

NatForWINSENT-II: Umsetzung der Naturschutzforschung am Windtestfeld an Land

**Phase 2: Untersuchungen an und mit
Forschungs-Windenergieanlagen**

Frank Musiol, Janine Aschwanden, Tim Aulehla,
Johanna Grimm, Christof Happ, Barbara Helm,
Bruntje Lüttke, Sarah Radford, Hendrik Reers,
Horst Schauer-Weisshahn und Alexander Sutor

BfN-Schriften

765

2026





NatForWINSENT-II: Umsetzung der Naturschutzforschung am Windtestfeld an Land

Phase 2: Untersuchungen an und mit Forschungs-Windenergieanlagen

Frank Musiol

Janine Aschwanden

Tim Aulehla

Johanna Grimm

Christof Happ

Barbara Helm

Bruntje Lüdtko

Sarah Radford

Hendrik Reers

Horst Schauer-Weisshahn

Alexander Sutor

Impressum

Titelbild: Luftbild des Windenergiefelds WINSENT (ZSW/David Arzt)

Adressen der Autorinnen und der Autoren:

Frank Musiol Tim Aulehla	Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) Meitnerstraße 1, 70563 Stuttgart E-Mail: frank.musiol@zsw-bw.de
Janine Aschwanden Barbara Helm	Schweizerische Vogelwarte Seerose 1, CH-6204 Sempach E-Mail: janine.aschwanden@vogelwarte.ch
Johanna Grimm Sarah Radford Hendrik Reers	OekoFor GbR Kunzenweg 24, 79117 Freiburg E-Mail: reers@oekofo.de
Christof Happ Alexander Sutor	Institut für Mess- und Sensortechnik, UMIT Eduard Wallnöfer-Zentrum 1, A-6060 Hall i. Tirol E-Mail: christof.happ@umit.at
Bruntje Lüdtke Horst Schauer-Weissshahn	Freiburger Institut für angewandte Tierökologie GmbH Dunantstraße 9, 79110 Freiburg E-Mail: luedtke@frinat.de

Fachbetreuung im BfN:

Jens Ponitka Fachgebiet II 4.3 „Naturschutz und erneuerbare Energien“

Förderhinweis:

Gefördert durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN) mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUKN) (FKZ: 3523 15 1900).

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

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

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

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



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

ISBN 978-3-89624-529-8

DOI 10.19217/skr765

Bonn 2026

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	6
Abstract	14
Einleitung	21
1 Vögel	24
1.1 Ausgangslage.....	24
1.1.1 Überblick Vögel Phase 2.....	24
1.1.2 Datengrundlage und Ziel für Phase 2.....	24
1.1.3 Betriebsdaten FWEA Phase 2.....	25
1.1.4 Meteodaten Phase 2	25
1.2 Generelle Flugaktivität (Radar)	26
1.2.1 Ziele und Fragestellung	26
1.2.2 Radardaten und Verschneidung mit Betriebsdaten der FWEA	26
1.2.3 Radardaten Vogelzug und Ergebnisse.....	27
1.2.4 Radardaten Insekten und Ergebnisse	44
1.2.5 Radardaten Fledermäuse und Ergebnisse	54
1.2.6 Diskussion Radardaten und Einfluss der FWEA	62
1.2.7 Ausblick Radaruntersuchung Phase 2.2	63
1.3 Individuelle Flugbewegungen (GPS und LRF).....	63
1.3.1 Ziele und Fragestellungen	63
1.3.2 Individuelle Flugbewegungen und Datengrundlage.....	63
1.3.3 Parameter des Flugverhaltens und Verschneidung.....	64
1.3.4 Statistische Analyse Flugverhalten Rotmilane	65
1.3.5 Ergebnisse individuelle Flugbewegungen	66
1.3.6 Diskussion individuelle Flugbewegