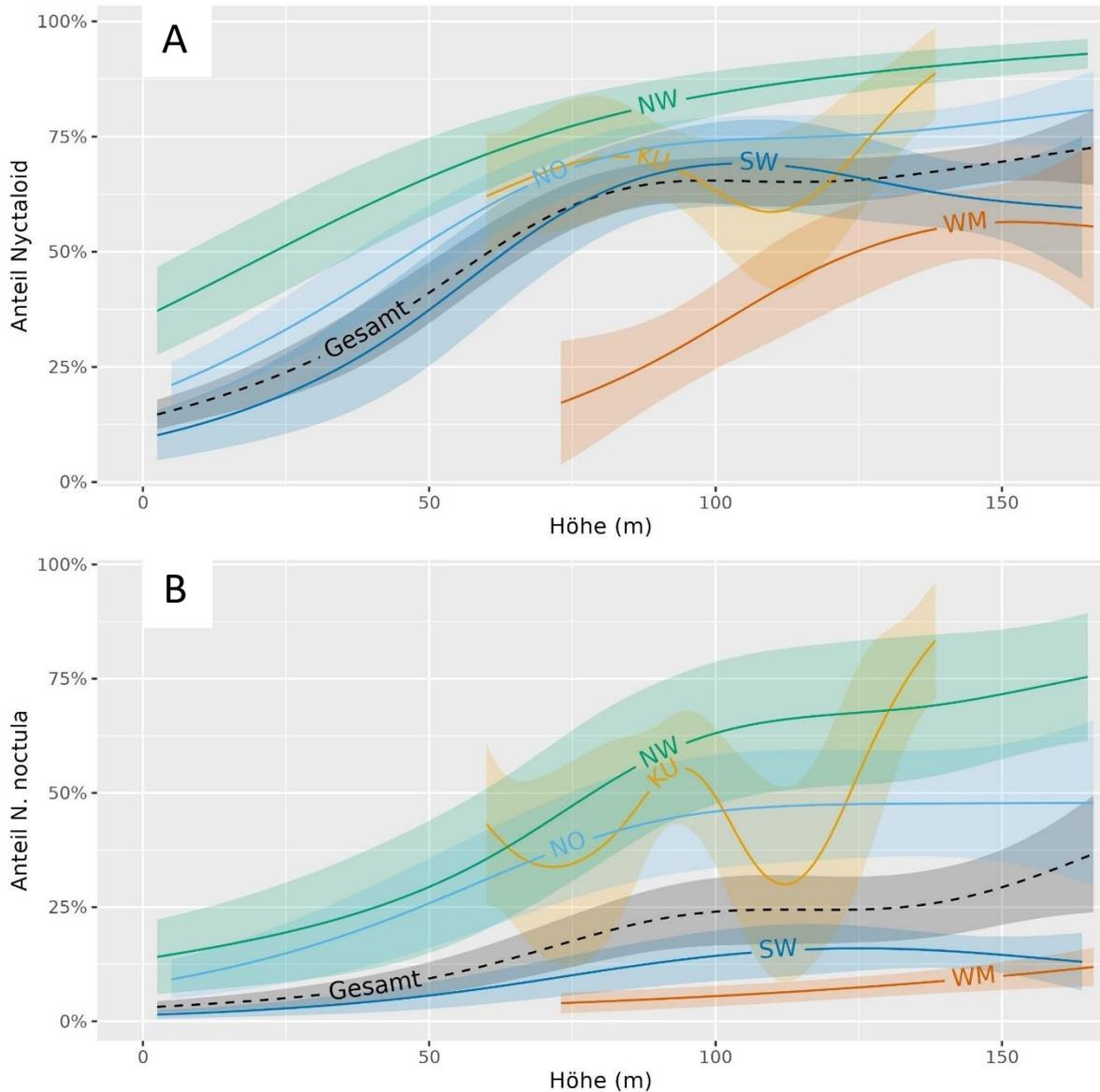


Abb. 11: Anteil der Aktivität (y-Achse) der Artengruppe Nyctaloid (tieffrequent rufende Arten; an vielen Standorten mit hohem Anteil des Großen Abendseglers, *N. noctula*.) (A) und des Großen Abendseglers, *N. noctula*, (B) an WEA in unterschiedlichen Höhen über dem Boden. Gezeigt ist der über WEA-Jahre gemittelte Anteil an der akustischen Aktivität aller Fledermäuse insgesamt (zum verwendeten Modell siehe Abschnitt 3.6.1) jeweils für die im Datensatz abgebildeten Höhen. Farbige Linien zeigen die Höhenverteilung für verschiedene naturräumliche Regionen (Lage und Akronyme der Regionen in Abb. 1, die schwarz gestrichelte Linie zeigt die gemittelten Werte des Gesamtdatensatzes aller Regionen. Schattierte Flächen um die Vorhersagelinien zeigen das 95 %-Konfidenzintervall. Zum Datensatz siehe Abb. 13 und Kapitel 3.1.3.

Für die Artengruppe Pipistrelloid wurde in allen Regionen und fast im gesamten beprobten Höhenbereich eine Abnahme des Anteils an der Gesamtaktivität mit zunehmender Distanz zum Boden gemessen. Die Abnahme war in den tieferen Luftschichten deutlicher ausgeprägt als in den höheren (Abb. 12A). In der Region Südwestdeutsche Mittelgebirge war die Aktivität vom Boden bis etwa 40 m Höhe näherungsweise konstant und zeigte in den Regionen Küste

und Westliche Mittelgebirge einen unregelmäßigen Verlauf bedingt durch die sehr unterschiedlichen prozentualen Anteile der Artengruppe Pipistrelloid an der Gesamtaktivität an den beprobten WEA.

Für die Zwergfledermaus, *P. pipistrellus*, die häufigste Vertreterin der Artengruppe Pipistrelloid bei Erfassungen an WEA, war die Abnahme des Anteils an der Gesamtaktivität mit zunehmender Distanz zum Boden in den tieferen Luftschichten etwas stärker ausgeprägt als für die Gruppe Pipistrelloid. In den höheren Luftschichten wurde dagegen nur eine geringe weitere Abnahme verzeichnet (Abb. 12B).

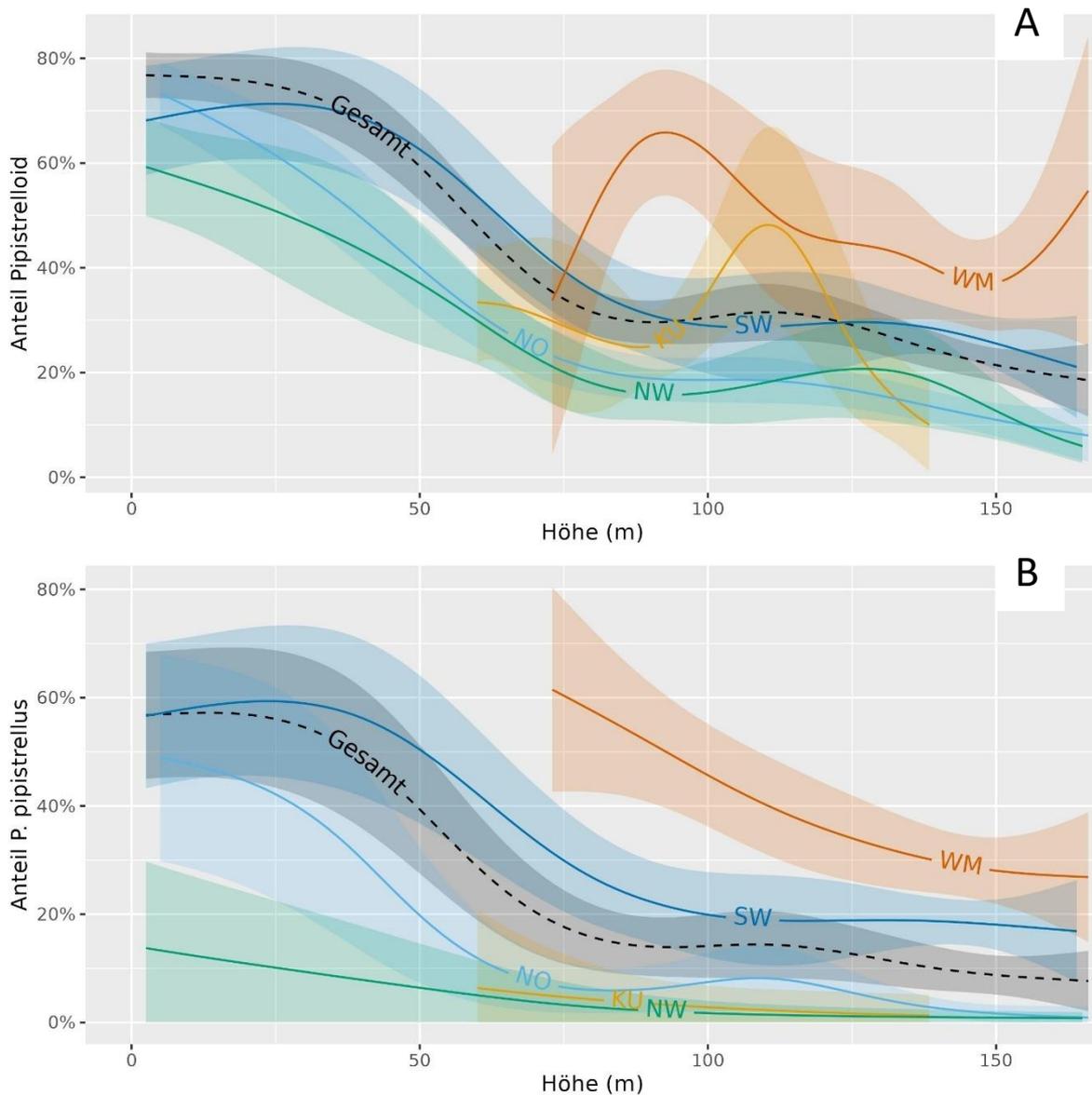


Abb. 12: Anteil der Aktivität (y-Achse) der Artengruppe Pipistrelloid (hochfrequent rufende Arten; an vielen Standorten mit hohem Anteil der Zwergfledermaus, *P. pipistrellus*) (A) und der Zwergfledermaus, *P. pipistrellus* (B) an WEA in unterschiedlichen Höhen über dem Boden. Farbgebung der Regionen, Darstellung wie bei Abb. 11. Zum Datensatz siehe Abb. 13 und Kapitel 3.1.3.

Für die Rauhaufledermaus, *P. nathusii*, wurde in der Region Südwestliche Mittelgebirge in niedrigen Luftschichten zunächst eine leichte Zunahme und in der Region Nordwestdeutsches Tiefland eine leichte Abnahme des Anteils an der Gesamtaktivität mit zunehmender Höhe über dem Boden beobachtet, in höheren Luftschichten dann in allen Regionen eine leichte Abnahme (Abb. 13).

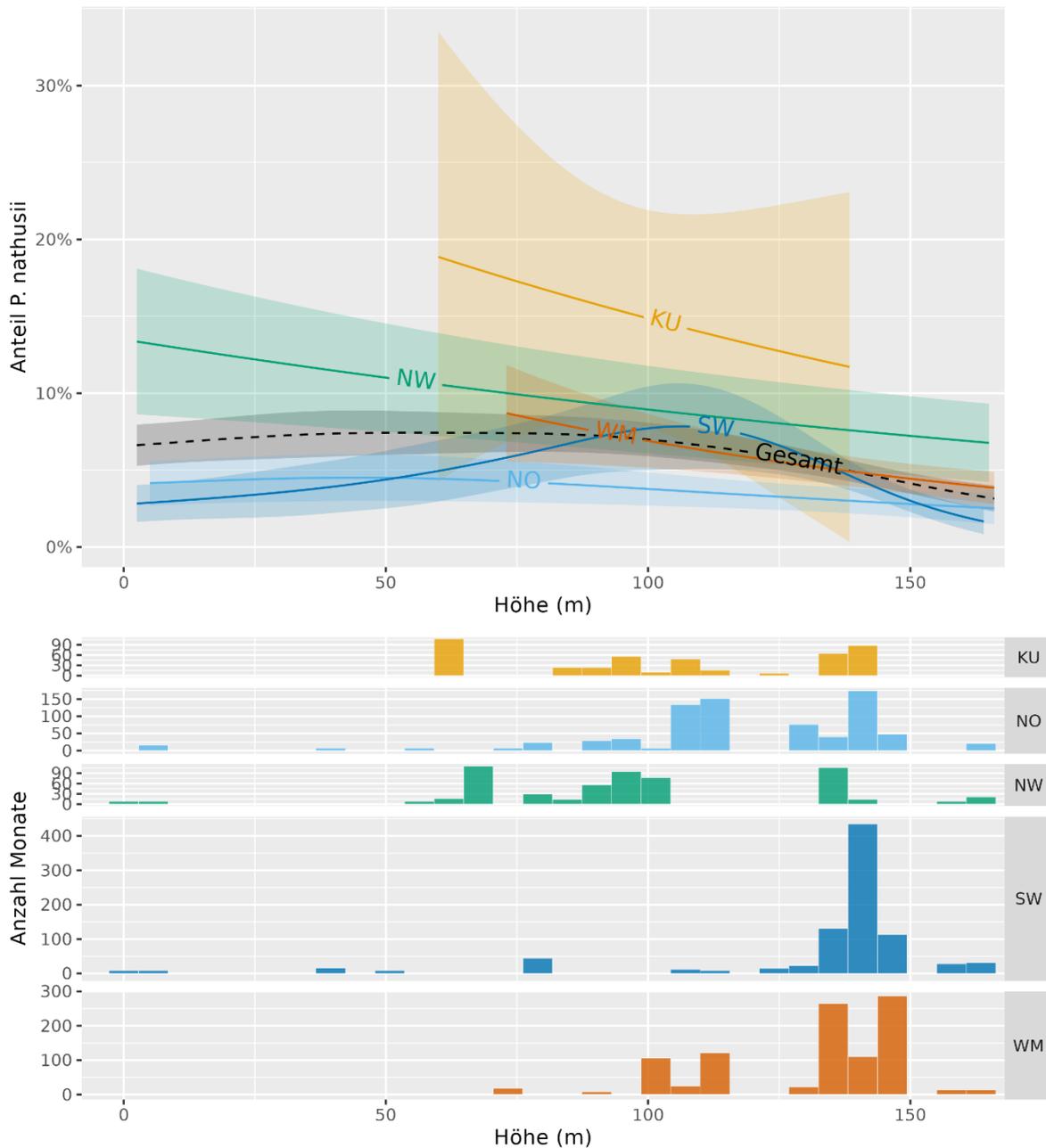


Abb. 13: Anteil der Aktivität der Rauhaufledermaus, *P. nathusii*, (y-Achse) an WEA in unterschiedlichen Höhen über dem Boden (x-Achse) im oberen Teil der Abbildung. Im unteren Teil der Abbildung ist die Zahl der beprobten WEA-Monate (y-Achse) pro Höhenklasse (x-Achse) und Region (Paneele) gezeigt. Farbgebung der Regionen und Darstellung wie bei Abb. 11. Die Datengrundlage im unteren Teil der Abbildung gilt auch für die Abb. 11 und Abb. 12 (siehe dazu auch Kapitel 3.1.3.).

4.2 Vertikale Verteilung der Gesamtaktivität

Für die Charakterisierung der vertikalen Verteilung der Fledermausaktivität an WEA verwendeten wir Daten kombinierter Gondel- und Turmerfassungen sowohl aus eigenen Freilanduntersuchungen im Projekt (Abschnitt 3.1.1) als auch aus dem ProBat-Datensatz (Abschnitt 3.2.2). Darüber hinaus integrierten wir über 400 Anlagen-Jahre aus dem ProBat-Datensatz (Abschnitt 3.2.2) in die Modellierung, die nur Daten von Gondelmikrofonen enthalten (Abb. 2).

4.2.1 Grundmodell

Um den Effekt der Höhe des Mikrofons über dem Boden und somit die vertikale Verteilung der Fledermausaktivität möglichst präzise zu beschreiben, modellierten wir die Gesamtaktivität aller Fledermausarten (Zahl der Aufnahmen pro Nacht) aus den Einflussvariablen Höhe des Mikrofons über dem Boden, Gondel- oder Turmmikrofon, Detektortyp und -einstellung, Median der Windgeschwindigkeit pro Nacht, Monat und naturräumliche Region (Abb. 14 – zur Definition der Einflussvariablen siehe Abschnitt 3.3, zur Modellstruktur siehe Abschnitt 3.6.2). Die WEA ging als Zufallsfaktor in die Berechnung ein.

Die gemessene Fledermausaktivität wird neben der Höhe durch zahlreiche weitere Einflussvariablen beeinflusst, die den Effekt der Höhe teilweise überlagern können. Durch den Einschluss von Einflussvariablen als Kovariaten im Modell kann der Effekt der Höhe präziser beschrieben werden. Zum Beispiel nimmt ein Gondelmikrofon durch seine vertikale Ausrichtung nach unten mehr Aktivität auf als ein horizontal ausgerichtetes Turmmikrofon in derselben Höhe über dem Boden. Dies wird im Modell als eigener Effekt geschätzt und somit aus dem Höheneffekt herausgerechnet.

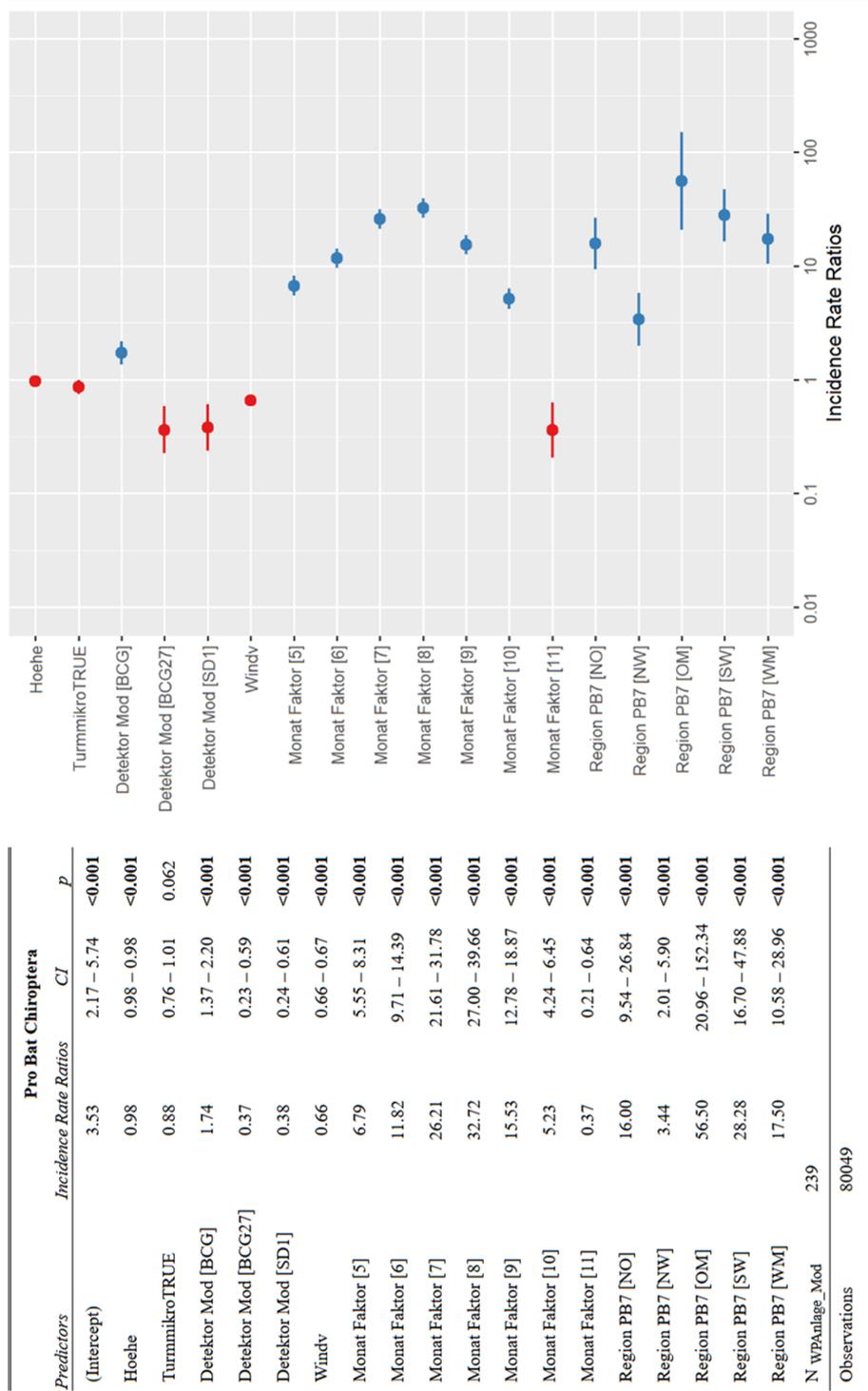


Abb. 14: Statistisches Modell (GLMM – siehe Abschnitt 3.6.1) zur Vorhersage der akustischen Aktivität aus der Höhe des Mikrofons und weiteren Einflussvariablen (Modellparameter in der linken Tabelle – zur Definition der Einflussvariablen siehe Abschnitt 3.3). Dargestellt ist der exponentenzierte multiplikative Effekt (Incidence Rate Ratio). Bei den faktoriellen Einflussvariablen ist der exponentenzierte Effekt relativ zur nicht dargestellten Referenzfaktorstufe (Referenzfaktorstufen jeweils mit Effektgröße 1 angegeben: Detektor Avisoft/BATmode, Monat 4 = April und Region KU = Küste) angegeben. Die exponentenzierten Effektgrößen und deren 95 % Konfidenzintervall (CI) sind in der rechten Abbildung zusätzlich grafisch dargestellt (x-Achse logarithmisch; rot: niedrigere Fledermausaktivität mit zunehmendem Wert der Einflussvariable oder relativ zur Referenzfaktorstufe; blau: höhere Fledermausaktivität mit zunehmendem Wert oder relativ zur Referenzfaktorstufe). Für Erklärungen und Details zu den Effekten siehe Abb. 15 bis Abb. 18. Zur Größe des Datensatzes siehe Abb. 2.

Die Bestimmtheitsmaße des Aktivitätsmodells wurden als 0,56 (marginal R^2) und 0,69 (conditional R^2) geschätzt. Der erste Wert gibt den Anteil der durch das Modell nur mit den fixed effects (alle Einflussvariablen außer dem Aktivitätsniveau der jeweiligen WEA) erklärten Varianz der Daten an, der zweite den Anteil der durch fixed und random effects (alle Einflussvariablen einschließlich des Aktivitätsniveaus der jeweiligen WEA) erklärten Varianz.

Beide Werte zeigen, dass das Modell die Unterschiede in der gemessenen Aktivität zwischen verschiedenen Mikrofon-Nächten zu einem großen Anteil erklärt: Der Anteil der durch die fixed effects (Einflussvariablen) erklärten Varianz war deutlich höher als der der random effects (Unterschiede zwischen WEA-Jahren).

Für die **Höhe des Mikrofons** gilt entsprechend der Tabelle ein exponentieller Effekt¹⁰ mit einer Abnahme der Fledermausaktivität aller Fledermausarten um 1,9 % (95 % Konfidenzintervall: 1,7 % bis 2,0 %) je zusätzlichem Meter der Höhe des Erfassungspunktes (Abb. 14 und Abb. 15). Bei einer Erhöhung um 10 m verringert sich die Aktivität demnach gerundet um $1 - 0,981^{10} = 0,175$ also 17,5 % (15,8 % bis 18,3 %), bei 50 m verringerte sich die Aktivität entsprechend um 61,7 % (57,6 % bis 63,6 %) und bei 100 m um 85,3 % (82,0 % bis 86,7 %). Durch die Abnahme der Aktivität mit der Höhe entfällt ein hoher Anteil des Schlagrisikos auf die tieferen vom Rotor überstrichenen Luftschichten. Dieser Effekt ist desto stärker, je tiefer der Rotor zum Boden reicht (siehe dazu auch Abb. 30).

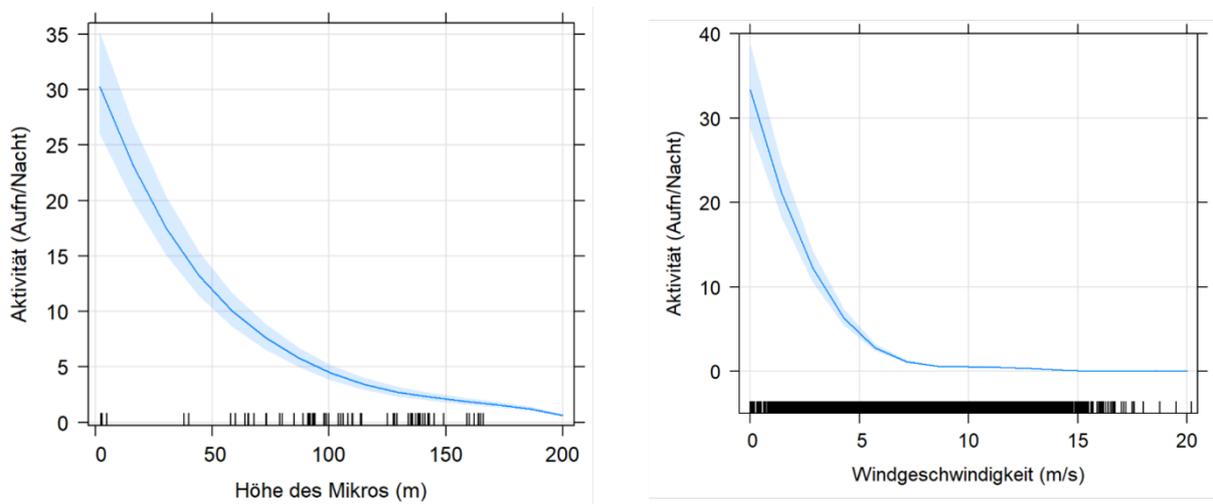


Abb. 15: Effekt der Mikrofonhöhe über dem Boden (in m: x-Achse der linken Abbildung) und der Windgeschwindigkeit an der Gondel (in m/s: x-Achse der rechten Abbildung) auf die akustische Aktivität (y-Achse beider Abbildungen: Aufnahmen pro Nacht) in einem statistischen Modell (GLMM – siehe Abschnitt 3.6.1) zur Vorhersage der akustischen Aktivität (siehe Angaben für Abb. 14). Die hellblaue Fläche um die Kurve gibt das 95 % Konfidenzintervall an, kurze schwarze Striche über der x-Achse zeigen alle Werte der jeweiligen Einflussvariable im Datensatz.

¹⁰ In Abb. 14 ist der auf zwei Nachkommastellen gerundete Faktor dargestellt, mit dem die Fledermausaktivität je zusätzlichem Meter über dem Boden multipliziert werden muss. Eine Multiplikation mit dem Faktor 0,981 in diesem Fall entspricht einer Abnahme der Aktivität um 1,9 % je zusätzlichem Höhenmeter.

Für die **Windgeschwindigkeit** ergab sich eine Abnahme der Aktivität um 33,5 % (95 % Konfidenzintervall: 32,9 % bis 34,2 %) pro Erhöhung der Windgeschwindigkeit um 1 m / s (Abb. 14 und Abb. 15) und entsprechend um 70,6 % (69,8 % bis 71,5 %) bei einer Erhöhung um 3 m / s und um 87,0 % (86,4 % bis 87,7 %) bei einer Erhöhung um 5 m / s.

Die Effekte verschiedener **Detektorvarianten** waren wesentlich weniger stabil als die Effekte der anderen Einflussvariablen und unterschieden sich zwischen verschiedenen Modellvarianten und Datensätzen (siehe dazu Abschnitte 3.6.1 in der Methode und 6.2 in der Diskussion). Im hier dargestellten Modell registrierte der Batcorder mit der Einstellung -36 dBFS eine um 74 % höhere Zahl von Aufnahmen als der Referenzdetektor Avisoft/BATmode¹¹.

Zwischen den **naturräumlichen Regionen** ergaben sich sehr große Unterschiede mit z. B. einer 58-fach höheren mittleren Aktivität in der Region SW (Südwestdeutsche Mittelgebirge) im Vergleich zur Referenzregion KU (Küste). Der noch deutlich höhere Wert für die Region OM (Östliche Mittelgebirge) sollte wegen der durch die geringe Stichprobe bedingten großen Unsicherheit der Schätzung vorsichtig interpretiert werden (siehe Abschnitt 3.1.3).

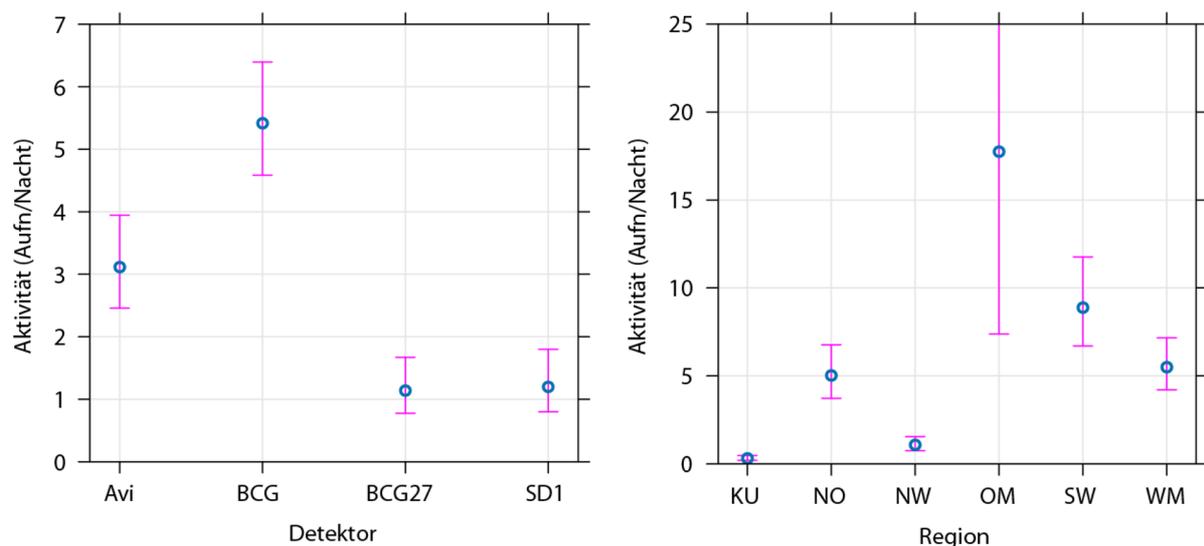


Abb. 16: Effekt des verwendeten Fledermausdetektors (x-Achse der linken Abbildung) und der naturräumlichen Region (x-Achse der rechten Abbildung) auf die akustische Aktivität (y-Achse beider Abbildungen: Aufnahmen pro Nacht). Zusätzlich zu den Effektgrößen ist deren 95 % Konfidenzintervall angegeben. Weitere Angaben wie für Abb. 14.

Das Maximum der Aktivität im **Jahresverlauf** lag über alle Regionen gemittelt im Juli und August. Im Frühjahr und Herbst war die Aktivität deutlich geringer. Für die Erfassungen mit Turmmikrofonen lag die gemessene Aktivität im Mittel 12,4 % niedriger als für ein Gondelmikrofon in derselben Höhe. Der Installationsort des Mikrofons war der einzige Parameter, der in einem Modell mit Berücksichtigung der Autokorrelationsstruktur erster Ordnung (siehe Abschnitt 3.6.2) deutlich abweichend (nur 2 % geringere Aktivität bei Messung mit einem Turm- als mit

¹¹ Hierbei ist zu beachten, dass die hohe Zahl der Aufnahmen beim Batcorder auf den kurzen verwendeten Posttrigger zurückzuführen ist, wodurch vor allem Rufsequenzen aus der Artengruppe Nyctaloid in mehrere Aufnahmen mit jeweils nur einem oder wenigen Rufen zerschnitten werden. Bei einem Vergleich z. B. von 10-Minuten-Intervallen mit oder ohne Aktivitätsnachweis zeigt der BATmode eine wesentlich höhere Empfindlichkeit und somit einen deutlich größeren Erfassungsbereich (Behr, Barré et al. 2023).

einem Gondelmikrofon) berechnet wurde. Dieser Wert sollte entsprechend vorsichtig interpretiert werden.

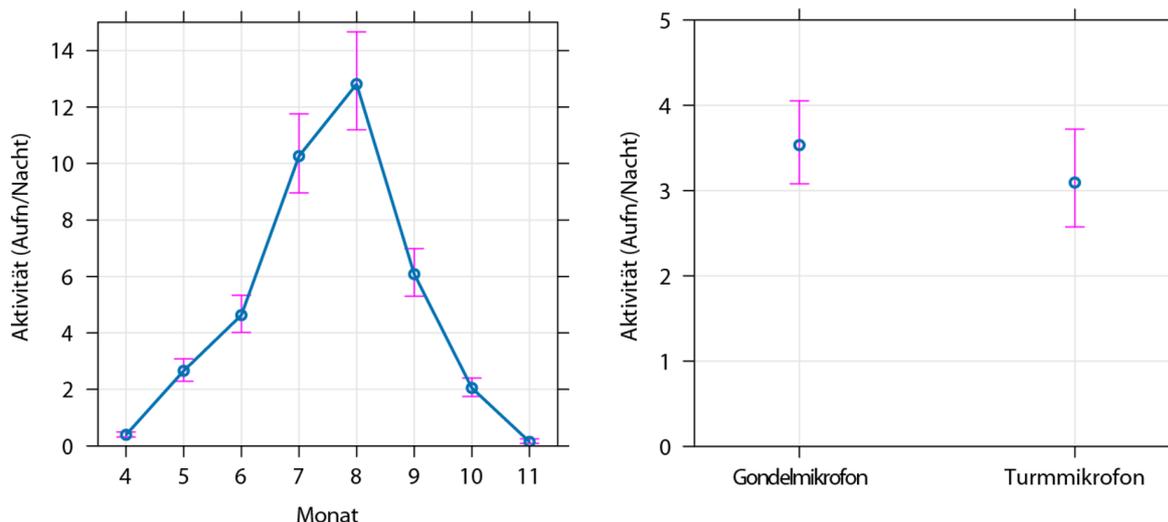


Abb. 17: Effekt des Monats (x-Achse der linken Abbildung für April bis November) und der Erfassung mit einem Gondel- oder Turmmikrofon (x-Achse der rechten Abbildung) auf die akustische Aktivität (y-Achse beider Abbildungen: Aufnahmen pro Nacht). Zusätzlich zu den Effektgrößen ist deren 95 % Konfidenzintervall angegeben. Weitere Angaben wie für Abb. 14.

4.2.2 Modell mit Wechselwirkungen

Basierend auf diesem Grundmodell wurde ein weiteres Modell berechnet, das neben den Einflussvariablen des Grundmodells zusätzlich drei Wechselwirkungen zwischen jeweils zwei Einflussvariablen berücksichtigt¹².

4.2.2.1 Wechselwirkung von Monat und Mikrofonhöhe über dem Boden

Der Effekt der Mikrofonhöhe über dem Boden auf die Fledermausaktivität unterschied sich insgesamt wenig in Abhängigkeit vom Monat (Abb. 18: Wechselwirkung Monat * Höhe). Die Aktivitätswerte für den Oktober und November lagen für die niedrigen Mikrofonhöhen 10 m und 50 m jedoch höher als im Vergleich zu den anderen Monaten zu erwarten wäre (multiplikative Effektgrößen der Wechselwirkung für April: 1,000, Mai: 0,999, Juni: 1,001, Juli: 1,000, August: 1,001, September: 1,000, Oktober: 0,988, November: 0,985). Die Aktivität nahm also in den tieferen Luftschichten im Herbst langsamer ab als in der Höhe, wodurch sich der Effekt der Höhe über dem Boden auf die Aktivität im Herbst vergrößerte. Zum Beispiel war der Unterschied zwischen der erwarteten Aktivität in 50 m und 150 m Höhe im Oktober und November etwa viermal so groß wie in den anderen Monaten.

¹² Wie beim Grundmodell ein generalisiertes lineares gemischtes Modell – Funktion glmmPQL im R-Package MASS, family = quasipoisson.

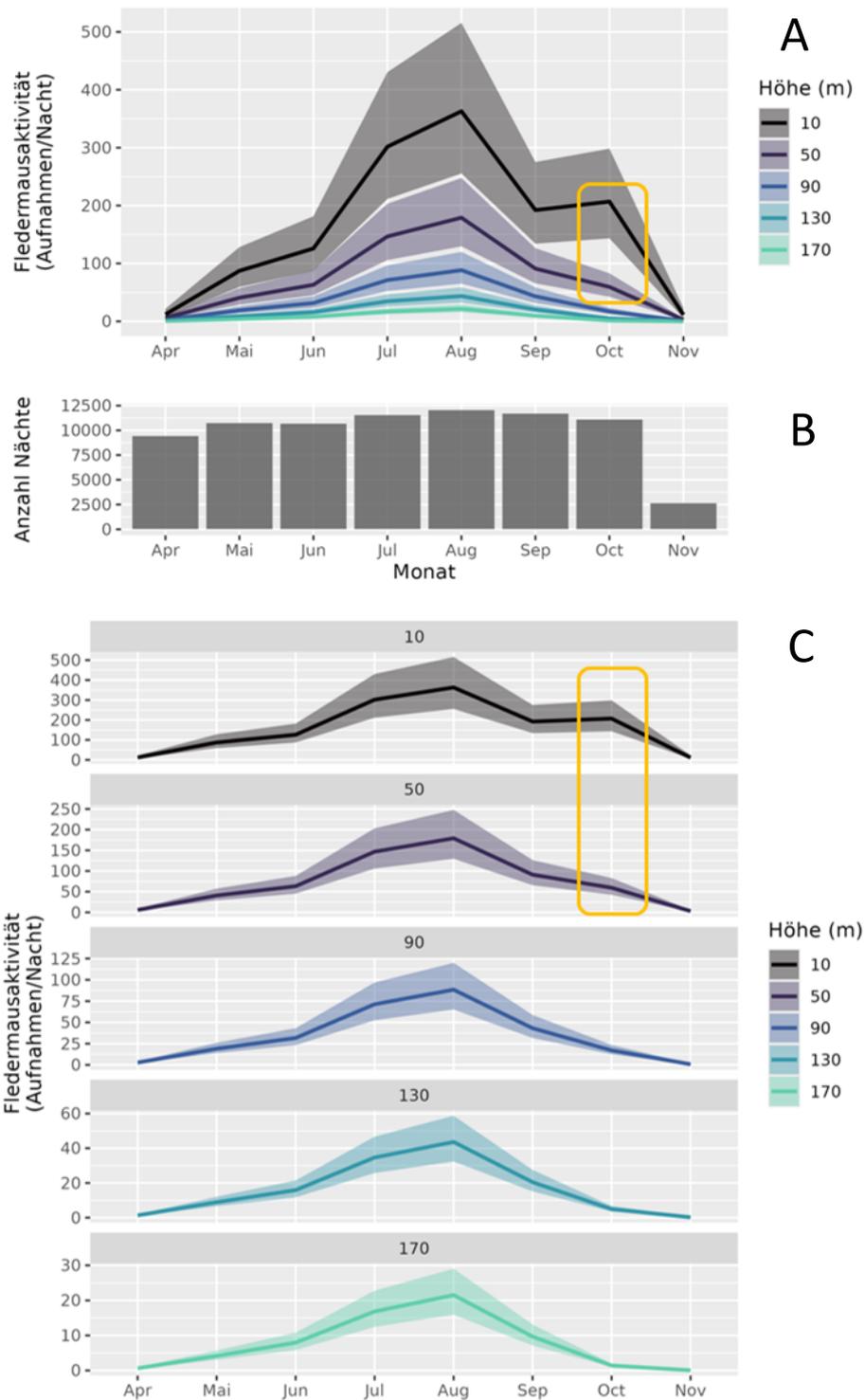


Abb. 18: Effekt des Monats (x-Achsen) auf die Fledermausaktivität (y-Achsen: Aufnahmen pro Stunde gemittelt für Nächte) in Abhängigkeit von der Mikrofonhöhe über dem Boden (Linien in verschiedenen Farben). Die Aktivitätswerte wurden berechnet für ein Gondelmikrofon des Batcorders in der Region SW bei einer Windgeschwindigkeit von 5,9 m/s. A: Aktivitätsniveau aller Mikrofonhöhen mit einheitlicher Skalierung der y-Achse; B: Zahl der beprobten Nächte pro Monat. C: Aktivitätsniveau auf das jeweilige Maximum je Mikrofonhöhe normiert zur besseren Vergleichbarkeit. Hervorgehoben sind die Mikrofonhöhen 10 m und 50 m im Oktober, die Unterschiede zu den anderen Kurven zeigen. Zusätzlich zu den Effektgrößen ist das 95 % Konfidenzintervall der Effektgrößen halbtransparent farblich hinterlegt. Weitere Angaben wie für Abb. 14.

4.2.2.2 Wechselwirkung von Windgeschwindigkeit und naturräumlicher Region

Der Effekt der Windgeschwindigkeit auf die Fledermausaktivität war in den naturräumlichen Regionen (**Wechselwirkung Region * Windgeschwindigkeit**) unterschiedlich ausgeprägt (multiplikative Effektgrößen der Wechselwirkung für KU: 1,000; NO: 1,058; NW: 1,052; OM: 0,982; SW: 0,977; WM: 0,931). In den südlichen Regionen OM, SW und WM nahm die Aktivität mit zunehmender Windgeschwindigkeit also stärker ab als in den nördlichen Regionen NO und NW (etwas steilere Kurven in Abb. 19C). So betrug das relative Aktivitätsniveau in der Region SW bei 3 m / s nur 68 % des Wertes für die Region NO und bei 5 m / s nur 53 %. Für die Küste (Region KU) lag die Höhe des Effektes der Windgeschwindigkeit zwischen den Werten der anderen Regionen.

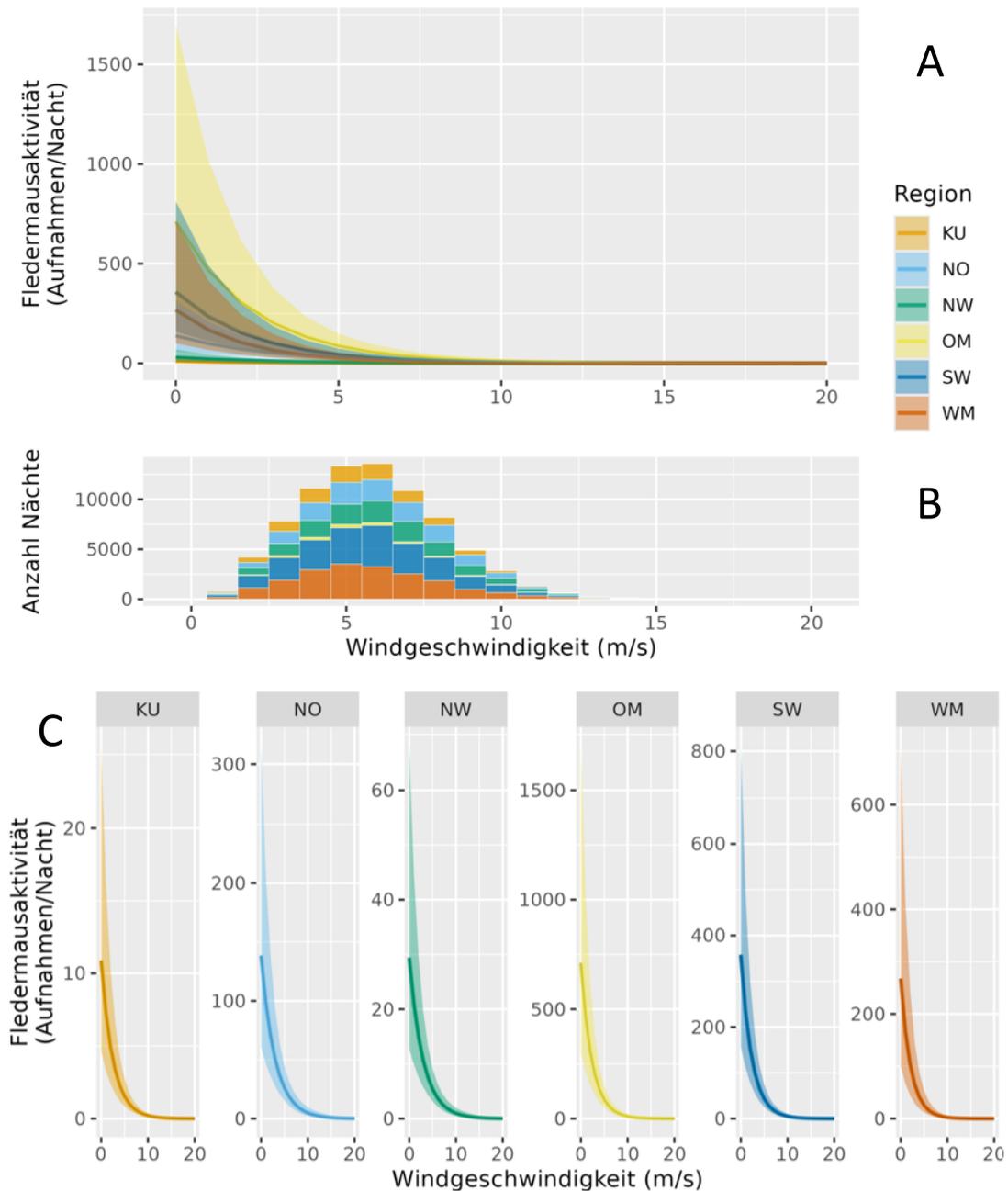


Abb. 19: Effekt der an der Gondel gemessenen Windgeschwindigkeit (x-Achsen) auf die Fledermausaktivität (y-Achsen: Aufnahmen pro Nacht) in Abhängigkeit von der naturräumlichen Region (verschiedene Farben) in A und C. B: Zahl der beprobten Nächte je Windgeschwindigkeitsklasse (Breite 1 m/s). Die Aktivitätswerte wurden berechnet für ein Gondelmikrofon des Batcorders im August in einer Höhe von 149 m über dem Boden. In A alle Regionen mit einheitlicher Skalierung der y-Achse. In C wurden für eine bessere Vergleichbarkeit die y-Achsen auf das Maximum jeder Region normiert. Zusätzlich zur Effektgröße ist das 95 % Konfidenzintervall angegeben. Die Werte für die Region OM (Östliche Mittelgebirge) sollten wegen der geringen Stichprobe für diese Region vorsichtig interpretiert werden und weisen ein entsprechend größeres Konfidenzintervall auf (siehe Abschnitt 3.1.3). Weitere Angaben wie für Abb. 14.

4.2.2.3 Wechselwirkung von Region und Mikrofonhöhe über dem Boden

Der Effekt der Mikrofonhöhe über dem Boden auf die Fledermausaktivität zeigte Unterschiede zwischen den naturräumlichen Regionen (**Wechselwirkung Region * Mikrofonhöhe**: multiplikative Effektgrößen für KU: 1,000; NO: 1,005; NW: 1,006; OM: 1,047; SW: 1,001; WM: 0,998). An der Küste (Region KU) und in den südlichen Regionen SW und WM nahm die Aktivität mit zunehmender Höhe somit etwas stärker ab als in den nördlichen Regionen NO und NW. So ergibt sich aus den Effektgrößen dieser Wechselwirkung, dass der Unterschied zwischen der erwarteten Aktivität in 100 m und 50 m Höhe in der Region NW etwa 50 % höher war als in der Region WM und zwischen 150 m und 50 m Höhe mehr als 120 % höher. Der Wert für die Region OM war hier wegen der geringen Variabilität der Mikrofonhöhen in dieser Region nicht sinnvoll interpretierbar.

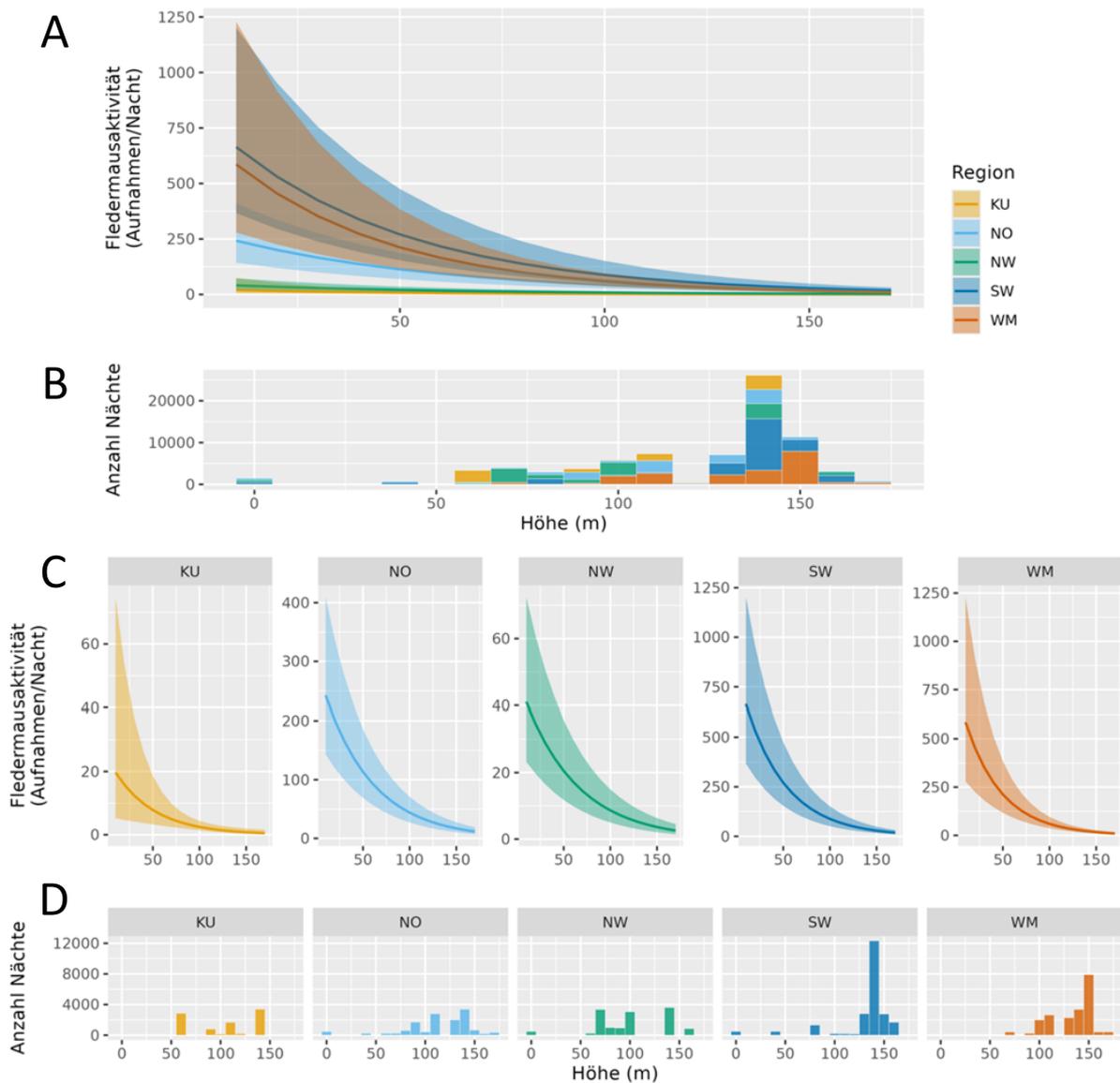


Abb. 20: Effekt der Mikrofonhöhe über dem Boden (in m auf der x-Achse) auf die Fledermausaktivität (y-Achsen: Aufnahmen pro Nacht) in Abhängigkeit von der naturräumlichen Region (Linien in verschiedenen Farben) in A und C. In B und D ist die Zahl der beprobten Nächte je Mikrofonhöhenklasse (Breite 10 m) angegeben. Die Aktivitätswerte wurden berechnet für ein Gondelmikrofon des Batcorders im August bei einer Windgeschwindigkeit von 5,9 m / s. In A alle Regionen mit einheitlicher Skalierung der y-Achse. In C wurden für eine bessere Vergleichbarkeit die y-Achsen auf das Maximum jeder Region normiert. Zusätzlich zur Effektgröße ist das 95 % Konfidenzintervall angegeben. Die Werte für die Region OM (Östliche Mittelgebirge) ist hier nicht dargestellt, da er wegen der geringen Variabilität der Mikrofonhöhe in der Stichprobe für diese Region nicht sinnvoll interpretierbar war (siehe Abschnitt 3.1.3). Weitere Angaben wie für Abb. 14.

4.3 Horizontale Verteilung der Fledermausaktivität

4.3.1 Daten aus eigenen Erfassungen

Abb. 21 zeigt die Bildpunkte der eigenen wärmeoptischen 3D Erfassungen im vorliegenden Projekt (zum Datensatz und zur Erfassungsmethode siehe Abschnitt 3.3). Insgesamt wurden 4.999 Einzelbilder mit Fledermäusen segmentiert und zu 159 Flugbahnen gruppiert. Der minimale Abstand einer aufgenommenen Fledermaus zum Gondelmittelpunkt betrug 16,5 m, der minimale Abstand einer Fledermaus zum Mikrofon am Turm in 80 m Höhe lag bei 6 m und zum Mikrofon in 40 m Höhe bei 11 m.

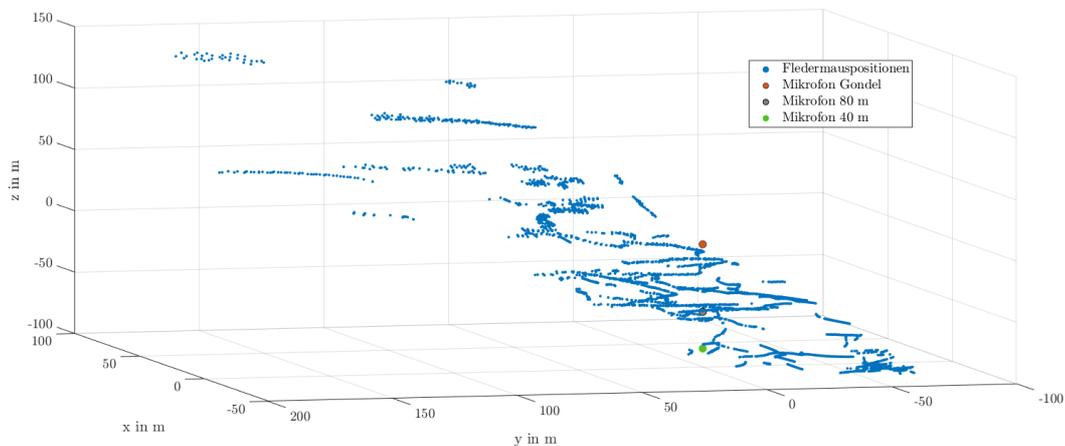


Abb. 21: 3D Darstellung aller Fledermausdetektionen aus den eigenen Erfassungen im vorliegenden Projekt in Einzelbildern (blaue Punkte); der rote Punkt bezeichnet das Zentrum der Gondel (Abstand zum Gondelmikrofon etwa 3 m), der graue Punkt das Mikrofon in 80 m Höhe am Turm, der grüne Punkt das Mikrofon in 40 m Höhe. Z-Achse: vertikaler Abstand in Metern vom Gondelmikrofon; y-Achse und x-Achse: Abstand in Metern von der Mittelachse der beprobten WEA. Durch die größere Höhe der hier beprobten WEA war der Kamerawinkel steiler als bei den in NatForWINSSENT II erfassten Daten.

Abb. 22 und Abb. 23 zeigen die Zahl der akustischen Aufnahmen während der Zeiträume der optischen Erfassung für alle Fledermäuse insgesamt und für einzelne Arten(gruppen) an den vier Mikrofonen. Die Aktivität nahm mit zunehmender Höhe stark ab.

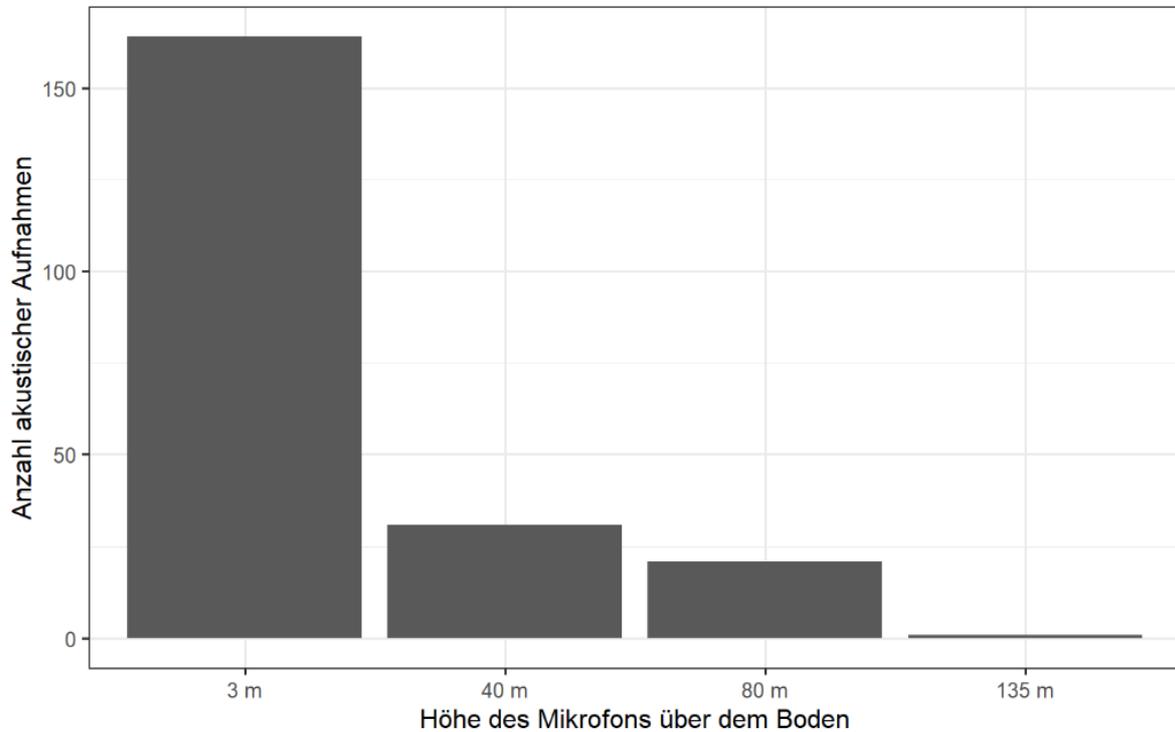


Abb. 22: Anzahl akustischer Aufnahmen aller Fledermausarten insgesamt pro Mikrofon im Zeitraum der wärmeoptischen Erfassung (zum Umfang des Datensatzes siehe Abschnitt 3.3). Die y-Achse gibt die Anzahl der Aufnahmen an; auf der x-Achse sind die Erfassungshöhen dargestellt.

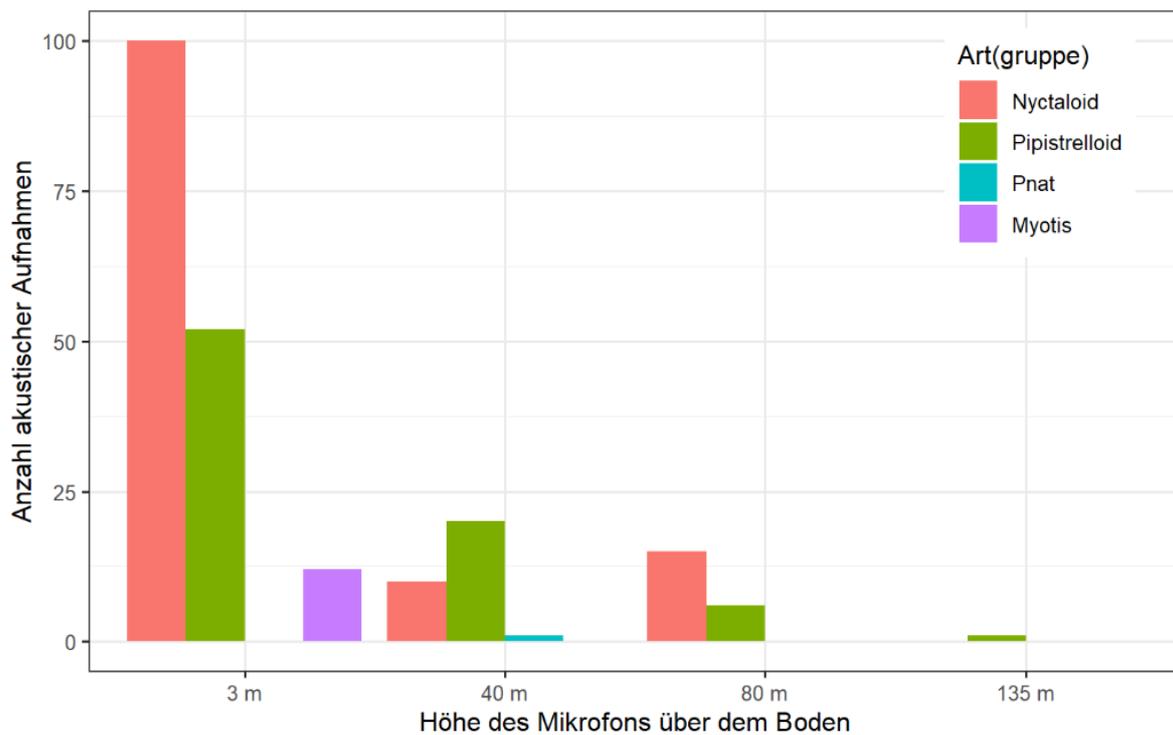


Abb. 23: Anzahl akustischer Aufnahmen je Art(gruppe) pro Mikrofon im Zeitraum der wärmeoptischen Erfassung. (zum Umfang des Datensatzes siehe Abschnitt 3.3). Die y-Achse zeigt die Anzahl der Aufnahmen; auf der x-Achse sind die Erfassungshöhen angegeben.

In Abb. 24 sind die Positionen der Fledermausdetektionen in den Einzelbildern in Relation zur Position der Mikrofone dargestellt. Im Radius von 30 m um das Zentrum der Gondel lagen 163 und im Radius von 60 m 1.857 Detektionen. Im Radius von 30 m um das Mikrofon in 80 m Höhe am Turm lagen 926 und im Radius von 60 m 2.155 Detektionen.

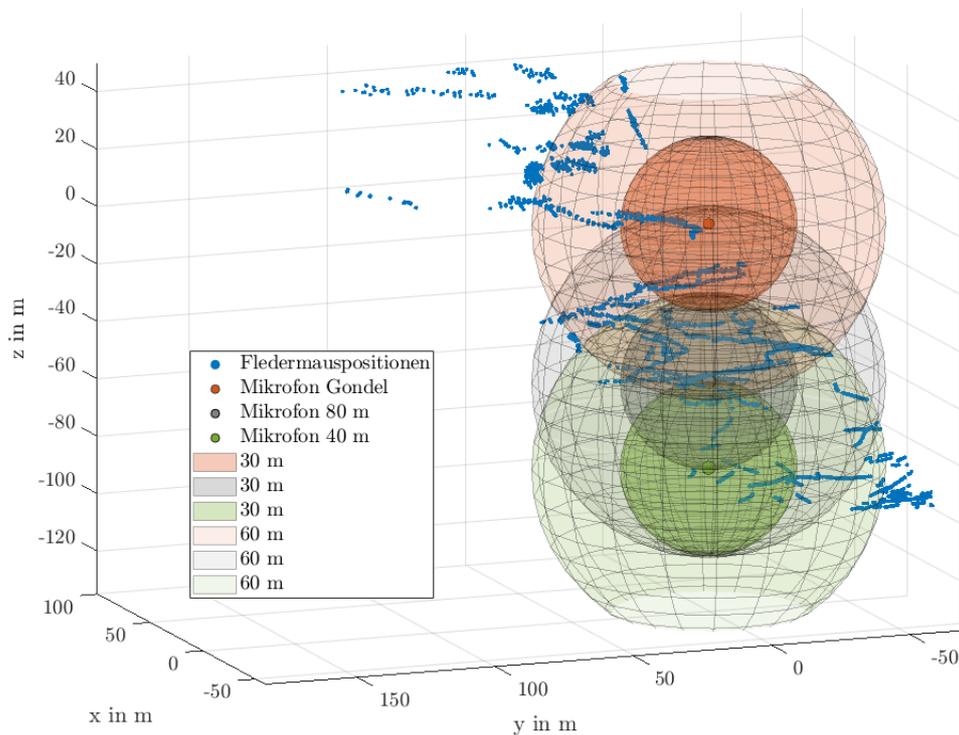


Abb. 24: Fledermausdetektionen im Umfeld der WEA ; Kugeln repräsentieren jeweils einen 30 m und 60 m Radius um die Mikrofone (Erfassungen im vorliegenden Projekt). Z-Achse: vertikaler Abstand in Metern vom Gondelmikrofon; y-Achse und x-Achse: Abstand in Metern von der Mittelachse der probierten WEA.

Für sechs von insgesamt 16 optisch registrierten Flugbahnen mit einem Abstand von maximal 30 m zu den Mikrofonen in 80 m Höhe am Turm und an der Gondel wurden zeitgleich Ortungsrufe registriert (1 Nyctaloid und 5 Pipistrelloid). Für vier weitere akustische Detektionen wurden keine zeitgleichen optischen Flugbahnen aufgezeichnet. Drei dieser optisch nicht detektierten Tiere gehörten zur Gruppe Nyctaloid und wurden neben dem Mikrofon in 80 m Höhe auch von den Mikrofonen in 40 m und 3 m Höhe registriert. Wahrscheinlich flogen die Tiere demnach bodennah und außerhalb des Sichtfeldes der Kameras.

4.3.2 In NatForWINSSENT II erfasste Daten

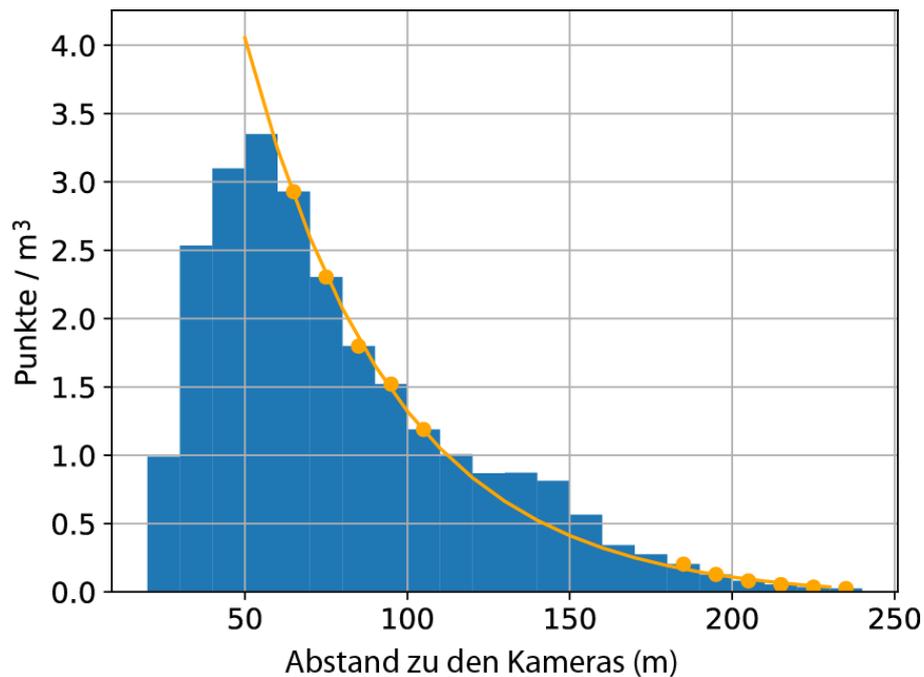


Abb. 25: Anzahl der optischen Fledermausdetektionen pro m^3 aus den Erfassungen in NatForWINSSENT II in Abhängigkeit von der Distanz zu den Kameras. Die basierend auf den gelben Punkten angepasste Kurve zeigt den Effekt der Distanz auf die Detektionswahrscheinlichkeit, für die die Daten korrigiert wurden, um den Attraktionseffekt der WEA (im Abstand von etwa 130 m zu den Kameras) ermitteln zu können.

Um aus den erfassten Daten in Abb. 25 auf die Attraktionswirkung der WEA und die resultierende horizontale Verteilung der Fledermausaktivität schließen zu können, müssen die Detektionszahlen für den Effekt der mit der Distanz zur Kamera abnehmenden Detektionswahrscheinlichkeit im nächsten Schritt korrigiert werden (Abb. 26). Wir verwenden eine an die Verteilung der korrigierten Aktivitätsdichte angepasste Exponentialfunktion zur Beschreibung der horizontalen Verteilung der Fledermausaktivitätsdichte. Hieraus erhalten wir die Abhängigkeit:

$$a + b * c^x$$

mit $a = 3,763$, $b = 9,297$ und $c = 0,885$. x entspricht dem horizontalen Abstand zum Turm.

Aus der Formel ergibt sich eine exponentielle Abnahme des Attraktionseffektes der WEA. Aus der Multiplikation mit der Basis 0,885 des Exponenten pro zusätzlichem Meter Distanz vom Turm resultiert dabei eine Verringerung des Attraktionseffektes um 11,5 % pro Meter¹³.

¹³ Die Formel in dieser Form ist mathematisch gleichbedeutend mit der in A.1.1 zur Herleitung der Fledermausaktivitätsdichte verwendeten. Dort wird jedoch die Basis e für den Exponenten verwendet, da dies die Berechnung des Integrals vereinfacht:

$$\rho(x) = \rho_{base} [1 + \gamma_{tower} * \exp(-x/x_0)]$$

mit $\rho_{base} = a = 3,763$, $\gamma_{tower} = b/a = \frac{9,297}{3,763} = 2,471$ und $x_0 = -\frac{1}{\ln(c)} = 8,226$

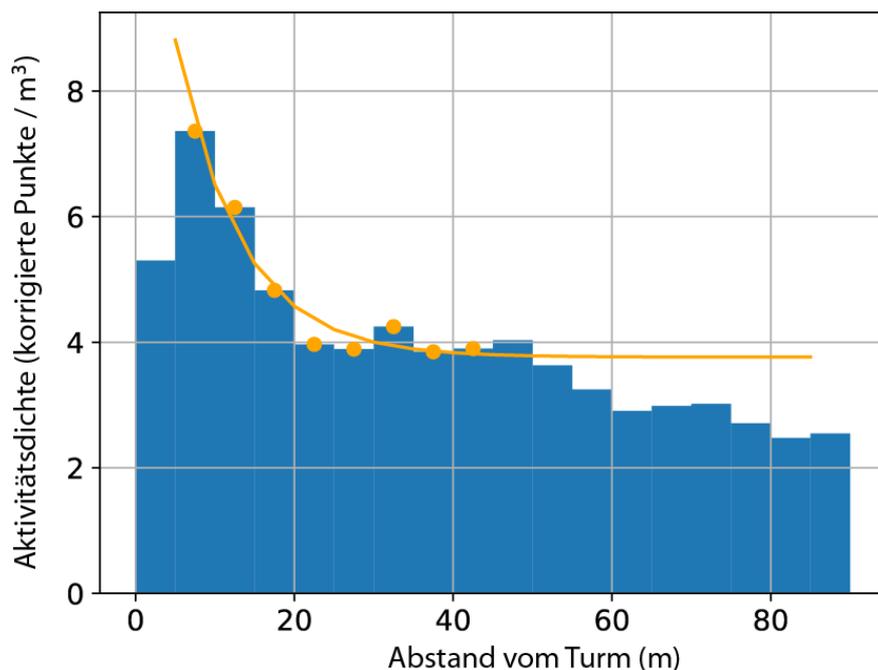


Abb. 26: Aktivitätsdichte in Abhängigkeit vom Abstand zum Zentrum des WEA-Turms als blaue Balken. Y-Achse: Aktivitätsdichte (Zahl stereooptischer Detektionspunkte je m^3 im Erfassungszeitraum) korrigiert für die Distanz zur Kamera (siehe Abb. 25); x-Achse: horizontaler Abstand vom Turm in Metern. Dargestellt sind die Daten aus den Erfassungen im Projekt NatForWINSSENT II. Jeder Balken zeigt den Mittelwert der Aktivitätsdichte für eine Zylinderschale im jeweiligen Abstand zur Turmmitte. Die erste Schale von 0 m bis 5 m wird überwiegend vom Turm selbst eingenommen, weshalb die Aktivität hier gering ist. Die gelbe Linie zeigt die basierend auf den gelben Punkten gefittete Funktion, die wir für die Beschreibung der Attraktionswirkung der WEA und der resultierenden horizontalen Verteilung der Fledermausaktivität verwenden (Formeldarstellung weiter oben im Text). Die zwischen 25 m und 50 m gemessene Aktivitätsdichte entspricht in dieser Interpretation der Daten der von der WEA unbeeinflussten Aktivität im freien Luftraum im Erfassungszeitraum. Abstände von über 50 m zur WEA sind jedoch nur durch wenige Daten gestützt und wurden daher auch nicht für die Anpassung der Kurve verwendet.

4.4 Schlagopferzahl in Abhängigkeit von der Größe der WEA

Wir verwenden ein Modell der Aktivitätsdichte von Fledermäusen im Luftraum um WEA, um das aus der gemessenen akustischen Aktivität berechnete Schlagrisiko für verschiedene Anlagengrößen (Nabenhöhe und Rotordurchmesser) zu korrigieren (zur mathematischen Herleitung siehe Abschnitt A.1.1 im Anhang). Die Aktivitätsdichte ergibt sich aus den gemessenen vertikalen Aktivitätsgradienten (Abschnitt 4.2: exponentielle Abnahme der Aktivitätsdichte um 1,9 % je Erhöhung um 1 m) und horizontalen Aktivitätsgradienten (Abschnitt 4.3: exponentielle Abnahme des Attraktionseffektes der WEA um 11,5 % pro zusätzlichem Meter Distanz vom Turm) (Abb. 27). Der vertikale Effekt wird dabei aus den Messungen zwischen Boden

und Gondel auf den Bereich oberhalb der Gondel extrapoliert. Der horizontale Attraktionseffekt wird vereinfachend nur vom Boden bis auf Gondelhöhe angenommen¹⁴.

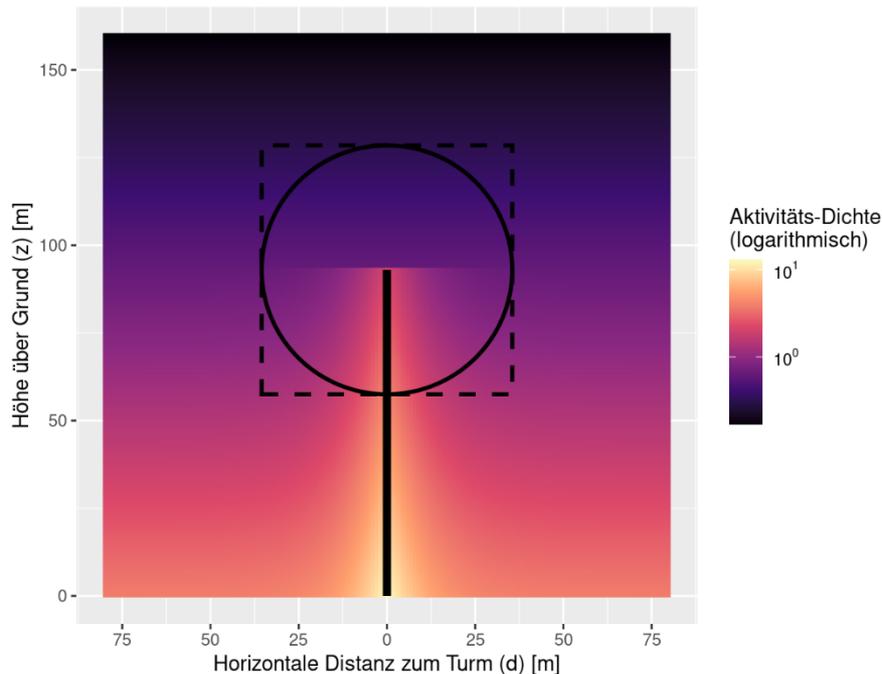


Abb. 27: Verteilung der Fledermausaktivität am Beispiel einer WEA mit Nabenhöhe 93 m und Rotorradius 35,5 m (RENEBAT Referenz-WEA). Auf der y-Achse ist die Höhe der Gondel über Grund in Metern angegeben, auf der x-Achse die horizontale Distanz zum Turm in Metern. Die Aktivitäts-Dichte ist farblich kodiert im dekadischen Logarithmus dargestellt und ergibt sich aus der Kombination der gemessenen vertikalen (Abschnitt 4.2) und horizontalen (Abschnitt 4.3) Aktivitätsgradienten. Der horizontale Attraktionseffekt der WEA wird vereinfachend nur vom Boden bis Gondelhöhe eingerechnet. Der Turm der WEA ist als durchgezogene, schwarze Linie angegeben und ein Kreis begrenzt die vom Rotor überstrichene Fläche. Der gestrichelte Bereich ist das rechteckige Rotorvolumen, das zur vereinfachten Berechnung der Gesamtaktivität verwendet wurde.

Beide Gradienten werden bei einer Berechnung (1) nur mit den Daten des Gondelmikrophones an das jeweils an einer WEA gemessene Aktivitätsniveau angepasst (Abb. 28), wobei die Steigung der Gradienten in der logarithmischen Skala gleichbleibt (siehe Abb. 28 für den vertikalen Effekt). Dies entspricht einer Parallelverschiebung des Gradienten nach oben oder unten entlang der y-Achse.

Liegen (2) Gondel- und Turmdaten vor, so kann aus den zwei Erfassungspunkten zusätzlich der relative Höheneffekt (Steigung des vertikalen Aktivitätsgradienten) für die jeweilige WEA angepasst werden. Dies entspricht einer zusätzlichen Rotation des Gradienten, wobei sich die Steigung der Linie entsprechend den Messwerten verändert (Abb. 28).

¹⁴ Um die Auswirkungen dieser Annahme abzuschätzen, verglichen wir die Werte mit einer Berechnung, die den horizontalen Effekt in der Höhe gar nicht begrenzte. Der maximale Unterschied zwischen den für beide Varianten berechneten Korrekturfaktoren (siehe Abb. 30) trat nur bei sehr kleinen WEA auf und lag bei unter 3 %. Wir gehen daher davon aus, dass die Annahmen über die Ausprägung des horizontalen Effektes oberhalb der WEA keine relevanten Auswirkungen auf die Ergebnisse haben.

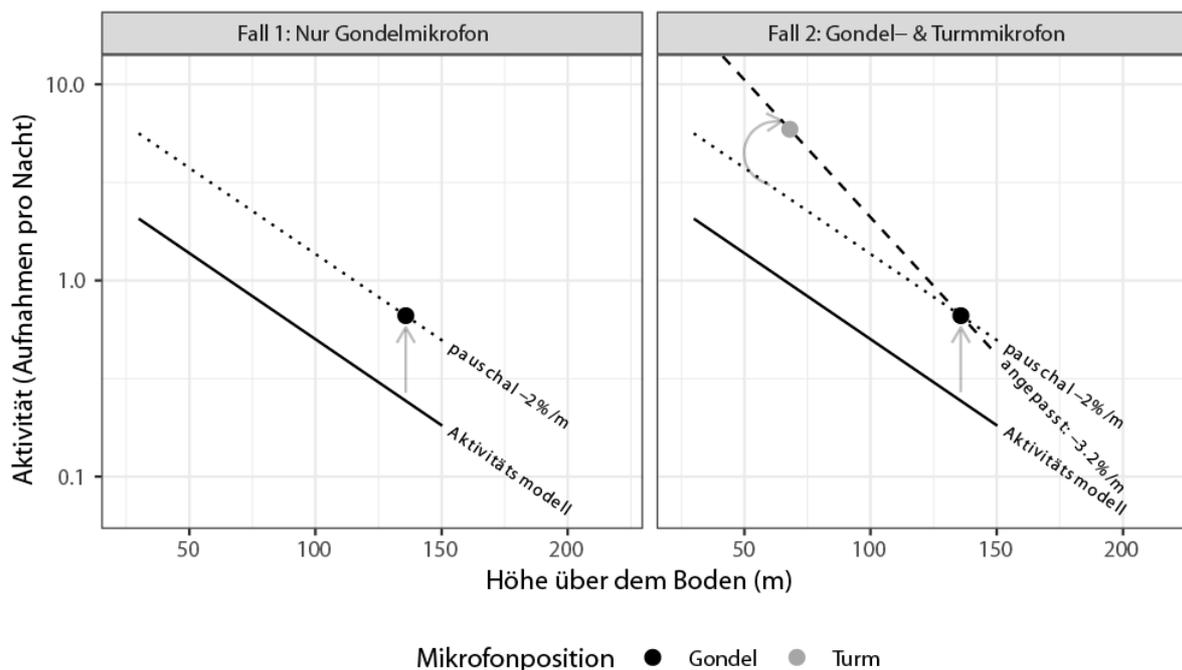


Abb. 28: Anpassung der Funktion zur Beschreibung der vertikalen Höhenverteilung von Fledermäusen bei zwei unterschiedlichen Szenarien (nur Gondelmikrofon oder Gondel- und Turmmikrofon). y-Achse: Anzahl aufgenommener Fledermausaufnahmen pro Nacht; x-Achse: Erfassungshöhe über den Boden in Metern. Fall 1: Anpassung der Funktion bei einer WEA nur mit den Daten des Gondelmikrofones an das jeweils an einer WEA gemessene Aktivitätsniveau (linkes Panel). Dies entspricht einer Parallelverschiebung der durchgezogenen Linie nach oben in den Messpunkt der Gondelerfassung (die gepunktete Linie stellt die angepasste Funktion dar). Die Steigung bleibt dabei gleich und entspricht der in Abschnitt 4.2 modellierten exponentiellen Abnahme von 1,9 % pro Höhenmeter. Fall 2: Liegen Gondel- und Turmdaten vor (rechtes Panel), so kann aus den zwei Erfassungspunkten zusätzlich der relative Höheneffekt (Steigung des vertikalen Aktivitätsgradienten) angepasst werden. Dies entspricht einer zusätzlichen Rotation der gepunkteten Linie, wobei sich die Steigung der Linie entsprechend der Messwerte verändert (in diesem Fall exponentielle Abnahme um 3,2 % pro Höhenmeter; die gestrichelte Linie stellt die abschließend angepasste Funktion dar).

Um das Schlagrisiko für die Größe einer WEA zu korrigieren, wird die Funktion der Aktivitätsdichte über die vom Rotor überstrichene Fläche¹⁵ integriert (zur mathematischen Herleitung siehe Abschnitt A.1.2 im Anhang). Mit dem Ergebnis des Integrals lässt sich für eine gegebene räumliche Verteilung der Fledermausaktivität das Schlagrisiko für WEA verschiedener Größe vergleichen (Abb. 29).

¹⁵ Zur Vereinfachung der Formel wurde nicht die kreisförmige Rotorfläche verwendet, sondern stattdessen mit einer quadratischen Fläche genähert.

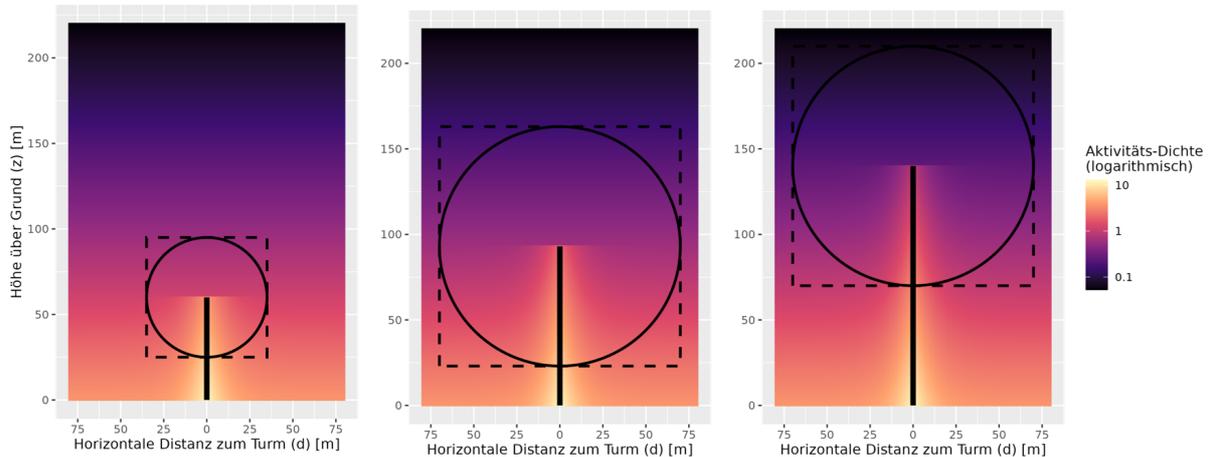


Abb. 29: Vergleich des Effektes unterschiedlicher Anlagengrößen (Nabenhöhe und Rotor) auf die Aktivität im Rotorbereich bei gleicher räumlicher Gesamtverteilung der Fledermausaktivität. Wir beschreiben die Aktivität im Rotorbereich und das resultierende Schlagrisiko als Integral der Aktivitätsdichte über den vom Rotor überstrichenen Bereich. Darstellung wie für Abb. 27 angegeben. Auf der y-Achse ist die Höhe der Gondel über Grund in Metern angegeben, auf der x-Achse die horizontale Distanz zum Turm in Metern.

Mit dem Vergleich der integrierten Aktivität im Rotorbereich ist es auch möglich, eine (verbesserte) Korrektur der Schlagopferberechnung aus akustischen Daten für verschiedene Nabenhöhen und Rotordurchmesser abzuleiten, die z. B. in die Software ProBat integriert werden kann. Der Korrekturfaktor wird berechnet, indem das Ergebnis des Integrals für die jeweilige WEA durch das Ergebnis für eine Referenz-WEA (ergibt sich für ProBat aus dem Mittelwert der WEA in den RENEBAT Projekten: Nabenhöhe 93 m und Rotordurchmesser 35,5 m – siehe Abb. 27) geteilt wird. Ist zum Beispiel das Integral der Aktivitätsdichte für eine WEA doppelt so hoch wie für die Referenz-WEA, so ist an der WEA auch mit einer doppelt so hohen Schlagopferzahl zu rechnen. Dem zugrunde liegt die Annahme einer linearen Korrelation der integrierten Aktivitätsdichte mit dem Schlagrisiko. Eine für eine bestimmte WEA Größe etablierte Korrelation des Schlagrisikos mit einer standardisierten akustischen Erfassung kann so auf WEA mit unterschiedlichen Nabenhöhen und Rotordurchmessern übertragen werden (Behr, Barré et al. 2023).

Abb. 30 und Abb. 31 zeigen die Korrekturfaktoren in Abhängigkeit verschiedener Nabenhöhen und Rotorradien. In Abb. 30 ist zu erkennen, dass z. B. für einen Rotorradius von 80 m das vorhergesagte Schlagrisiko bei einer Nabenhöhe über etwa 145 m und somit einem rotorfreien Bereich¹⁶ von 65 m niedriger als mit der bislang in ProBat verwendeten Korrektur geschätzt wird, für denselben Rotorradius und kleinere Nabenhöhen dagegen höher. Für eine WEA mit 60 m Rotorradius liegt die Nabenhöhe, bei der der Effekt der neuen Korrektur größer wird als der der alten bei etwa 125 m Nabenhöhe und somit einem rotorfreien Bereich von 65 m.

Die gepunkteten Linien in Abb. 30 zeigen, dass allgemein der Korrekturfaktor und somit das Schlagrisiko bei einem rotorfreien Bereich unter 60 m deutlich ansteigt und unter 30 m sehr hoch liegt: Für eine WEA mit Rotorradius 60 m liegt z. B. bei gleicher Fledermausaktivität das

¹⁶ Als rotorfreien Bereich bezeichnen wir die Luftschichten zwischen dem Boden und der minimalen von der Rotorspitze erreichten Höhe über dem Boden.

Schlagrisiko bei einer Nabenhöhe von 100 m und somit einem rotorfreien Bereich von 40 m mehr als doppelt so hoch wie bei einer WEA mit derselben Rotorgröße, aber einer Nabenhöhe von 140 m und somit einem rotorfreien Bereich von 80 m. Dasselbe gilt für eine WEA mit Rotorradius 80 m für die Nabenhöhen 120 m und somit einem rotorfreien Bereich von 40 m im Vergleich zu einer WEA mit der Nabenhöhe 160 m und somit einem rotorfreien Bereich von 80 m.

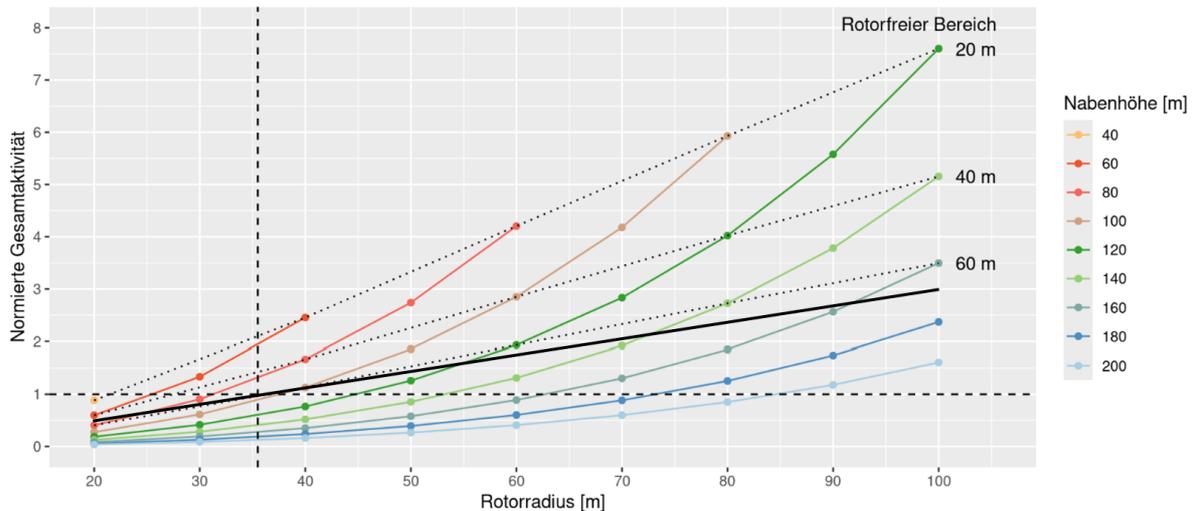


Abb. 30: Korrekturfaktor (y-Achse) für die aus der akustischen Aktivität berechnete Schlagopferzahl in Abhängigkeit vom Rotorradius (x-Achse) und der Nabenhöhe (verschieden farbige Linien). Der Korrekturfaktor ist angegeben relativ zur Referenz-WEA der ProBat Software (Mittelwerte aller WEA in den RENEBAT Projekten: Nabenhöhe 93 m und Rotordurchmesser 35,5 m als **schwarze gestrichelte Linien**). Für eine WEA mit z. B. Rotorradius 70 m und Nabenhöhe 100 m liegt das Schlagrisiko bei gleicher Verteilung der Fledermausaktivität also etwa doppelt so hoch wie für die Referenz-WEA. Die **schwarze durchgezogene Linie** zeigt zum Vergleich den bislang in ProBat verwendeten Korrekturfaktor, der nur den Rotorradius und einen radialen Gradienten der Fledermausaktivität mit dem Abstand zur Gondel berücksichtigt (der Effekt der Nabenhöhe geht nur über die Positionierung des Messpunktes an der Gondel ein: Hochradel, Adomeit et al. 2015). **Schwarze gepunktete Linien** verbinden Anlagenkonfigurationen mit demselben rotorfreien Bereich (Mindestabstand der Rotorspitze zum Boden – die Größe des jeweiligen rotorfreien Bereichs ist rechts neben den Linien angegeben).

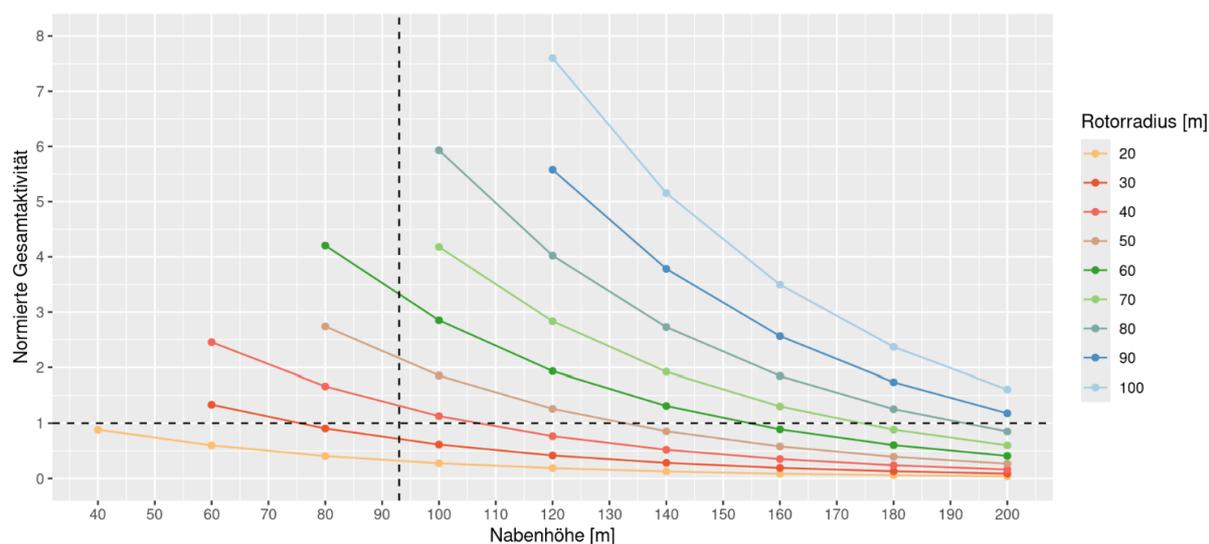


Abb. 31: Korrekturfaktor (y-Achse) für die aus der akustischen Aktivität berechnete Schlagopferzahl in Abhängigkeit von der Nabenhöhe (x-Achse) und dem Rotorradius (verschieden farbige Linien). Für weitere Erläuterungen vergleiche Abb. 30.

4.5 Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm

In diesem Abschnitt analysieren wir den Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm einer WEA für die Charakterisierung der Fledermausaktivität im Rotorbereich und des resultierenden Schlagrisikos. Hierzu stellen wir die Variabilität der Höhengradienten verschiedener WEA und Jahre dar und vergleichen die Schlagopferzahlen, die sich aus einer Berechnung (1) nur mit den Daten eines Gondelmikrofons und (2) den Daten eines Gondel- und eines Turmmikrofons ergeben.

Wir verwendeten dazu nur die Daten gleichzeitiger Gondel- und Turmerfassungen¹⁷ aus eigenen Freilanduntersuchungen im Projekt (Abschnitt 3.1.1) und aus Eingriffsgutachten (Abschnitt 3.2.2). Datensätze nur mit Gondelerfassungen wurden ausgeschlossen.

Den Analysen in diesem Abschnitt liegen dementsprechend deutlich weniger Daten ($n = 7.056$ WEA-Nächte) zugrunde als den Analysen in den Abschnitten 4.2 und 4.4. Es ist daher davon auszugehen, dass die Variabilität der Gesamtheit aller WEA im Bundesgebiet hier nicht vollständig abgebildet wird. Dies gilt in besonderem Maße für die Analysen, die zwischen WEA im Norden und Süden des Bundesgebietes unterscheiden und bei denen der zugrunde liegende Datensatz vor allem für die südlichen Regionen noch weiter eingeschränkt war (für die Zahl der Erfassungsnächte je Region siehe Abschnitt 3.1.3).

In Abb. 32 ist zu erkennen, dass der **relative** Effekt der Höhe des Mikrofons über dem Boden (im Mittel 1,9 % exponentielle Abnahme der Aktivität bei Erhöhung um 1 m – siehe Aktivitätsmodell in Abschnitt 4.2) an den meisten Standorten ähnlich war. Durch die logarithmische Auftragung der y-Achse sind in Abb. 32 gleiche relative Höheneffekte als parallele Linien mit derselben Steigung dargestellt. Die Ähnlichkeit des relativen Höheneffektes verschiedener WEA ist umso bemerkenswerter als das **absolute** Aktivitätsniveau der WEA sich über mehr als

¹⁷ Es wurden nur Daten einer WEA aus gleichzeitigen Erfassungen verwendet, um für die Effekte des Monats und der Windgeschwindigkeit zu kontrollieren.

zwei Zehnerpotenzen erstreckte. Bei WEA mit insgesamt niedrigem Aktivitätsniveau und zwei Erfassungsmikrofonen sind jedoch auch einige deutlich vom Mittel aller WEA abweichende und sogar gegenläufige (Zunahme der Aktivität mit der Höhe) Höheneffekte zu erkennen.

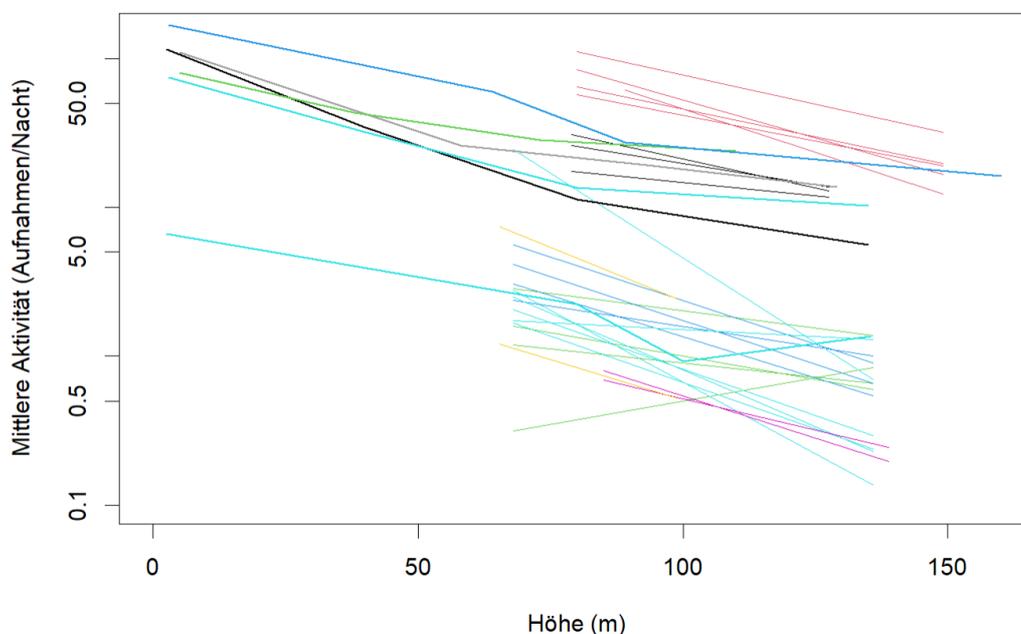


Abb. 32: Mittlere Aktivität von Fledermäusen an WEA (y-Achse, logarithmisch) in unterschiedlichen Höhen über dem Boden (x-Achse). Linien gleicher Farbe stellen die Daten jeweils eines Windpark-Jahres dar. Gezeigt ist die über das Jahr gemittelte akustische Aktivität (Anzahl der Aufnahmen pro Nacht) aus zeitgleichen Messungen in unterschiedlichen Höhen an einer WEA. Effekte der Anbringung des Mikrofons an der Gondel oder am Turm und unterschiedlicher Detektortypen sind in dieser Abbildung nicht herausgerechnet. Einzelne Linien verbinden parallele Messungen im gleichen Jahr an derselben WEA – für Messungen an einer WEA wurde immer derselbe Detektortyp verwendet. Bodennah beginnende Linien mit Datenpunkten von vier Mikrofonen zeigen die im hier dargestellten Projekt erfassten Daten. Datensatz wie im rechten Teil der Abb. 2 dargestellt – für diese Analyse wurden jedoch nur Nächte verwendet, für die von allen Mikrofonen einer WEA gültige parallele Erfassungen vorlagen (n = 7.056 WEA-Nächte).

Der näherungsweise lineare Verlauf der logarithmierten Werte aus den sechs Erfassungen mit vier Mikrofonen in diesem Projekt (bodennah beginnende Linien) legt nahe, dass die Veränderung der Fledermausaktivität mit der Mikrofonhöhe adäquat als exponentieller Effekt (siehe Aktivitätsmodell in Abschnitt 4.2) darstellbar ist.

Um den Nutzen eines zusätzlich zum Gondelmikrofon am Turm installierten Mikrofons zu quantifizieren, vergleichen wir die Schlagrate, die sich aus der Berechnung (1) nur mit den Daten des Gondelmikrofones ergibt mit der Schlagrate, die sich (2) unter Berücksichtigung auch der Turmdata berechnet. Für beide Berechnungen verwendeten wir den in Abschnitt 4.4 dargestellten Ansatz.

Den Höheneffekt und somit die vertikale Verteilung der Fledermausaktivität beschreiben wir in Abb. 33 im Ansatz (1) (nur Gondelmikrofon) mit dem im Aktivitätsmodell berechneten mittleren Effekt (Abschnitt 4.2: 1,9 % exponentielle Abnahme der Aktivität bei Erhöhung um 1 m), wobei die Verteilung nur an das Gesamtaktivitätsniveau der jeweiligen WEA angepasst wird

(siehe linkes Panel in Abb. 28), mit fester Steigung der Linie. Für Ansatz (2) (Gondel und Turm-
mikrofon) kann aus den zwei Erfassungspunkten zusätzlich der relative Höheneffekt der je-
weiligen WEA angepasst werden, wobei sich die Steigung der Linie entsprechend den Mess-
werten verändert (siehe rechtes Panel in Abb. 28).

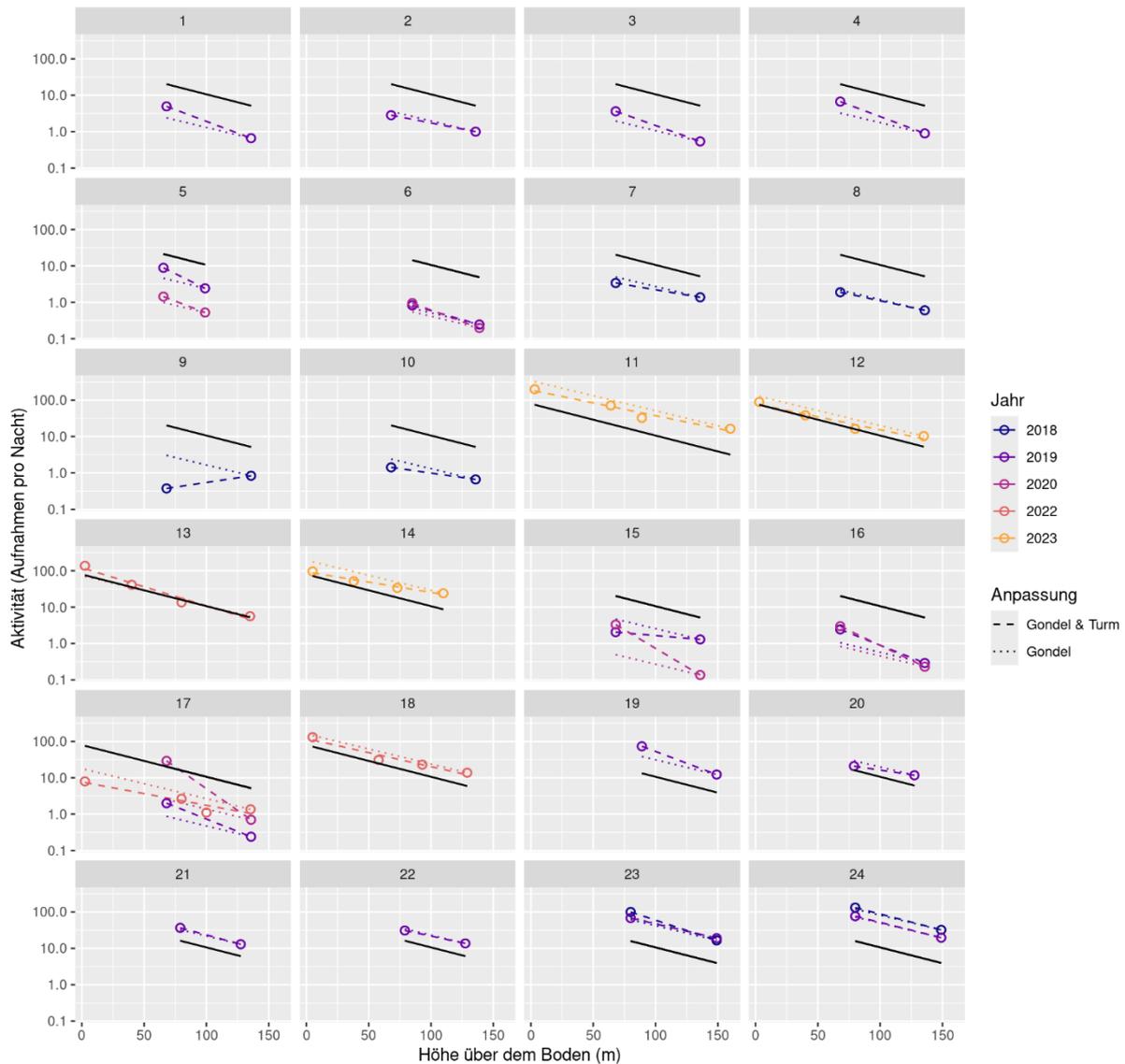


Abb. 33: Höhe der Fledermausaktivität (y-Achse logarithmisch: Aktivitätsdichte) in Abhängigkeit von der Höhe über dem Boden (x-Achse in m) für alle WEA-Jahre mit Gondel- und Turmerfassung; eine WEA je Panel; Jahre farblich unterschieden. Für den Unterschied in der gemessenen Aktivität durch die Erfassung mit Gondel- oder Turmmikrofonen (siehe Abschnitt 4.2) wurde hier korrigiert. Die durchgezogenen, schwarzen Linien zeigen die Höhenverteilung im Median aller WEA (siehe Abschnitt 4.4. Gepunktete Linien: Höhenverteilung, die sich aus der Anpassung für das jeweilige WEA-Jahr (1) mit den Daten nur des Gondelmikrofons ergibt (Parallelverschiebung der durchgezogenen schwarzen Linie nach oben und unten, Steigung festgelegt). Gestrichelte Linien: Höhenverteilung, die sich aus der Anpassung (2) mit Daten sowohl des Gondel- als auch des Turmmikrofons ergibt (Verschiebung nach oben und unten und Rotation der durchgezogenen schwarzen Linie, Steigung an Daten angepasst). Datensatz wie für Abb. 32.

Mit den in Abb. 33 gezeigten vertikalen Höhenverteilungen und dem in Abschnitt 4.4 hergeleiteten Ansatz lassen sich für den Rotordurchmesser und die Nabenhöhe korrigierte Schlagopferzahlen je WEA-Jahr berechnen. Um den Effekt und Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm zu quantifizieren, vergleichen wir die Schlagopferzahlen, die sich für dasselbe WEA-Jahr aus einer Berechnung (1) nur mit den Daten eines Gondelmikrofons und andererseits (2) den Daten des Gondel- und des Turmmikrofons ergeben (Abb. 34). Abweichungen der in Abb. 33 für dasselbe WEA-Jahr dargestellten (1) gepunkteten und (2) gestrichelten Linien der Fledermausaktivität in verschiedene Höhen können dabei zu Unterschieden in der geschätzten Schlagopferzahl zwischen den Berechnungen 1 und 2 führen (z. B. Abb. 33, Panel 17 im Jahr 2022 oder Panel 15 im Jahr 2020). Für ein WEA-Jahr mit einem umgekehrten Höheneffekt (Abb. 33, Panel 9: Zunahme der Aktivität mit der Höhe über dem Boden) waren jedoch die Schätzungen aus den Berechnungen 1 und 2 trotz der sehr unterschiedlichen zugrunde gelegten Höheneffekte fast identisch, da sich die gegenläufigen Höheneffekte im Raum ober- und unterhalb der Gondel aufhoben.

Die Schlagopferschätzung 2 (Gondel- und Turmmikrofon) lag im Median 3 % höher als die Schätzung 1 (nur Gondelmikrofon). 75 % aller Abweichungswerte lagen im Bereich von -11 % bis 29 % und 95 % aller Werte im Bereich von -22 % bis 146 % (Schätzung 2 / Schätzung 1 * 100 % - 100 %; weitere Werte in Tab. 5). Der mit 212 % stärkste Ausreißer in den Daten (Abb. 34) wurde verursacht durch eine sehr starke Abnahme der Aktivität mit der Höhe über dem Boden und ist mit hoher Wahrscheinlichkeit darauf zurückzuführen, dass vorübergehend eine größere Zahl von Wurzelstöcken direkt unter der WEA gelagert wurden, wodurch die Fledermausaktivität in den tiefen Luftschichten sich stark erhöhte. Eine Messung zwei Jahre später an derselben WEA und nach Entfernen der Wurzelstöcke zeigte einen mit anderen Standorten vergleichbaren Höheneffekt (Abb. 33, Panel 17) und entsprechend vergleichbare Schlagopferzahlen für Schätzung 1 und 2¹⁸.

¹⁸ Dieses Beispiel weist darauf hin, dass eine Veränderung der Landnutzung unter einer WEA eine Veränderung der Fledermausaktivität in einer Größenordnung verursachen kann, die eine erneute Beprobung notwendig machen.

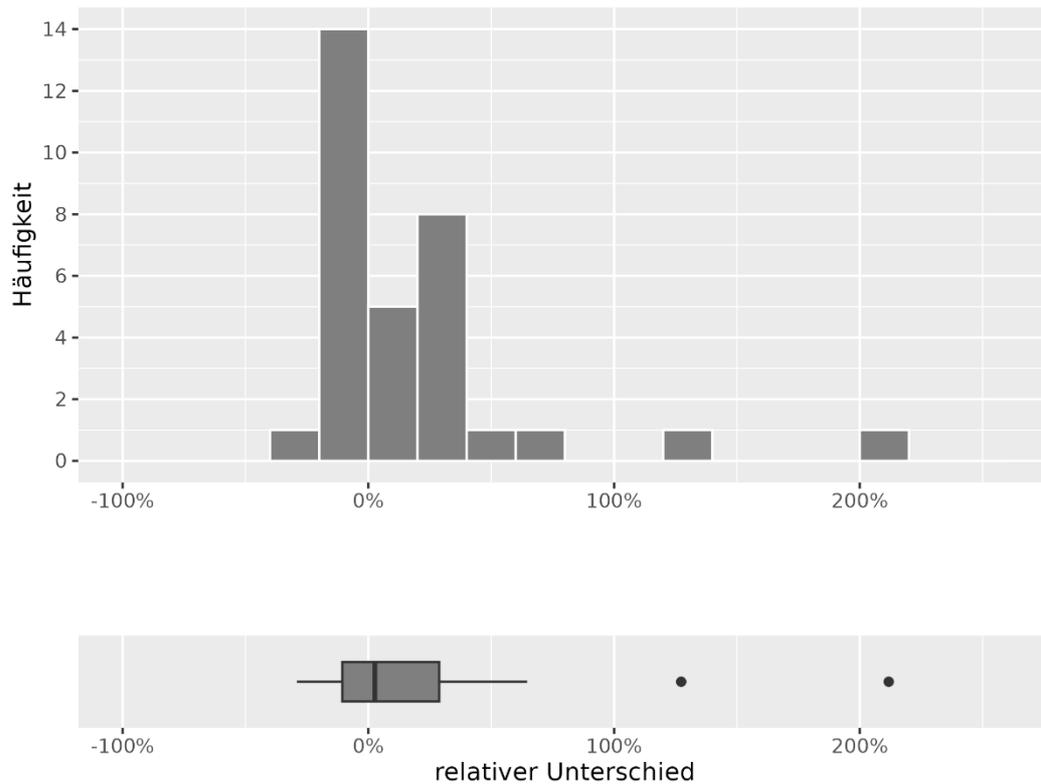


Abb. 34: Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm: Histogramm und Boxplot für das Verhältnis der Schlagopferzahl für dasselbe WEA-Jahr bei einer Berechnung mit Daten des Gondel- und des Turmmikrofons (2) geteilt durch eine Berechnung nur mit den Daten des Gondelmikrofons (1): Schlagopferzahl (2) / Schlagopferzahl (1) * 100 % - 100 % auf der x-Achse. Ein Wert von 10 % ergibt sich z. B. daraus, dass die Zahl der Schlagopfer (2) mit Daten des Gondel- und des Turmmikrofons um 10 % höher geschätzt wurde als (1) nur mit den Daten des Gondelmikrofons. Bei Werten größer 0 % wird die Schlagopferzahl unterschätzt, wenn kein Turmmikrofon eingesetzt wird, bei Werten unter 0 % wird die Schlagopferzahl hingegen überschätzt. Die Höhe der Säulen gibt auf der y-Achse an, für wie viele WEA-Jahre die Abweichung in der jeweiligen Prozentklasse (Breite jeweils 20 %) lag. Datensatz wie für Abb. 32.

Abb. 35 zeigt dieselbe Analyse wie Abb. 34 getrennt für WEA in den nördlichen naturräumlichen Regionen (KU, NW, NO) und in den südlichen Regionen (WM, OM und SW). Für die WEA im Süden zeigte sich ein deutlich einheitlicherer Effekt der Höhe über dem Boden auf die Fledermausaktivität (75 % aller Abweichungswerte im Bereich von -5 % bis 12 % und 95 % aller Abweichungswerte im Bereich von -18 % bis 28 %; weitere Werte in Tab. 5) als für die WEA im Norden (75 % aller Abweichungswerte im Bereich von -11 % bis 29 % und 95 % aller Werte im Bereich von -23 % bis 161 %). Die stärksten Ausreißer lagen dementsprechend auch in den nördlichen Regionen (zur Wertung der Ausreißer siehe die Beschreibung zu Abb. 33).

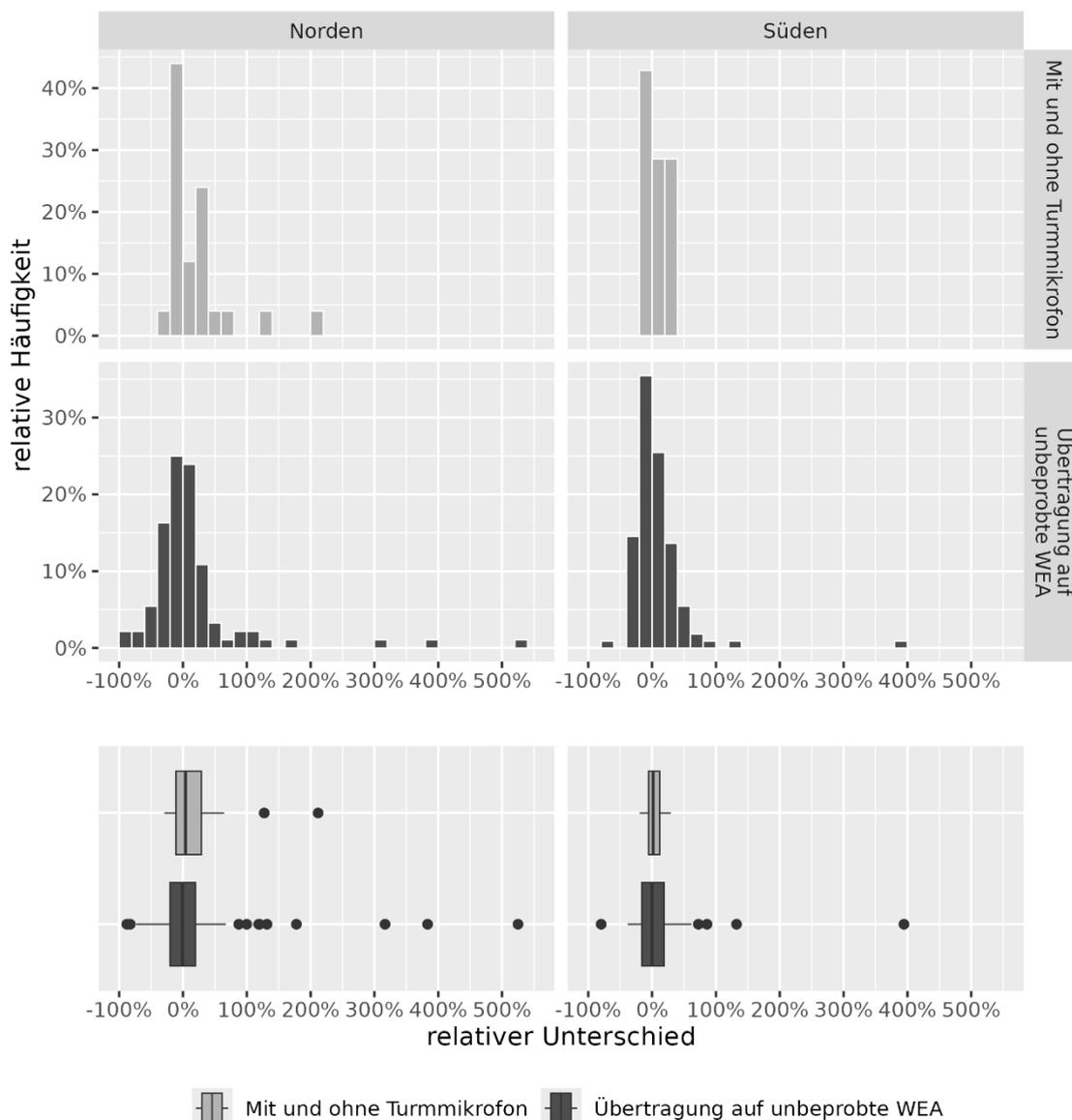


Abb. 35: Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm: Histogramm und Boxplot für das Verhältnis der Schlagopferzahl berechnet für dasselbe WEA-Jahr mit Daten des Gondel- und des Turmmikrofons (2) geteilt durch eine Berechnung nur mit den Daten des Gondelmikrofons (1) (x-Achse) – Darstellung wie in Abb. 34, jedoch getrennt für Nord und Süd. Zum Vergleich der Fehlergröße ist außerdem der Vorhersagefehler bei Übertragung von Erfassungen auf unbeprobte WEA. Hellgraue Histogramme und Boxplots: Verhältnis der Schlagopferzahl getrennt für WEA in den nördlichen naturräumlichen Regionen (KU, NW und NO) und für die südlichen Regionen (WM, OM und SW). Die Häufigkeiten (Höhe der Säulen) ist hier nicht absolut, sondern in Prozent aller WEA-Jahre dargestellt, um die auf unterschiedlich vielen Erfassungen basierenden Werte aus dem Norden und Süden besser vergleichen zu können. Dunkelgraue Histogramme und Boxplots zeigen im Vergleich die Größe des Vorhersagefehlers bei der Übertragung der Ergebnisse von beprobten auf nicht beprobte WEA innerhalb desselben Windpark-Jahres, wie sie häufige Praxis in Genehmigungsverfahren ist.

Wir gehen hier davon aus, dass die Messung (2) mit Gondel- und Turmmikrofon die reale Höhenverteilung der Fledermäuse exakter beschreibt als die Messung (1) nur mit dem Gondelmikrofon und dass daher Abweichungen zwischen den beiden Messungen als Fehler der Messung (1) zu werten sind. Das oben dargestellte Beispiel einer nur vorübergehenden Abweichung des Höheneffektes durch die Lagerung von Wurzelstöcken unter der WEA zeigt jedoch, dass z. B. bei einer Veränderung der Landnutzung unter der WEA die Messung (1) nur mit dem Gondelmikrofon und die Annahme eines Standardhöheneffektes das mehrjährige Mittel des Schlagrisikos besser beschreiben kann als Berechnungen (2) basierend auf Daten aus ein oder zwei Jahren von Gondel- und Turmmikrofon. Es sind jedoch sicherlich auch Standorte vorstellbar, an denen die Landnutzung zu einer dauerhaft hohen Fledermausaktivität in den tieferen Luftschichten führt (z. B. Gewässernähe).

Um den Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm einer WEA einzuordnen, vergleichen wir die Größe des Vorhersagefehlers bei einer Messung (1) nur mit dem Gondelmikrofon mit dem Vorhersagefehler bei der Übertragung der Ergebnisse von beprobten auf nicht beprobte WEA innerhalb desselben Windpark-Jahres¹⁹ (Tab. 5, zur Berechnung dieses Fehlers siehe Abschnitt 3.6.3). Eine solche Übertragung von Ergebnissen auf unbeprobte WEA wird in allen Länderpapieren ab einer festgelegten Zahl von WEA pro Park empfohlen, um den Erfassungsaufwand in großen Windparks zu reduzieren.

Für die nördlichen Regionen waren die Vorhersagefehler bei Messung (1) nur mit dem Gondelmikrofon und bei der Übertragung auf unbeprobte WEA im Park ähnlich groß. Für die südlichen Regionen waren die Vorhersagefehler bei Messung (1) nur mit dem Gondelmikrofon deutlich geringer als bei der Übertragung auf unbeprobte WEA im Park. Um den Fehler bei der Schlagopferschätzung für den gesamten Park in den südlichen Regionen zu verringern, ist es demnach effizienter, zusätzliche WEA zu beproben als bereits an der Gondel beprobte WEA mit einem weiteren Mikrofon am Turm auszustatten. In den nördlichen Regionen ist der Nutzen beider Ansätze vergleichbar.

¹⁹ Neben den hier betrachteten Vorhersagefehlern treten weitere auf, die wir aus unseren Daten nur zum Teil quantifizieren können. Wir vergleichen hier also nur den zusätzlichen Vorhersagefehler der genannten Vorgehensweisen.

Tab. 5: Größe des Vorhersagefehlers bei der Schlagopferschätzung aus einer Berechnung (1) nur mit Daten des Gondelmikrofons (ohne Turmmikrofon) und des Vorhersagefehlers bei der Übertragung der Ergebnisse von beprobten auf nicht beprobte WEA innerhalb desselben Windpark-Jahres. Der Fehler wurde berechnet als Abweichung vom jeweils als wahr angenommenen Wert (Berechnung (2) mit Daten von Gondel- und Turmmikrofon bzw. mit an der jeweiligen WEA erfassten Aktivitätsdaten) in Prozent (positive Werte zeigen eine Unterschätzung an, negative Werte eine Überschätzung). In jeder Zeile wird ein Quantil (2,5 %, 5 %, ... 97,5 %) des jeweiligen Fehlerbereichs angegeben. Für beide Fehlerquellen sind die Werte für die nördlichen Regionen (KU, NW und NO; n = 110 WEA-Jahre), die südlichen Regionen (WM, OM, SW; n = 92 WEA-Jahre) und für den Gesamtdatensatz (n = 202 WEA-Jahre) angegeben.

Quantil des Fehlers (%)	nur Gondelmikrofon			Übertragung auf unbeprobte WEA		
	Nord	Süd	Gesamt	Nord	Süd	Gesamt
2,5	-23	-18	-22	-35	-70	-52
5	-19	-16	-20	-31	-51	-38
25	-11	-5	-11	-16	-20	-17
50 (Median)	4	2	3	1	-1	0
75	29	12	29	19	20	19
95	115	27	93	52	125	87
97,5	161	28	146	76	278	132

4.6 Test von Niederschlagssensoren

Windenergieanlagen werden teilweise mit Sensoren zur Erfassung der Niederschlagsintensität ausgestattet, um neben Windgeschwindigkeit und Temperatur einen weiteren meteorologischen Parameter für die Steuerung der Abschaltungen zum Fledermausschutz nutzen zu können. Im Rahmen der ProBat Entwicklung und bei Anfragen von Behörden und Gutachtern an das ProBat-Team wurde jedoch mehrmals deutlich, dass die Genauigkeit und Zuverlässigkeit einiger Sensoren als sinnvolle Basis für eine Vorhersage der Fledermausaktivität nicht ausreichen. In den Werten dieser Sensoren treten sowohl drastische Über- als auch Unterschätzungen der Niederschlagsintensität auf. Darüber hinaus können Fehler beim Anschluss an das SCADA System z. B. zu Werten führen, die kontinuierlich hohe Niederschlagsmengen darstellen, was in mehreren Fällen zu einem Komplettausfall der Betriebseinschränkungen zum Schutz von Fledermäusen geführt hat.

Entwickler und Betreiber äußern immer wieder Interesse an der Verwendung von Niederschlagsdaten bei der Definition von Abschaltzeiten gegenüber den Genehmigungsbehörden, den Herstellern der WEA und auch gegenüber den ProBat-Entwicklern. Die behördlichen Anforderungen an Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit erfordern jedoch einen Nachweis, dass die angebotenen Sensoren für den Einsatz auf WEA im Allgemeinen und für den Anwendungsfall Artenschutz im Speziellen geeignet sind. Berechtigte Zweifel an der Zuverlässigkeit der Sensoren führen bislang häufig zu einer Ablehnung der Niederschlagsintensität als Abschaltparameter oder zur Notwendigkeit konservative Grenzwerte festzulegen. Entsprechend wurde der Wunsch nach einer unabhängigen Prüfung der Sensoren an verschiedene Hersteller von Windenergieanlagen und Sensortechnik und auch an die ProBat-Entwickler herangetragen.

Basierend auf parallelen Testmessungen von Niederschlagssensoren gelangen wir hier zu einer datenbasierten Aussage dazu, ob hochwertige Sensortypen für die Festlegung und Einhaltung eines Niederschlags-Schwellenwertes grundsätzlich geeignet sind. Wir kooperierten bei der Bearbeitung dieser Fragestellung mit dem WEA-Hersteller Enercon und mit der Fleximaus GmbH (siehe Abschnitt 2.1).

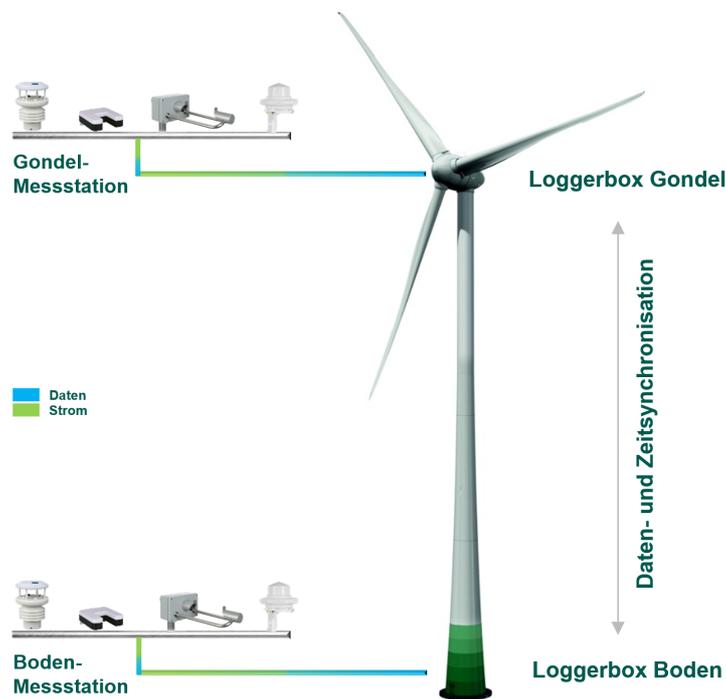


Abb. 36: Schematischer Aufbau des Tests verschiedener Niederschlagssensoren. In einem doppelten Testaufbau wurde jeweils ein Sensor desselben Typs am Boden und ein weiterer zeitgleich auf der Gondel in 160 m Höhe platziert (Quelle: Fabian Lorenz, Enercon).

Die von Enercon durchgeführten Messungen zeigen, dass alle Sensoren die am Boden gemessenen Niederschlagsereignisse grundsätzlich auch auf der Gondel abbilden. Beim direkten Vergleich der Daten des jeweiligen Sensortyps aus der Bodenmessstation mit den Daten aus der Gondelmessstation wurden jedoch Güteunterschiede festgestellt. Dabei zeigen die Regressionsanalysen ein höheres Bestimmtheitsmaß bei der Korrelation der Messdaten der Laser-Niederschlags-Monitore (auf der Gondel und am Boden) gegenüber den Daten der weiteren getesteten Sensorpaare. Enercon konnte somit zeigen, dass der Laser-Niederschlags-Monitor am wenigsten sensitiv für möglichen Störgrößen, z. B. Wind und Schatteneffekte des Rotors, war.



Benennung	Laser-Niederschlags-Monitor	Clima Sensor US	Niederschlagssensor	Radar-Niederschlagssensor WS100
Hersteller	Thies CLIMA	Thies CLIMA	Thies CLIMA	Lufft
Messprinzip	Optisch, Laser	Doppler-Radar, Keramik	Optisch, Infrarot	Doppler-Radar
Schnittstelle	RS485 / 422	RS485 / 422	Analog	RS485

Abb. 37: Name, Hersteller, Messprinzip und technische Schnittstelle der in Kooperation mit Enercon getesteten Sensoren (Quelle: Fabian Lorenz, Enercon).

Im nächsten Schritt prüften wir, in welchem Umfang die Niederschlagsdaten eine Vorhersage der Fledermausaktivität ermöglichen. Niederschlagsdaten lagen für einen von Enercon und drei von Fleximaus beprobte Standort-Jahre vor. Abb. 38 zeigt beispielhaft die Korrelation der akustischen Fledermausaktivität in vier verschiedenen Mikrofonhöhen an einer WEA in der Region NW (Nordwestdeutsches Tiefland) mit der mit dem **Thies Laser-Niederschlags-Monitor** gemessenen Niederschlagsintensität. Die Korrelationen waren plausibel. Es ist zu erkennen, dass in größerer Höhe die Aktivität bei Niederschlag stärker abnimmt als in Bodennähe. So wurde auch bei Niederschlagsintensitäten zwischen 1 mm / h und 10 mm / h am Boden noch hohe und selbst in 89 m Höhe noch deutliche Aktivität registriert. An der Gondel (160 m Höhe) wurde über 1 mm / h Niederschlagsintensität keine Aktivität mehr nachgewiesen und bei über 10 mm / h wurde in keiner Höhe mehr Aktivität registriert, wobei derart hohe Niederschlagsmengen an diesem Standort nur während etwas mehr als einer halben Stunde gemessen wurden.

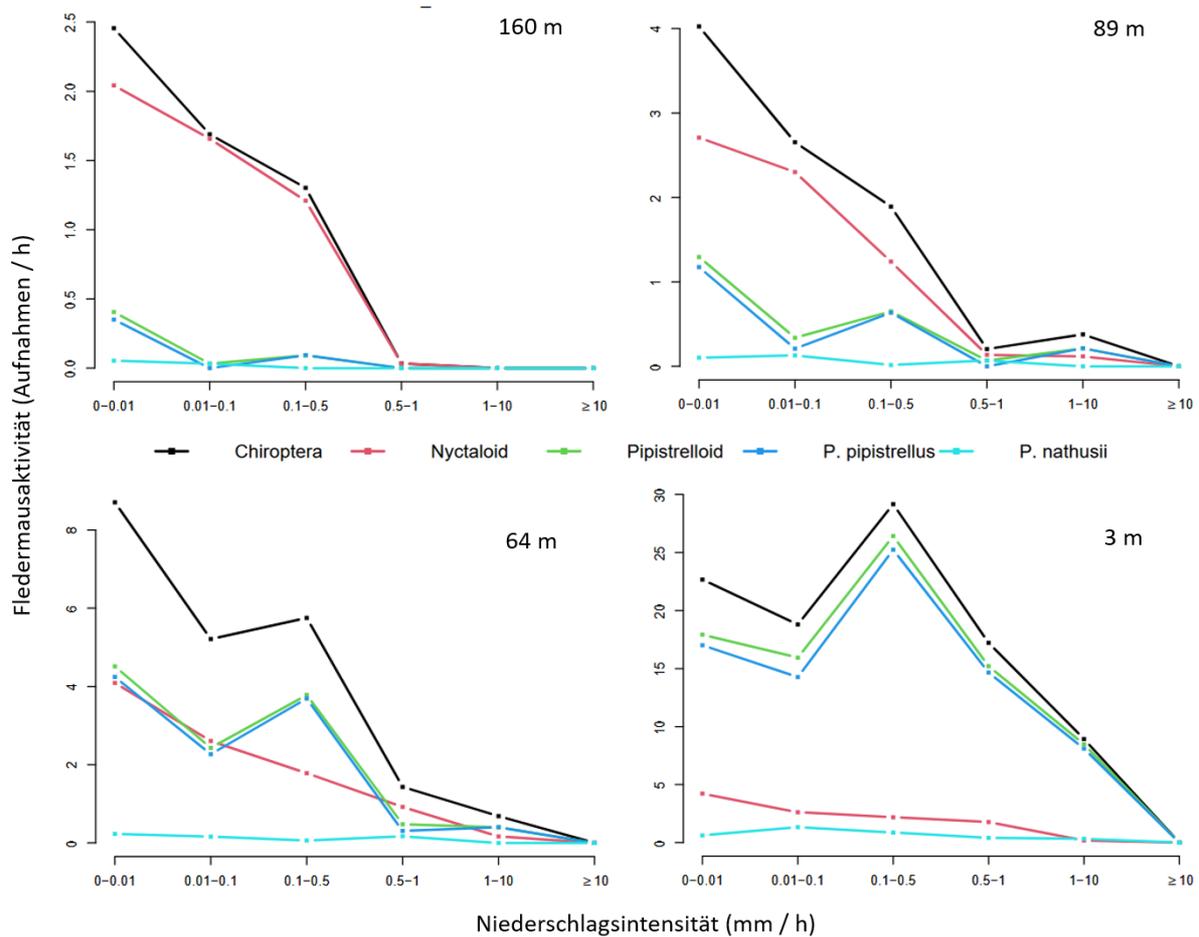


Abb. 38: Fledermausaktivität in Abhängigkeit von der mit dem **Thies Laser-Niederschlags-Monitor** gemessenen Niederschlagsintensität in verschiedenen Höhen über dem Boden an einer WEA in der Region NW (Nordwestdeutsches Tiefland). Die Mikrofonhöhe ist oben rechts in jedem Panel angegeben. y-Achse: Fledermausaktivität in Aufnahmen pro Stunde gemittelt über eine Aktivitätsperiode, wobei die unterschiedliche Skalierung in den Panels zu beachten ist; x-Achse: Niederschlagsintensität in Millimetern pro Stunde. Die verschiedenen Arten(gruppen) sind in Linien unterschiedlicher Farbe angegeben (Legende zwischen den oberen und unteren Panels). Zu den Arten(gruppen) siehe Abschnitt 3.2.3.

Die an zwei Standorten von Fleximaus mit dem **Lambrecht rain[e]** gemessenen Korrelationen der Fledermausaktivität mit der Niederschlagsmenge (nicht dargestellt) zeigten ebenfalls plausible Verläufe, die der in Abb. 38 dargestellten ähnlich waren. In Gondelhöhe wurden an diesen Standorten bei über 1 mm/h Niederschlagsintensität jeweils eine bzw. zwei Aufnahmen aufgezeichnet. Wie in Abb. 38 nahm auch hier die Aktivität bei hohen Niederschlagsintensitäten zum Boden hin stark zu. Die Verteilung der mit dem rain[e] gemessenen Niederschlagswerte war jedoch nicht plausibel, mit einem relativ hohen Anteil von Niederschlagsintensitäten zwischen 1 und 10 mm/h. Wir können aus unserem Datensatz nicht ableiten, ob dies ein Effekt des Sensors selber oder des Installationsortes direkt über der Tür war.

Abb. 39 zeigt die ebenfalls nicht plausible Korrelation der Fledermausaktivität mit den gemessenen Niederschlagswerten für den mit dem einfachen **Thies Niederschlagssensor** beprobten Standort. Auch in Gondelhöhe wurde hier noch deutliche Aktivität bei sehr hohen Niederschlagsmesswerten über 10 mm/h aufgezeichnet. Die Festlegung eines Grenzwertes der Niederschlagsintensität für den Normalbetrieb der WEA war hier nicht möglich.

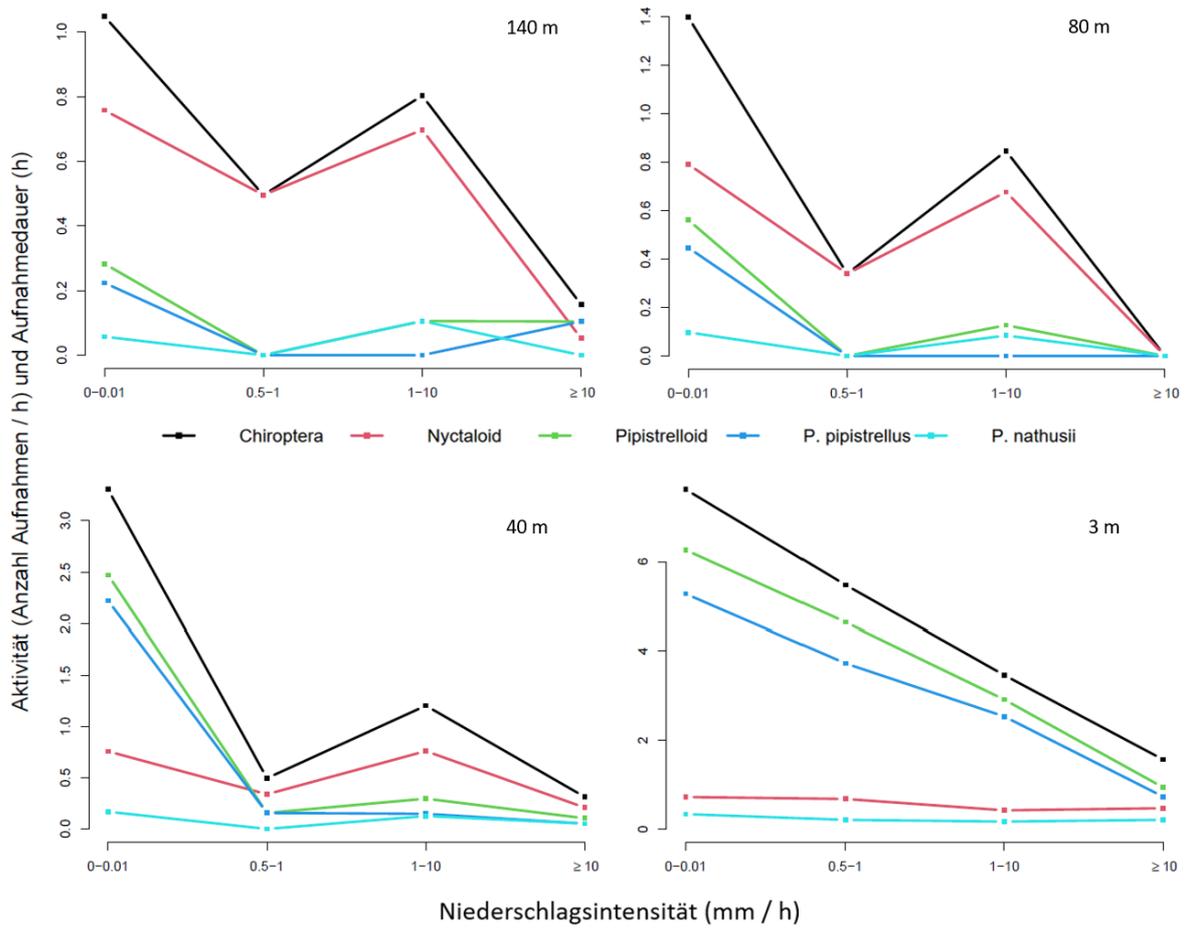


Abb. 39: Fledermausaktivität in Abhängigkeit von der mit dem einfachen **Thies Niederschlagssensor** gemessenen Niederschlagsintensität in verschiedenen Höhen über dem Boden an einer der Region SW (Südwestdeutsche Mittelgebirge) zugeordneten WEA. Weitere Angaben wie bei Abb. 38.

5 Erfassungsstandard

Aus unseren im Projekt erzielten Ergebnissen und aus den Daten und Erfahrungen, die andere Bearbeiter*innen in Eingriffsgutachten gewonnen haben, definieren wir folgende Punkte als Standard bei einer ergänzenden Erfassung am Turm von WEA, die zusätzlich zu den Setzungen und Vorgaben in ProBat für eine akustische Erfassung der Fledermausaktivität an der Gondel (Kalibrierung, Testsignale, etc: Weber, Nagy et al. 2018) gelten:

- Im Sinne einer besseren Vergleichbarkeit sollten für die Erfassung in der Gondel und am Turm dieselbe Detektortechnik und gleiche Einstellungen verwendet werden.
- Mikrofone können von außen (z. B. mit Magnet oder Turmmanschette) oder durch eine Öffnung im Turm von innen nach außen ragend installiert werden
- Die Position des Turmmikrofons sollte möglichst weit von der Gondel entfernt gewählt werden (Abstand von der Gondel mindestens 70 % des Rotorradius), jedoch nicht mehr als 10 m unterhalb des tiefsten Rotorpunktes.
- Die höchste Empfindlichkeit des Mikrofons ist horizontal auszurichten.
- Das Mikrofon sollte für einen besseren Witterungsschutz und um Erfassungen zu standardisieren, nach Osten ausgerichtet sein (im Bereich von Südost bis Nordost).
- Die Mikrofonmembran sollte sich in einem Abstand von 30 mm bis 150 mm von der Turmwand befinden. Das bedeutet für eine Installation in einer Turmöffnung, dass sie also um diesen Abstand aus dem Turm herausragt.
- Strukturen, die den Erfassungswinkel des Mikrofons begrenzen (Regenschutz, akustische Reflektoren, etc.) sind nicht zulässig.
- Bei Mikrofonkabeln mit einer Länge von mehr als 10 m (möglich z. B. beim BATmode) ist bei analoger Signalübertragung für die Kabeldämpfung entsprechend den Angaben des Detektorherstellers zu korrigieren.
- Die Empfindlichkeit des Mikrofons muss genauso wie bei einer Gondelerfassung täglich geprüft und bei unzulässigen Abweichungen der Empfindlichkeit das Mikrofon getauscht und der entsprechende Zeitraum als ungültig gewertet werden. Dies ist wegen der stärkeren Exposition bei Turmmikrofonen noch zentraler als an der Gondel.
- Die an der Gondel und am Turm erfassten Daten sollten gemeinsam in der hier entwickelten Formel (siehe Abschnitt 4.2) zur Schätzung der vertikalen Verteilung der Fledermausaktivität verwendet werden, aus der sich dann Rückschlüsse auf das resultierende Schlagrisiko ziehen lassen. Die Formel und eine Möglichkeit zur Verwendung von Turmdaten sollen hierzu zeitnah in ProBat integriert werden.

6 Diskussion

6.1 Höhenverteilung der Arten

Der gemessenen Höhenverteilung lag das jeweilige regionale Artenspektrum zugrunde. Die hier dargestellten regionalen Unterschiede entsprachen den Ergebnissen anderer Untersuchungen (z. B. Behr, Brinkmann et al. 2011a). In den Regionen KU, NW, NO und OM (Norden und Nordosten) lag der Anteil der Artengruppe Nyctaloid und darin vor allem des Großen Abendseglers, *N. noctula*, höher. In den Regionen WM und SW (Süden und Südwesten) hingegen war der Anteil der Artengruppe Pipistrelloid und darin vor allem der Zwergfledermaus, *P. pipistrellus*, wesentlich höher (Lage und Akronyme der Regionen in Abb. 1). Die Raauhautfledermaus, *P. nathusii*, wurde in KU und NW (Küste und Nordwesten) häufiger registriert als in den anderen Regionen.

Der Anteil der Artengruppe Nyctaloid und darin des Großen Abendseglers, *N. noctula*, an der Gesamtaktivität nahm mit der Höhe über dem Boden zu. Die Artengruppe Pipistrelloid und darin vor allem die Zwergfledermaus, *P. pipistrellus*, zeigte einen gegenläufigen Effekt, d. h. ihr Anteil nahm meist mit der Höhe ab. Beide Effekte waren vor allem in niedrigen Luftschichten ausgeprägt und flachten in größeren Höhen ab.

Verschiedene Untersuchungen weisen darauf hin, dass einige der in der vorliegenden Arbeit nicht untersuchten und überwiegend strukturgebundenen Arten zwar selten an der Gondel aufgenommen werden, jedoch durchaus im unteren Rotorbereich aktiv sein können. So geben Bach, Bach et al. (2020) an, dass in 20 von 29 WEA-Jahren Arten auf Höhe des Turmmikrofons festgestellt wurden, die nicht mit dem Gondelmikrofon erfasst werden konnten. Dies betraf vor allem die Breitflügelfledermaus, *Eptesicus serotinus*, die Zwergfledermaus, *Pipistrellus pipistrellus*, und die beiden Langohrarten, *Plecotus spec.*

6.2 Vertikale Verteilung der Gesamtaktivität

Die gemessene Fledermausaktivität wird neben der Höhe durch zahlreiche weitere Variablen beeinflusst, die den Effekt der Höhe teilweise überlagern können. Um die vertikale Verteilung der Fledermausaktivität dennoch möglichst präzise beschreiben zu können, modellierten wir die Gesamtaktivität aller Fledermausarten (Zahl der Aufnahmen pro Nacht) neben der Höhe des Mikrofons über dem Boden auch aus den Einflussvariablen Gondel- oder Turmmikrofon, Detektortyp und -einstellung, Median der Windgeschwindigkeit pro Nacht, Monat und naturräumliche Region (zur Definition der Einflussvariablen siehe Abschnitt 3.3). Standortsspezifische Unterschiede zwischen den WEA wurden als Zufallseffekte modelliert. Hierin eingeschlossen war auch ein möglicher Effekt der Lage der WEA im Offenland oder im Wald. Da uns für niedrige Höhen über dem Boden nur Daten von WEA im Offenland vorlagen, wurde dieser Effekt nicht als weitere Einflussvariable modelliert. Wir gehen jedoch von einer relativ ähnlichen Fledermausaktivität an WEA im Offenland und Wald aus, wie sie in Hurst, Biedermann et al. (2016) ermittelt wurde.

Für die **Windgeschwindigkeit** wurde eine exponentielle Abnahme der Aktivität um 33,5 % pro Erhöhung der Windgeschwindigkeit um 1 m / s ermittelt (Abb. 14 und Abb. 15). In Korner-Nievergelt, Almasi et al. (2018) wurde eine Abnahme um 46,8 % und in Behr, Brinkmann et al. (2011b) um 50,3 % bei Erhöhung der Windgeschwindigkeit um 1 m / s für an der Gondel erfasste Aktivitätswerte ermittelt. Die wahrscheinlichste Hauptursache für die geringere Abhängigkeit in dieser Untersuchung ist, dass die am Turm und Boden gemessene Aktivität mit der

an der Gondel gemessenen Windgeschwindigkeit korreliert wurde. Da die Windgeschwindigkeit mit der Höhe über dem Boden zunimmt, ergibt sich hierdurch Aktivität bei scheinbar höheren Windgeschwindigkeiten. Eine weitere Ursache könnte sein, dass der Effekt der Windgeschwindigkeit auf die Aktivität in höheren Luftschichten stärker ausgeprägt ist, und daher in Datensätzen, die nur Gondeldaten enthalten, höhere Werte erreicht.

Batcorder und BATmode waren die häufigsten Detektortypen in unserem Datensatz (Tab. 2). Die Effekte verschiedener **Detektortypen und -einstellungen** waren wesentlich weniger stabil als die der anderen Einflussvariablen und variierten zwischen verschiedenen Modellvarianten und Datensätzen. Hierfür erscheinen zwei Hauptursachen plausibel: Zum einen zerschneidet der Batcorder durch den kurzen verwendeten Posttrigger von 200 ms Rufsequenzen (besonders bei der Artengruppe Nyctaloid) häufiger in mehrere Einzelaufnahmen. Gleichzeitig erfasst er wegen seiner geringeren Empfindlichkeit teilweise keine Aktivität, wo empfindlichere Detektoren Fledermausrufe aufzeichnen (Behr, Barré et al. 2023). Diese gegensätzlichen Effekte führen zu einer höheren Varianz der Aufnahmezahlen und damit zu instabilen Schätzungen der Detektoreffekte. Zum anderen waren die Detektortypen regional ungleich verteilt - der BATmode wurde häufiger in den nördlichen, der Batcorder häufiger in den südlichen Regionen eingesetzt. Dadurch korrelierte der Detektortyp mit den regionalen Unterschieden in der Aktivität.

In unserem Modell registrierte der Batcorder mit der Einstellung -36 dBFS 74 % mehr Aufnahmen als der Referenzdetektor Avisoft/BATmode²⁰. In Korner-Nievergelt, Almasi et al. (2018) wurden dagegen für den Batcorder um 22 % niedrigere Aufnahmezahlen im Vergleich zum BATmode ermittelt. Für den Anabat SD1 wurde eine im Vergleich zum BATmode um 81 % geringere Aufnahmezahl gemessen, während wir hier einen Wert von 62 % berechnen. Die wahrscheinlichste Ursache der erheblichen Unterschiede zwischen der früheren und der hier vorliegenden Arbeit in den Schätzwerten des Detektoreffektes für den Batcorder ist neben Unterschieden in der Modell- und Datenstruktur die oben genannte Instabilität der Detektoreffekte aufgrund unterschiedlicher bedingter Varianzen der Aufnahmezahlen und durch die Korrelation mit der Region.

Zwischen den **naturräumlichen Regionen** ergaben sich sehr große Unterschiede in der Fledermausaktivität. So war diese in der Region Südwestdeutsche Mittelgebirge (SW) im Mittel 28-fach höher als in der Referenzregion Küste (KU). Die Effektgrößen der Regionen entsprechen dabei der Größenordnung in Korner-Nievergelt, Almasi et al. (2018). Ein direkter Vergleich einzelner Regionen ist jedoch aufgrund unterschiedlicher Modellstrukturen und regionaler Zuordnungen nicht möglich.

Das Maximum der Aktivität im Jahresverlauf lag über alle Regionen gemittelt in den **Monaten** Juli und August. Im Frühjahr und Herbst war die Aktivität deutlich geringer. Die phänologische Verteilung der Aktivität ähnelte grob den Ergebnissen in Behr, Brinkmann et al. (2011b), die im Vergleich zum Referenzmonat Mai folgende Aktivitäten ermittelten: für den Juni 70 %, Juli 290 %, August 570 %, September 70 % und Oktober 30 %. Unsere Untersuchung ergab für

²⁰ Hierbei ist der weiter oben erwähnte Umstand zu beachten, dass die hohe Zahl der Aufnahmen beim Batcorder auf den kurzen verwendeten Posttrigger zurückzuführen ist, wodurch vor allem Rufsequenzen aus der Artengruppe Nyctaloid in mehrere Aufnahmen mit jeweils nur einem oder wenigen Rufen zerschnitten werden. Bei einem Vergleich z. B. von 10-Minuten-Intervallen mit oder ohne Aktivitätsnachweis zeigt der BATmode eine wesentlich höhere Empfindlichkeit und somit einen deutlich größeren Erfassungsbereich (Behr, Barré et al. 2023).

denselben Referenzmonat: Juni 174 %, Juli 386 %, August 482 %, September 229 % und Oktober 77 %. Die jahreszeitliche Verteilung zeigte also einige Unterschiede zwischen den Monaten mit relativ höherer Aktivität im Frühjahr und Herbst sowie einer relativ geringen Aktivität im Sommer. Dafür gibt es, neben Unterschieden in der Modellstruktur, zwei wahrscheinliche Erklärungen: Zum einen erfassten die Turmmikrofone eine höhere Herbstaktivität in den tieferen Luftschichten. Zum anderen könnte die Klimaerwärmung zu einer Verlängerung des Aktivitätszeitraums im Frühjahr und Herbst im Vergleich zu den 13 Jahre älteren Daten geführt haben.

Bei **Erfassungen mit Turmmikrofonen** lag die mittlere gemessene Aktivität 12,4 % niedriger als bei Gondelmikrofonen, unabhängig von der im Modell separat geschätzten Höhe über dem Boden. Dies lässt sich vor allem durch die unterschiedliche Ausrichtung der Mikrofone erklären: Die horizontal ausgerichteten Turmmikrofone erfassen weniger Aktivität als die vertikal nach unten orientierten Gondelmikrofone, da die Fledermausaktivität zum Boden hin zunimmt. Ein weiterer, bisher nicht untersuchter Unterschied besteht in der räumlichen Orientierung: Während Turmmikrofone fest installiert sind, dreht sich das Gondelmikrofon mit der Gondel und befindet sich dadurch immer im Lee des Rotors.

Die **Höhe des Mikrofons** zeigte einen exponentiellen Effekt auf die Aktivität (Abb. 14). Pro Meter Höhenzunahme sank die Aktivität aller Fledermausarten um 1,9 %. Dies entspricht 17,5 % bei Erhöhung um 10 m, 61,7 % bei 50 m und 85,3 % bei 100 m Höhendifferenz. Bach, Bach et al. (2020)²¹ beschreiben eine im Median 3,1-fach (Spanne 1,1- bis 215-fach) höhere Aktivität bei einer Erfassung am Turm (mittlere Höhe 67 m) im Vergleich zu einer Erfassung an der Gondel (mittlere Höhe 134 m). Für die Rauhautfledermaus lag dieser Wert im Median bei 4,1 (Spanne 1,5 bis 77-fach). In unseren Ergebnissen zeigt sich für diese Höhendifferenz eine 3,0-fache Erhöhung der Aktivität aller Arten, wenn man den zusätzlichen Effekt der Turmmikrofon-Messung berücksichtigt. Unser Ergebnis ist somit vergleichbar zu den Ergebnissen von Bach, Bach et al. (2020), die die Spanne des Höheneffektes (Aktivität am Turm / Aktivität an der Gondel) für alle Arten ohne die Rauhautfledermaus mit 1,1 bis 215 angegeben. Diese Spanne lag in unserem Datensatz für alle Arten insgesamt zwischen 0,4 und 34,9, wobei die Werte in beiden Arbeiten von einzelnen stark abweichenden Ausreißern bestimmt wurden (siehe Abb. 32).

Durch die exponentielle Abnahme der Aktivität mit der Höhe entfällt ein hoher Anteil der Aktivität und somit des Schlagrisikos auf die tieferen vom Rotor überstrichenen Luftschichten. Dieser Effekt ist desto stärker, je näher der Rotor zum Boden reicht (siehe Abb. 30). Der Höheneffekt zeigt sich zwar an vielen WEA sehr konsistent, dennoch werden Berechnungen, die nur auf Gondelmessungen basieren, mit abnehmendem rotorfreiem Bereich und zunehmender Rotorlänge unsicherer. Aus diesen Erkenntnissen leiten wir entsprechende Empfehlungen zur Erfassung mit Turmmikrofonen ab (siehe Abschnitt 6.6).

Der Effekt der Mikrofonhöhe über dem Boden auf die Fledermausaktivität variierte nur geringfügig zwischen den Monaten (**Wechselwirkung Monat * Höhe**). Allerdings nahm die Aktivität in den tieferen Luftschichten im Herbst langsamer ab als in der Höhe, wodurch sich der

²¹ Im Unterschied zur von uns verwendeten Aufnahmezahl geben Bach, Bach et al. (2020) die Zahl der Minutenintervalle mit Fledermausaufnahmen als Maß der Aktivität an. Die Autor*innen unterschieden dabei zwischen einem Wert für alle Arten insgesamt, jedoch unter Ausschluss der Rauhautfledermaus, und einem Wert nur für die Rauhautfledermaus. Die Berechnungen in Bach, Bach et al. (2020) beruhen auf 29 WEA-Jahre aus den Regionen KU und NW, von denen 22 auch in unsere Analysen eingingen.

Höheneffekt verstärkte. Zum Beispiel war der Unterschied zwischen der erwarteten Aktivität in 50 m und 150 m Höhe im Oktober und November etwa viermal so groß wie in den anderen Monaten. Bei der Berechnung der Schlagopferzahl in Abhängigkeit von der Größe der WEA in Abschnitt 4.4 verwenden wir einen über alle Monate gemittelten Höheneffekt. Dadurch wird das Schlagrisiko in den tieferen Luftschichten und somit auch insgesamt im Oktober und November unterschätzt und in den anderen Monaten leicht überschätzt. Die Unterschätzung im November ist wegen der in diesem Monat insgesamt geringen Aktivität meist wenig relevant für das Gesamtergebnis der erwarteten Schlagopfer.

In den südlichen Regionen OM, SW und WM nahm die Aktivität mit der Windgeschwindigkeit stärker ab als in den nördlichen Regionen NO und NW (**Wechselwirkung Region * Windgeschwindigkeit**). So betrug das relative Aktivitätsniveau in der Region SW bei 3 m / s nur 68 % des Wertes für die Region NO und bei 5 m / s nur 53 %.

Diese regionalen Unterschiede sollten bei zukünftigen Updates des ProBat zugrunde liegenden Modells (bis einschließlich zur Version 8) berücksichtigt werden, da sie aktuell dazu führen, dass das beim Betrieb mit Auflagen verbleibende Schlagrisiko mit einem geringen Fehler geschätzt wird.

Für die Küste (Region KU) lag die Höhe des Effektes der Windgeschwindigkeit zwischen den Werten der anderen Regionen. Da ein größerer Anteil der Fledermausaktivität an diesen Standorten auf Zugverhalten mit einem vergleichsweise hohen Anteil der Rauhautfledermaus, *P. nathusii*, zurückgeht, könnte dies darauf hinweisen, dass die ziehenden Tiere empfindlicher auf hohe Windgeschwindigkeiten reagieren. Über alle Regionen gemittelt wurde die Rauhautfledermaus jedoch als die „windhärteste“ Art in Mitteleuropa beschrieben (Behr, Brinkmann et al. 2011a).

An der Küste (Region KU) und in den südlichen Regionen SW und WM nahm die Aktivität mit der Höhe stärker ab als in den nördlichen Regionen NO und NW (**Wechselwirkung Region * Mikrofonhöhe**). So war der Unterschied zwischen der erwarteten Aktivität in 100 m und 50 m Höhe in der Region SW etwa 50 % höher als in der Region NM und der Unterschied zwischen 150 m und 50 m Höhe mehr als 120 % höher.

Auch dieser Effekt sollte in zukünftigen Updates von ProBat berücksichtigt werden. In den bisherigen Versionen bis einschließlich der Version 8 führt der über alle Regionen gemittelten Höhengradienten zu einer leichten Überschätzung des beim Betrieb mit Auflagen verbleibenden Schlagrisikos im Norden und zu einer leichten Unterschätzung an der Küste.

Für die Region OM lässt unser Datensatz wegen der geringen Variabilität der Mikrofonhöhen keine sinnvolle Interpretation zu. Für Vorhersagen in dieser Region sollte stattdessen der Mittelwert der beiden anderen südlichen Regionen (SW und WM) verwendet werden.

6.3 Horizontale Verteilung der Fledermausaktivität

Die stereoptischen Wärmebilderfassungen zeigen eine exponentielle Abnahme der Attraktionswirkung der WEA um 11,5 % pro Meter mit zunehmender horizontaler Distanz vom Turm. Diese Ableitung beruht allerdings bislang nur auf Daten einer über eine gesamte Saison beprobten WEA und wird daher durch ungleich weniger Daten gestützt als die Beschreibung der vertikalen Aktivitätsverteilung aus den akustischen Daten. Es ist daher davon auszugehen, dass die Variabilität der Gesamtheit aller WEA im Bundesgebiet nur zu einem kleinen Bruchteil

abgebildet wird. Eine Analyse basierend auf einem größeren Datensatz mehrerer WEA in verschiedenen naturräumlichen Regionen ist daher notwendig, um Hinweise auf regionale und phänologische Unterschiede in der räumlichen Verteilung zu bekommen.

Der parallele Einsatz hochwertiger optischer und akustischer Systeme bringt einen erheblichen Nutzen durch die gegenseitige Validierung der Systeme mit sich. Dies gilt nicht nur für die Bestimmung der horizontalen Verteilung der Fledermausaktivität, wo die optischen Daten wesentlich besseren Aufschluss über die räumliche Verteilung der Fledermäuse geben können als die akustischen. Es wäre daher wünschenswert, die bereits vorliegenden optischen und akustischen Daten zukünftig durch weitere Erfassung ergänzen zu können.

6.4 Schlagopferzahl in Abhängigkeit von der Größe der WEA

Basierend auf den aktuell vorliegenden Daten zur horizontalen und der vertikalen Aktivitätsverteilung entwickelten wir eine verbesserte Korrektur der Schlagopferberechnung aus akustischen Daten Abschnitt 4.4. Diese berücksichtigt sowohl Nabenhöhe als auch Rotordurchmesser und kann in die Software ProBat integriert werden. ProBat bezieht bislang nur den Rotorradius als Korrekturfaktor ein, während die Nabenhöhe nur mittelbar über die Installation des Mikrofons an der Gondel berücksichtigt wird (Hochradel, Adomeit et al. 2015).

Die neue Methode ermöglicht zwei Berechnungsansätze für den Korrekturfaktor: (1) nur mit den Daten eines Gondelmikrofones oder (2) mit sowohl Gondel- als auch Turm Daten. Bei Ansatz (1) werden die Gradienten parallel verschoben, um sie an das gemessene Aktivitätsniveau anzupassen, während ihre Steigung konstant bleibt. Bei Ansatz (2) kann zusätzlich die Steigung des vertikalen Aktivitätsgradienten aus den Daten ermittelt werden. In beiden Fällen wird die angepasste Korrekturfunktion über die Rotorfläche integriert und mit einer Referenz-WEA verglichen.

Die neue Korrekturfunktion führt je nach Kombination von Nabenhöhe und Rotorradius zu unterschiedlichen Ergebnissen im Vergleich zur bisherigen Korrektur (siehe Abb. 30). Bei einem Rotorradius von 80 m liegt das vorhergesagte Schlagrisiko bei Nabenhöhen über 145 m niedriger und bei geringeren Nabenhöhen höher als bisher geschätzt. Bei einem Rotorradius von 60 m liegt dieser Wendepunkt bei etwa 125 m Nabenhöhe.

Unsere Ergebnisse zeigen also, dass im Zusammenspiel von Rotorradius und Nabenhöhe die Größe des rotorfreien Bereichs, also des Minimalabstands der Rotorspitze zum Boden, einen entscheidenden Einfluss auf das Schlagrisiko hat. Ein geringer rotorfreier Bereich erhöht das Schlagrisiko für denselben Rotorradius stark: Bei gleicher Fledermausaktivität und gleichem Rotorradius von 60 m ist das Schlagrisiko bei 100 m Nabenhöhe und somit 40 m rotorfreiem Bereich mehr als doppelt so hoch wie bei 140 m Nabenhöhe und somit 80 m rotorfreiem Bereich.

6.5 Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm

Die entwickelte Korrekturformel für Fledermausschlagopfer berücksichtigt sowohl Nabenhöhe als auch Rotordurchmesser. Sie ermöglicht zwei Berechnungsansätze: einen (1) nur mit Gondelmikrofon-Daten und einen (2) mit kombinierten Gondel- und Turmmikrofon-Daten. Durch den Vergleich dieser beiden Ansätze können wir quantifizieren, wie groß der zusätzliche Erkenntnisgewinn durch ein Turmmikrofon für die Vorhersage des Kollisionsrisikos und die Berechnung von Betriebsalgorithmen ist.

Für diese Analyse verwendeten wir ausschließlich Daten gleichzeitiger Gondel- und Turmerfassungen. Der Datensatz ist damit deutlich kleiner als bei der Analyse der vertikalen Aktivitätsverteilung (Abschnitt 6.2). Es ist daher davon auszugehen, dass die Variabilität der Gesamtheit aller WEA im Bundesgebiet hier nicht vollständig abgebildet wird. Für regional differenzierte Aussagen sollten weitere Datensätze aus verschiedenen Regionen integriert werden.

Basierend auf den vorliegenden Daten vergleichen wir die Schlagopferzahlen, die sich für denselben Datensatz aus einer Schätzung (1) nur mit den Daten eines Gondelmikrofons und (2) den Daten eines Gondel- und eines Turmmikrofons ergeben, wobei wir davon ausgehen, dass Abweichungen zwischen den beiden Schätzungen als Fehler der Schätzung (1) zu werten sind.

Für 75 % aller WEA-Jahre lagen die Abweichungen zwischen -11 % und 29 % und für 95 % zwischen -22 % bis 146 %²². Im Süden zeigten sich dabei geringere Unterschiede zwischen den Schätzungen als im Norden.

Der mit 212 % stärkste Ausreißer in den Daten wurde verursacht durch eine weit überdurchschnittlich hohe Abnahme der Aktivität mit der Höhe über dem Boden und ist mit hoher Wahrscheinlichkeit darauf zurückzuführen, dass vorübergehend eine größere Zahl von Wurzelstöcken direkt unter der betreffenden WEA gelagert wurden, wodurch die Fledermausaktivität in den tiefen Luftschichten sich stark erhöhte. Nach Entfernung der Wurzelstöcke zeigte eine erneute Messung zwei Jahre später einen normalen Höheneffekt mit vergleichbaren Schlagopferzahlen für beide Schätzungen. Dieses Beispiel zeigt, dass es in Einzelfällen langfristig sinnvoller sein kann, die Zahl der Schlagopfer aus (1) nur Gondeldaten statt (2) aus Gondel- und Turm Daten zu berechnen, wenn sich die Landnutzung unter der WEA nach der Datenerfassung stark verändert.

6.6 Empfehlungen

Um den Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm einer WEA einzuordnen, vergleichen wir die Größe des Vorhersagefehlers bei einer Schätzung (1) nur mit dem Gondelmikrofon mit dem Vorhersagefehler bei der in der Planungspraxis häufigen Übertragung der Ergebnisse von beprobten auf nicht beprobte WEA innerhalb desselben Windpark-Jahres²³. In den nördlichen Regionen (KU, NO und NW) waren die Vorhersagefehler bei Schätzung (1) und bei der Übertragung auf unbeprobte WEA im Park ähnlich – hier bringt ein Turmmikrofon etwa denselben Erkenntnisgewinn wie eine zusätzliche Gondelerfassung an einer sonst unbeprobten WEA. In den südlichen Regionen (WM, OM und SW) waren die Vorhersagefehler für Schätzung (1) deutlich geringer als bei der Übertragung auf unbeprobte WEA im Park – hier ist demnach der Erkenntnisgewinn durch ein Turmmikrofon im Mittel geringer als der einer zusätzlichen Gondelerfassung an einer sonst unbeprobten WEA.

Turmmikrofone sind aufwändiger zu installieren und fallen wegen ihrer exponierten Position häufiger aus als Gondelmikrofone. Zur Verringerung der Vorhersageunsicherheit ist daher die Gondelbeprobung möglichst vieler WEA meist effizienter als zusätzliche Turmerfassungen. Dies gilt besonders für die südlichen Regionen mit einheitlicherem Höheneffekt. Soll die Vor-

²² Die Abweichung wurde wie folgt berechnet: $\text{Schätzung (2)} / \text{Schätzung (1)} * 100 \% - 100 \%$

²³ Wir gehen dabei davon aus, dass die genannten Vorhersagefehler unabhängig voneinander sind.

hersageunsicherheit verringert werden, ist es deshalb sinnvoll, anders als in der aktuellen Praxis möglichst viele WEA eines Windparks zu beproben. Turmmikrofone sollten generell erst dann erwogen werden, wenn bereits alle WEA eines Parks an der Gondel beprobt werden.

Eine Ausnahme von dieser Empfehlung gilt für WEA mit einem geringen rotorfreien Bereich. Durch die exponentielle Abnahme der Aktivität mit der Höhe (siehe Abschnitt 6.2) entfällt ein hoher Anteil der Aktivität und somit des Schlagrisikos auf die tieferen vom Rotor überstrichenen Luftschichten. Dieser Effekt ist desto stärker, je tiefer der Rotor zum Boden reicht (siehe dazu auch Abb. 30). WEA mit einem geringen rotorfreien Bereich weisen, wie bereits in Abschnitt 6.4 diskutiert, ein wesentlich höheres Schlagrisiko auf als WEA mit demselben Rotorradius aber größerer Nabenhöhe. Konfigurationen mit einem rotorfreien Bereich von weniger als 40 m sind daher als problematisch zu sehen und rotorfreie Bereiche unter 30 m sollten sowohl im Sinne des Artenschutzes als auch der Rentabilität (deutlich höhere Abschaltzeiten um dasselbe Schutzziel für Fledermäuse zu erreichen) soweit möglich vermieden werden.

Auch wenn nach den hier vorliegenden Ergebnissen der Höheneffekt an vielen WEA sehr konsistent ist, sind Berechnungen, die auf einer akustischen Messung nur an der Gondel beruhen, umso unsicherer, je geringer der rotorfreie Bereich und je länger der Rotor ist. Wir empfehlen daher eine zusätzliche Erfassung am Turm für

- WEA mit einem rotorfreien Bereich²⁴ unter 30 m
- WEA mit rotorfreiem Bereich unter 60 m, wenn:
 - große Quartiere schlaggefährdeter Fledermausarten²⁵ in der Nähe liegen oder
 - die Landnutzung (z.B. Gewässer, Holzlagerung, strukturreiche Wälder und Wiesen sowie Beweidung) eine hohe bodennahe Aktivität erwarten lässt

An solchen Standorten haben die tiefen Luftschichten einen sehr hohen Einfluss auf das Gesamtschlagrisiko (siehe Diskussion des wahrscheinlich durch gelagerte Wurzelstöcke verursachten Ausreißers in Abschnitt 6.5), weshalb durch ein zusätzliches Mikrofon am Turm die Gesamtvorhersageunsicherheit für einen Windpark wohl meist stärker gesenkt werden kann als z. B. durch die Beprobung einer weiteren WEA an der Gondel. Ein rotorfreier Bereich von minimal bis zu 30 m wurde auch in den Messungen der RENEBAT Projekte abgebildet (Nagy, Behr et al. 2018), die der ProBat Software zugrunde liegen.

Eine zusammenfassende Übersicht zu den Empfehlungen, die wir aus dem Nutzen eines Turmmikrofons schlussfolgern im Vergleich zum Nutzen, der sich aus der Beprobung an der Gondel bei einer weiteren WEA ergibt, zeigt das folgende vereinfachende Schema (Abb. 40).

²⁴ Als rotorfreien Bereich definieren wir hier den Abstand vom tiefsten durch den Rotor überstrichenen Punkt bis zum Boden an Offenlandstandorten oder bis zum Kronenbereich von Wald- oder Heckenstrukturen an Waldstandorten oder Standorten mit ausgeprägten Heckenstrukturen.

²⁵ Bei einem sehr geringen rotorfreien Raum unter 20 m können, neben den üblicherweise als schlaggefährdet angesehenen Arten, weitere Arten(gruppen) wie die Langohrfledermausarten, *Plecotus spec.*, oder Arten der Gattung *Myotis* betroffen sein.

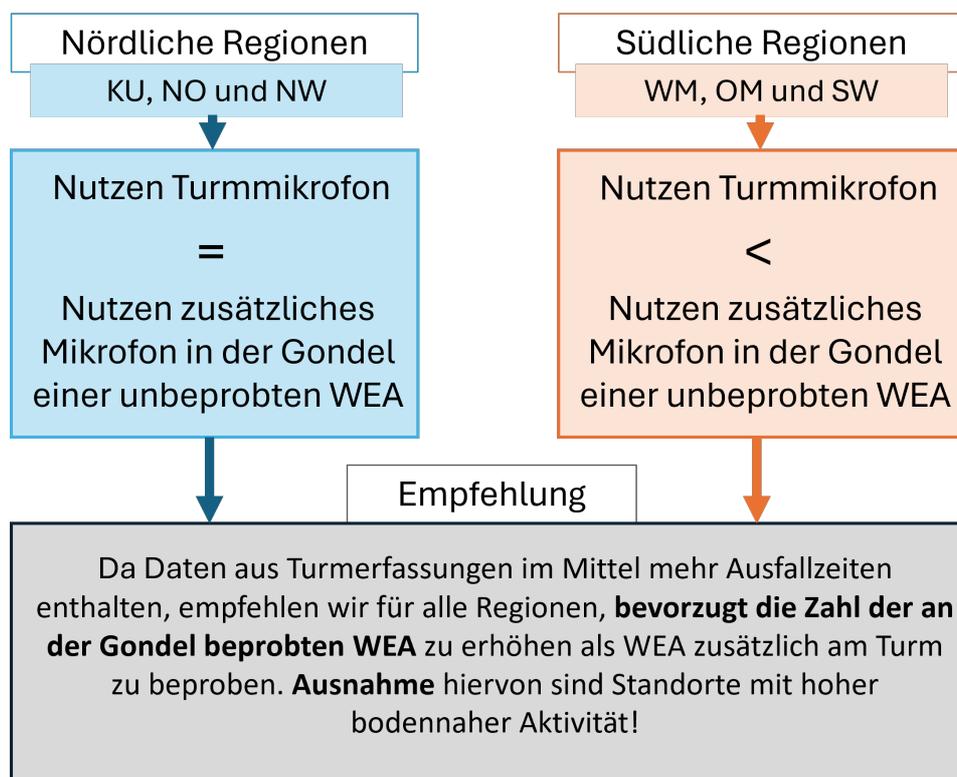


Abb. 40: Empfehlungen, die wir aus dem Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm einer WEA im Vergleich zum Nutzen, der sich aus der Beprobung einer zusätzlichen WEA an der Gondel ergibt, schlussfolgern. Wegen der leicht unterschiedlichen Situation unterscheiden wir in der Argumentation zwischen den nördlichen Regionen (KU, NW und NO) und den südlichen Regionen (WM, OM und SW).

6.7 Test von Niederschlagssensoren

In einem Nebenprojekt konnten wir mit unserem Kooperationspartner Enercon in einem Windpark die Zuverlässigkeit von Niederschlagssensoren prüfen, vergleichen und mit der parallel im Park gemessenen Fledermausaktivität korrelieren.

Der Vergleich zwischen Boden- und Gondelmessstation zeigte Qualitätsunterschiede zwischen den Sensortypen. Der Thies Laser-Niederschlags-Monitor war dabei am wenigsten empfindlich gegenüber möglichen Störgrößen (z. B. Wind und Schatteneffekte des Rotors) und ist deshalb von den von Enercon getesteten Sensoren der Empfehlenswerteste.

Die Korrelation der akustischen Fledermausaktivität in vier verschiedenen Mikrofonhöhen mit der Niederschlagsintensität zeigte, dass in größerer Höhe die Aktivität bei Niederschlag stärker abnimmt als in Bodennähe. Auch bei Niederschlagsintensitäten zwischen 1 mm / h und 10 mm / h wurde am Boden noch hohe und selbst in 89 m Höhe noch deutliche Aktivität registriert, während an der Gondel (160 m Höhe) bei über 1 mm / h Niederschlagsintensität keine Aktivität mehr nachgewiesen wurde.

Die Messwerte sowohl des Thies Laser-Niederschlags-Monitor als auch der Lambrecht rain[e] korrelierten plausibel und in ähnlicher Form mit der gemessenen Fledermausaktivität. Mit beiden Sensortypen können daher Grenzwerte der Niederschlagsintensität für den Normalbetrieb von WEA festgelegt werden. Die plausible Höhe dieser Grenzwerte war in unserem Da-

tensatz für beide Sensortypen an verschiedenen Standorten vergleichbar. Keine sinnvolle Korrelation zeigte dagegen der einfache Thies Niederschlagssensor, der nicht für die Festlegung von Grenzwerten für den Fledermausschutz an WEA geeignet ist.

Basierend auf diesen Ergebnissen empfehlen wir die Verwendung qualitativ hochwertiger Sensoren und die Beibehaltung eines pauschalen Schwellenwerts von 5 mm / h für den Normalbetrieb (WEA können bei Niederschlagsintensitäten größer oder gleich diesem Wert im Normalbetrieb laufen). Dieser Wert kann unter folgenden Bedingungen auf bis zu 2 mm / h abgesenkt werden:

- Es liegen Messwerte aus mindestens zwei Jahren vor.
- Die Absenkung basiert auf der standortspezifischen Korrelation von Niederschlag und Fledermausaktivität²⁶.

Verpflichtend ist dabei die regelmäßige Plausibilitätsprüfung der Niederschlagswerte, mindestens halbjährlich. Diese kann durch Vergleich mit nahen Wetterstationen oder retrospektiven Wettermodellen erfolgen.

²⁶ Hierbei müssen natürlich für die Korrelation und als späteres Abschaltkriterium die Messwerte desselben Sensortyps am selben Installationsort verwendet werden.

Danksagung

Das Gelingen des hier vorgestellten Forschungsvorhabens beruht auf der Mitarbeit vieler Personen und Institutionen, für deren Unterstützung wir uns herzlich bedanken:

Wir danken dem Bundesamt für Naturschutz für die Förderung des Vorhabens und insbesondere Frau Nora Köcher, die uns fachlich betreut hat.

Wir danken den Eigentümern und Betreibern, die uns uneigennützig Zutritt zu ihren WEA gewährt oder ihr Einverständnis gegeben haben, dass an ihren WEA erfasste Daten an uns weitergegeben werden, namentlich Christoph Pieper von Agrowea, Melvin Bach und Dirk Fritzsche von WIND-projekt und Reinhard Kirchner von Wust - Wind & Sonne. Hier geht auch ein herzlicher Dank an die Gutachter*innen, die diese Daten aufbereitet und uns für viele Fragen zur Verfügung gestanden haben. Namentlich genannt seien hier Petra und Lothar Bach (Bach-Freilandforschung), Mona Strack und Markus Dietz (ITN), Marie-Luise Behrens (MEP Plan), Markus Cohrs und Niels Heesemann (GfN), das Büro FrInaT, Jens Trasberger (Büro für Faunistik & Freilandforschung), Sonja Schaper (ARSU) und Jan Stelzer (regionalplan und uvp), die uns Datensätze mit Turmerfassungen zur Verfügung stellen konnten.

Ein herzlicher Dank geht auch an das Projekt NatForWINSENT II und namentlich Frank Musiol für die stereooptischen 3D-Daten, die wir in unserer Analyse mit verwenden durften.

Wir danken Fabian Lorenz und Hannah Sylvester bei Enercon und Jochen Rößler bei Fleximaus für die gute Zusammenarbeit bei der Prüfung von Niederschlagssensoren.

Wir danken den Teilnehmer*innen des Fachkreises Lothar Bach, Petra Bach, Fabio Bontadina, Markus Dietz, Leo Grosche, Daniel Lewanzik, Stefan Kaminsky, Mirco Lauper, Bruntje Lüdtker, Johanna Hurst, Elena Krannich, Markus Melber, Ruth Petermann, Jasmin Proksch, Nina Ruhl, Wigbert Schorcht, Mona Strack und Christian Voigt sowie der projektbegleitenden Arbeitsgruppe Lothar Bach, Stefanie Bültner, Martin Fichtler, Markus Dietz, Sebastian Kolberg, Cosima Lindemann, Markus Melber, Ismene Mertens, Frank Musiol, Holger Ohlenburg, Christopher Paton, Ruth Petermann, Maria Rohr, Nina Ruhl, Wigbert Schorcht, Mona Strack und Dirk Sudhaus, die mit ihren Diskussionsbeiträgen und Nachfragen wertvolle Impulse für das Forschungsvorhaben gegeben haben.

Für die sehr wertvollen Rückmeldungen zu den Berichtsentwürfen danken wir Lothar und Petra Bach, Daniel Lewanzik, Nora Köcher, Julia Pöschel und Martin Schmidt.

Wir danken allen weiteren wissenschaftlichen Kolleginnen und Kollegen, die auf unsere Fragen geantwortet haben und uns für wertvolle Diskussionen zur Verfügung standen.

Literaturverzeichnis

- Bach, L., P. Bach und R. Kesel (2020). Akustisches Monitoring von Flughörnchen an Windenergieanlagen: Ist ein zweites Ultraschallmikrofon am Turm notwendig? Evidenzbasierter Fledermausschutz in Windkraftvorhaben, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg: 101-119.
- Baumbauer, L., M. Nagy, R. Simon und O. Behr (2018). Voraussetzungen für die Verwendung von Pro-Bat. Bestimmung des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen in der Planungspraxis - Endbericht des Forschungsvorhabens gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 0327638E). O. Behr, R. Brinkmann, K. Hochradelet al. Erlangen.
- Behr, O., K. Barré, F. Bontadina, R. Brinkmann, M. Dietz, T. Disca, J. S. Froidevaux, S. Ghanem, S. Huemer, J. Hurst, S. K. Kaminsky, V. Kelm, F. Korner-Nievergelt, M. Lauper, P. R. Lintott, C. M. Newman, T. S. Peterson, J. Proksch, C. Roemer, W. Schorcht und M. Nagy (2023). "Standardised and referenced acoustic monitoring reliably estimates bat fatalities at wind turbines: comments on 'Limitations of acoustic monitoring at wind turbines to evaluate fatality risk of bats'." *Mammal Review* 53(2): 65-71.
- Behr, O., R. Brinkmann, K. Hochradel, F. Korner-Nievergelt, J. Mages, A. Naucke, M. Nagy, I. Niermann, R. Simon und N. Weber (2015). Akustische Erfassung der Fledermausaktivität. Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. - Endbericht des Forschungsvorhabens gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Förderkennzeichen 0327638C+D). O. Behr, U. Adomeit, K. Hochradelet al.
- Behr, O., R. Brinkmann, I. Niermann und F. Korner-Nievergelt (2011a). Akustische Erfassung der Fledermausaktivität an Windenergieanlagen. Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. R. Brinkmann, O. Behr, I. Niermann and M. Reich. Göttingen, Cuvillier Verlag: Umwelt und Raum Bd. 4, 177-286.
- Behr, O., R. Brinkmann, I. Niermann und F. Korner-Nievergelt (2011b). Vorhersage der Fledermausaktivität an Windenergieanlagen. Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. R. Brinkmann, O. Behr, I. Niermann and M. Reich. Göttingen, Cuvillier Verlag: Umwelt und Raum Bd. 4, 287-322.
- Behr, O., R. Brinkmann, I. Niermann und J. Mages (2011c). Methoden akustischer Erfassung der Fledermausaktivität an Windenergieanlagen. Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. R. Brinkmann, O. Behr, I. Niermann and M. Reich. Göttingen, Cuvillier Verlag: Umwelt und Raum Bd. 4, 130-144.
- Behr, O., R. Simon und M. Nagy (2015). Leitfaden zur Durchführung einer akustischen Aktivitätserfassung an Windenergieanlagen und zur Berechnung fledermausfreundlicher Betriebsalgorithmen. Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. - Endbericht des Forschungsvorhabens gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Förderkennzeichen 0327638C+D). O. Behr, U. Adomeit, K. Hochradelet al.
- Dietz, M., A. Fritzsche, A. Johst und N. Ruhl (2024). "Fachempfehlung für eine bundesweite Signifikanzschwelle für Flughörnchen – Bewertung der derzeitigen Signifikanzschwelle für Flughörnchen und Windenergieanlagen. BfN-Schriften 682." 112.
- Gelman, A., X.-L. Meng und H. Stern (1996). "Posterior predictive assessment of model fitness via realized discrepancies." *Statistica sinica*: 733-760.
- Happ, C., K. Hochradel und A. Sutor (2024). "Comparison of two 3D calibration methods for thermal imaging cameras to track bat flight paths near wind turbines." *tm-Technisches Messen* 91(s1): 61-65.

- Hochradel, K., U. Adomeit, N. Heinze, M. Nagy, F. Stiller und O. Behr (2015). Wärmeoptische 3D-Erfassung von Fledermäusen im Rotorbereich von Windenergieanlagen. Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen (RENEBAT II). O. Behr, R. Brinkmann, F. Korner-Nievergelt et al. Hannover, Institut für Umweltplanung. Umwelt und Raum Bd. 7: 81-100.
- Hochradel, K., S. Hartmann, H. Reers, B. Luedtke, H. Schauer-Weissahn, K.-M. Thomsen, H. Hoetker und R. Brinkmann (2021). "Three-dimensional analysis of bat flight paths around small wind turbines suggests no major collision risk or behavioral changes." *Mammal Research*: 1-16.
- Hurst, J., M. Biedermann, C. Dietz, M. Dietz, I. Karst, E. Krannich, R. Petermann, W. Schorcht und R. Brinkmann (2016). Fledermäuse und Windkraft im Wald. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 153. Bonn-Bad Godesberg, Bundesamt für Naturschutz: 400.
- Korner-Nievergelt, F., B. Almasi, K. Hochradel, J. Mages, A. Naucke, M. Nagy, R. Simon, N. Weber und O. Behr (2018). Weiterentwicklung der statistischen Modelle zur Vorhersage des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an WEA aus akustischen Aktivitätsdaten. Bestimmung des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen in der Planungspraxis - Endbericht des Forschungsvorhabens gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 0327638E). O. Behr, R. Brinkmann, K. Hochradelet et al. Erlangen.
- Lindemann, C., V. Runkel, A. Kiefer, A. Lukas und M. Veith (2018). "Abschaltalgorithmen für Fledermäuse an Windenergieanlagen - Eine naturschutzfachliche Bewertung." *Naturschutz und Landschaftsplanung* 50(11): 418-425.
- Melber, M., U. Hermanns, C. C. Voigt, L. Bach, H. Geiger, C. Giese, L. Grosche, I. Kaipf, C. Lindemann, F. Meyer, V. Runkel und A. Seebens-Hoyer (2023). "Fledermausschutz an Windenergieanlagen." *NuL* 55: 30-37.
- Nagy, M., O. Behr, A. Schneider, F. Stiller und F. Korner-Nievergelt (2018). Der Effekt des Rotordurchmessers auf das Kollisionsrisiko von Fledermäusen an Windenergieanlagen. Bestimmung des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen in der Planungspraxis - Endbericht des Forschungsvorhabens gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 0327638E). O. Behr, R. Brinkmann, K. Hochradelet et al. Erlangen.
- RCoreTeam (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Roemer, C., Y. Bas, T. Disca und A. Coulon (2019). "Influence of landscape and time of year on bat-wind turbines collision risks." *Landscape Ecology* 34(12): 2869-2881.
- Roemer, C., T. Disca, A. Coulon und Y. Bas (2017). "Bat flight height monitored from wind masts predicts mortality risk at wind farms." *Biological Conservation* 215: 116-122.
- Ssymank, A., U. Hauke, C. Rückriem und E. Schröder (1998). "Das europäische Schutzgebietssystem Natura2000. BfN-Handbuch zur Umsetzung der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie und der Vogelschutz-Richtlinie." *Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz* 53: 560.
- Weber, N., M. Nagy, K. Hochradel, J. Mages, A. Schneider, O. Behr und R. Simon (2018). Akustische Erfassung der Fledermausaktivität an Windenergieanlagen. Bestimmung des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen in der Planungspraxis - Endbericht des Forschungsvorhabens gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 0327638E). O. Behr, R. Brinkmann, K. Hochradelet et al. Erlangen.
- Wellig, S. D., S. Nusslé, D. Miltner, O. Kohle, O. Glazot, V. Braunisch, M. K. Obrist und R. Arlettaz (2018). "Mitigating the negative impacts of tall wind turbines on bats: Vertical activity profiles and relationships to wind speed." *PloS one* 13(3): e0192493.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Räumliche Verteilung der WEA im Datensatz.....	15
Abb. 2:	Anzahl der Mikrofon-Nächte und Höhe der Erfassungspunkte für aus Erfassungen (1) nur mit Gondelmikrofonen („nur Gondel“) und (2) mit Gondel- und Turmmikrofon(en).....	15
Abb. 3:	Anzahl der Mikrofon-Nächte und Höhe des Erfassungspunktes je naturräumlicher Region.	16
Abb. 4:	Anlagengröße der beprobten WEA.....	16
Abb. 5:	Installation der vier Mikrofone in unterschiedlichen Höhen an einer E115 des Herstellers Enercon in Süddeutschland.....	18
Abb. 6:	Installation der Turmmikrofone an einer N133 des Herstellers Nordex in Nordostdeutschland.....	19
Abb. 7:	Gültige Erfassungszeiträume der wärmeoptischen 3D-Erfassung im Projekt NatForWINSENT II, die uns für unsere Auswertung zur Verfügung gestellt wurden.	25
Abb. 8:	Bestimmung der Fledermausaktivität in Abhängigkeit vom horizontalen Abstand zur WEA.....	26
Abb. 9:	Beispielbild einer mit wärmeoptischer 3D-Erfassung aufgezeichneten Flugbahn.	27
Abb. 10:	Erfassung in NatForWINSENT II: Sichtfeld der beiden Kameras im Stereosetup	28
Abb. 11:	Anteil der Aktivität (y-Achse) der Artengruppe Nyctaloid (tieffrequent rufende Arten; an vielen Standorten mit hohem Anteil des Großen Abendseglers, <i>N. noctula</i> .) (A) und des Großen Abendseglers, <i>N. noctula</i> , (B) an WEA in unterschiedlichen Höhen über dem Boden.....	33
Abb. 12:	Anteil der Aktivität (y-Achse) der Artengruppe Pipistrelloid (hochfrequent rufende Arten; an vielen Standorten mit hohem Anteil der Zwergfledermaus, <i>P. pipistrellus</i>) (A) und der Zwergfledermaus, <i>P. pipistrellus</i> (B) an WEA in unterschiedlichen Höhen über dem Boden.....	34
Abb. 13:	Anteil der Aktivität der Rauhautfledermaus, <i>P. nathusii</i> , (y-Achse) an WEA in unterschiedlichen Höhen über dem Boden (x-Achse) im oberen Teil der Abbildung. Im unteren Teil der Abbildung ist die Zahl der beprobten WEA-Monate (y-Achse) pro Höhenklasse (x-Achse) und Region (Panele) gezeigt.....	35
Abb. 14:	Statistisches Modell (GLMM – siehe Abschnitt 3.6.1) zur Vorhersage der akustischen Aktivität aus der Höhe des Mikrofons und weiteren Einflussvariablen.....	37
Abb. 15:	Effekt der Mikrofonhöhe über dem Boden (in m: x-Achse der linken Abbildung) und der Windgeschwindigkeit an der Gondel (in m/s: x-Achse der rechten Abbildung) auf die akustische Aktivität.....	38

Abb. 16:	Effekt des verwendeten Fledermausdetektors (x-Achse der linken Abbildung) und der naturräumlichen Region (x-Achse der rechten Abbildung) auf die akustische Aktivität.....	39
Abb. 17:	Effekt des Monats (x-Achse der linken Abbildung für April bis November) und der Erfassung mit einem Gondel- oder Turmmikrofon (x-Achse der rechten Abbildung) auf die akustische Aktivität	40
Abb. 18:	Effekt des Monats (x-Achsen) auf die Fledermausaktivität (y-Achsen: Aufnahmen pro Stunde gemittelt für Nächte) in Abhängigkeit von der Mikrofonhöhe über dem Boden.....	41
Abb. 19:	Effekt der an der Gondel gemessenen Windgeschwindigkeit (x-Achsen) auf die Fledermausaktivität (y-Achsen: Aufnahmen pro Nacht) in Abhängigkeit von der naturräumlichen Region	43
Abb. 20:	Effekt der Mikrofonhöhe über dem Boden (in m auf der x-Achse) auf die Fledermausaktivität (y-Achsen: Aufnahmen pro Nacht) in Abhängigkeit von der naturräumlichen Region	45
Abb. 21:	3D Darstellung aller Fledermausdetektionen aus den eigenen Erfassungen im vorliegenden Projekt in Einzelbildern	46
Abb. 22:	Anzahl akustischer Aufnahmen aller Fledermausarten insgesamt pro Mikrofon im Zeitraum der wärmeoptischen Erfassung	47
Abb. 23:	Anzahl akustischer Aufnahmen je Art(gruppe) pro Mikrofon im Zeitraum der wärmeoptischen Erfassung.....	47
Abb. 24:	Fledermausdetektionen im Umfeld der WEA	48
Abb. 25:	Anzahl der optischen Fledermausdetektionen pro m ³ aus den Erfassungen in NatForWINSENT II in Abhängigkeit von der Distanz zu den Kameras.....	49
Abb. 26:	Aktivitätsdichte in Abhängigkeit vom Abstand zum Zentrum des WEA-Turms.....	50
Abb. 27:	Verteilung der Fledermausaktivität am Beispiel einer WEA mit Nabenhöhe 93 m und Rotorradius 35,5 m (RENEBAT Referenz-WEA).....	51
Abb. 28:	Anpassung der Funktion zur Beschreibung der vertikalen Höhenverteilung von Fledermäusen bei zwei unterschiedlichen Szenarien (nur Gondelmikrofon oder Gondel- und Turmmikrofon).	52
Abb. 29:	Vergleich des Effektes unterschiedlicher Anlagengrößen (Nabenhöhe und Rotor) auf die Aktivität im Rotorbereich bei gleicher räumlicher Gesamtverteilung der Fledermausaktivität.	53
Abb. 30:	Korrekturfaktor (y-Achse) für die aus der akustischen Aktivität berechnete Schlagopferzahl in Abhängigkeit vom Rotorradius (x-Achse) und der Nabenhöhe	54
Abb. 31:	Korrekturfaktor (y-Achse) für die aus der akustischen Aktivität berechnete Schlagopferzahl in Abhängigkeit von der Nabenhöhe (x-Achse) und dem Rotorradius.....	55
Abb. 32:	Mittlere Aktivität von Fledermäusen an WEA (y-Achse, logarithmisch) in unterschiedlichen Höhen über dem Boden (x-Achse).	56

Abb. 33:	Höhe der Fledermausaktivität (y-Achse logarithmisch: Aktivitätsdichte) in Abhängigkeit von der Höhe über dem Boden (x-Achse in m) für alle WEA-Jahre mit Gondel- und Turmerfassung.....	57
Abb. 34:	Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm: Histogramm und Boxplot für das Verhältnis der Schlagopferzahl für dasselbe WEA-Jahr bei einer Berechnung mit Daten des Gondel- und des Turmmikrofons (2) geteilt durch eine Berechnung nur mit den Daten des Gondelmikrofons (1).....	59
Abb. 35:	Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm: Histogramm und Boxplot für das Verhältnis der Schlagopferzahl berechnet für dasselbe WEA-Jahr mit Daten des Gondel- und des Turmmikrofons (2) geteilt durch eine Berechnung nur mit den Daten des Gondelmikrofons (1) (x-Achse) – Darstellung wie in Abb. 34, jedoch getrennt für Nord und Süd.....	60
Abb. 36:	Schematischer Aufbau des Tests verschiedener Niederschlagssensoren.	63
Abb. 37:	Name, Hersteller, Messprinzip und technische Schnittstelle der in Kooperation mit Enercon getesteten Sensoren.....	64
Abb. 38:	Fledermausaktivität in Abhängigkeit von der mit dem Thies Laser-Niederschlags-Monitor gemessenen Niederschlagsintensität in verschiedenen Höhen über dem Boden an einer WEA in der Region NW (Nordwestdeutsches Tiefland).	65
Abb. 39:	Fledermausaktivität in Abhängigkeit von der mit dem einfachen Thies Niederschlagssensor gemessenen Niederschlagsintensität in verschiedenen Höhen über dem Boden an einer der Region SW (Südwestdeutsche Mittelgebirge) zugeordneten WEA.....	66
Abb. 40:	Empfehlungen, die wir aus dem Nutzen eines zusätzlichen Mikrofons am Turm einer WEA im Vergleich zum Nutzen, der sich aus der Beprobung einer zusätzlichen WEA an der Gondel ergibt, schlussfolgern.....	75

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Anzahl erfasster WEA-Jahre aus verschiedenen Datensätzen.....	13
Tab. 2:	Anzahl der Messnächte pro Detektortyp und Naturraum.....	14
Tab. 3:	Die deutschen und wissenschaftlichen Bezeichnungen der hauptsächlich relevanten Arten und Artengruppen bei der Erfassung im Gondelbereich von WEA in Mitteleuropa.....	23
Tab. 4:	Zeiträume der wärmeoptischen 3D Erfassung.....	24
Tab. 5:	Größe des Vorhersagefehlers bei der Schlagopferschätzung aus einer Berechnung (1) nur mit Daten des Gondelmikrofons (ohne Turmmikrofon) und des Vorhersagefehlers bei der Übertragung der Ergebnisse von beprobten auf nicht beprobte WEA innerhalb desselben Windpark-Jahres.....	62

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
Abb.	Abbildung
BMU Settings	Settings in der Software Avisoft Recorder, die den Setzungen der RE-NEBAT Projekte und damit in der Software ProBat entsprechen (benannt nach dem das Projekt fördernden Ministerium)
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BfN	Bundesamt für Naturschutz
CNN	Convolutional Neuronal Network; deutsch: faltendes neuronales Netzwerk (künstliches neuronales Netz)
CEST	Central European Summer Time; deutsch: Mitteleuropäische Sommerzeit
F + E -Vorhaben	Forschungs- und Entwicklungsvorhaben
FKZ	Forschungskennzeichen
GAM	Generalisiertes additives Modell
GLMM	Generalisiertes lineares gemischtes Modell
KU	Küste; Naturraum
MLRT	Maximum-Likelihood-Ratio-Test
NatFor-WINSENT-II	Naturschutzforschung im onshore Windenergie-Testfeld WINSENT, Forschungsvorhaben
n	Stichprobenumfang
NO	Nordostdeutsches Tiefland; Naturraum
NW	Nordwestdeutsches Tiefland; Naturraum
OM	Östliches Mittelgebirge; Naturraum
RENEBAT I-III	Forschungsvorhaben mit dem Ziel, die Erfassung, Analyse und Reduktion des Schlagrisikos von Fledermäusen an WEA zu vereinfachen und zu standardisieren
SW	Südwestdeutsches Mittelgebirge; Naturraum
Tab.	Tabelle
UTC	Coordinated Universal Time; deutsch: koordinierte Weltzeit

Abkürzung	Erklärung
WEA	Windenergieanlage
WM	Westliches Mittelgebirge; Naturraum

A Anhang

A.1 Berechnung der Aktivitätsverteilung von Fledermäusen im Rotorbereich

Wir verwenden ein Modell der Aktivitätsdichte von Fledermäusen im Luftraum um WEA, um das aus der gemessenen akustischen Aktivität berechnete Schlagrisiko für verschiedene Anlagengrößen (Nabenhöhe und Rotordurchmesser) zu korrigieren. Die Aktivitätsdichte ergibt sich aus den gemessenen vertikalen (Abschnitt 4.2: 1,9 % exponentielle Abnahme der Aktivität bei Erhöhung um 1 m) und horizontalen (Abschnitt 4.3: exponentielle Abnahme der Attraktionswirkung der WEA um 2,2 % pro zusätzlichem Meter Distanz vom Turm) Aktivitätsgradienten (Abb. 27). Beide Gradienten werden bei einer Berechnung (1) nur mit den Daten des Gondelmikrophones an das jeweils an einer WEA gemessene Aktivitätsniveau angepasst (Parallelverschiebung der Kurven nach oben oder unten), wobei die Steigung der Gradienten²⁷ gleichbleibt. Liegen (2) auch Turmdata vor, so kann aus den zwei Erfassungspunkten zusätzlich der relative Höheneffekt (Steigung des vertikalen Aktivitätsgradienten in der log-Skala) für die jeweilige WEA angepasst werden.

Um das Schlagrisiko für die Größe einer WEA zu korrigieren, wird die Funktion der Aktivitätsdichte über die vom Rotor überstrichene Fläche integriert²⁸. Das Ergebnis des Integrals ermöglicht es, das Schlagrisiko für WEA verschiedener Größe in derselben räumlichen Verteilung der Fledermausaktivität zu vergleichen (Abb. 29).

A.1.1 Aktivitätsdichte

Die Aktivitäts-Dichte $\rho(x, z)$ bildet also die Grundlage zur Berechnung der Gesamtaktivität im gesamten Rotorbereich, für deren Berechnung über das gesamte Rotorvolumen gewichtet mit der Dichte-Funktion integriert wird. Da eine WEA näherungsweise ein rotationssymmetrisches Objekt darstellt (um die Mittelachse des Turms) kann das Problem zweidimensional behandelt werden. Die einfachste Darstellung des Problems ergibt sich durch ein „reduziertes“ zylindrisches Koordinatensystem, das wir wie folgt definieren:

x : Horizontale Distanz zum Turm

z : Höhe über dem Boden

R : Rotorradius der WEA

H : Nabenhöhe der WEA

Grundsätzlich wird für die Aktivitäts-Dichte $\rho(x, z)$ eine Fallunterteilung vorgenommen:

- für das Volumen unterhalb der Nabe der WEA, bestimmt durch $\rho_{lower}(x, z)$ für $z \leq H$
- und für das Volumen oberhalb der Nabe der WEA, bestimmt durch $\rho_{upper}(z)$ für $z > H$

²⁷ Die Steigung für den horizontalen Gradienten in der linearen Skala und für den vertikalen in der logarithmischen Skala.

²⁸ Zur Vereinfachung der Formel wurde auf eine kreisförmige Rotorfläche verzichtet und stattdessen durch eine quadratische Fläche genähert.

Mathematisch ergibt sich daraus:

$$\rho(x, z) = \rho_{lower}(x, z) \text{ für } z \leq H$$

$$\rho(x, z) = \rho_{upper}(z) \text{ für } z > H$$

Die Aktivitäts-Dichte für das Volumen unterhalb der Nabe $\rho_{lower}(x, z)$ ist bestimmt durch drei Faktoren:

- Die Grundaktivitätsdichte ρ_{base}
- Das Attraktionspotential des Turmes γ_{tower} und den exponentiellen Abfall mit der Distanz zum Turm bestimmt durch x_0
- Den exponentiellen Abfall mit der Höhe bestimmt durch z_0

Daraus ergibt sich mathematisch:

$$\rho_{lower}(x, z) = \rho_{base} \left[1 + \gamma_{tower} * \exp\left(-\frac{x}{x_0}\right) \right] * \exp\left(-\frac{z}{z_0}\right)$$

Die Aktivitäts-Dichte für das Volumen oberhalb der Nabe $\rho_{upper}(z)$ ist nur durch zwei Faktoren bestimmt, da das Attraktionspotential des Turmes nur unterhalb der Nabe wirkt:

- Die Grundaktivitätsdichte ρ_{base}
- Den exponentiellen Abfall mit der Höhe bestimmt durch z_0

Weshalb sich mathematisch ergibt:

$$\rho_{upper}(z) = \rho_{base} * \exp\left(-\frac{z}{z_0}\right)$$

Der Wert des Parameters z_0 des Höhenanteils der Aktivitäts-Dichte wurden im Modell der vertikalen Aktivitätsverteilung bestimmt (Abschnitt 4.2). Die Werte der Parameter für den radialen Anteil ρ_{base} , γ_{tower} und x_0 wurden aus den wärmeoptischen 3D Daten ermittelt (Abschnitt 4.3):

A.1.2 Integration der Aktivitätsdichte über den Rotorbereich

Die Gesamt-Aktivität parametrisiert nach dem Rotorradius R und der Nabenhöhe H ergibt sich als das Volumen-Integral über den gesamten Rotor-Bereich gewichtet mit der Aktivitäts-Dichte $\rho(x, z)$.

Zur Vereinfachung wurde vorerst ein quadratisches Rotorvolumen gewählt, um komplizierte Abhängigkeiten zwischen den Zylinderkoordinaten x und z innerhalb der Integralgrenzen zu vermeiden. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass, da sich die Aktivitäts-Dichte $\rho(x, z)$ in zwei Bereiche unterteilt, auch das Volumen-Integral in zwei Bereiche unterteilt wird.

Es ergibt sich für die Gesamt-Aktivität $A(R, H; \rho_{base}, \gamma_{tower}, x_0, z_0)$ folgende Formel:

$$\begin{aligned}
 A(R, H; \rho_{base}, \gamma_{tower}, x_0, z_0) &= \int_0^R dx \int_{H-R}^H dz \rho_{lower}(x, z) + \int_0^R dx \int_H^{H+R} dz \rho_{upper}(z) \\
 &= \rho_{base} \int_0^R dx \left[1 + \gamma_{tower} \exp\left(-\frac{x}{x_0}\right) \right] \int_{H-R}^H dz \exp\left(-\frac{z}{z_0}\right) \\
 &\quad + \rho_{base} \int_0^R dx \int_H^{H+R} dz \exp\left(-\frac{z}{z_0}\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Rightarrow A(R, H; \rho_{base}, \gamma_{tower}, x_0, z_0) &= \rho_{base} z_0 \exp\left(-\frac{H}{z_0}\right) \left\{ \left[R + x_0 \gamma_{tower} \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{x_0}\right) \right) \right] \left[\exp\left(\frac{R}{z_0}\right) - 1 \right] \right. \\
 &\quad \left. + R \left[1 - \exp\left(-\frac{R}{z_0}\right) \right] \right\}
 \end{aligned}$$

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

DOI 10.19217/skr741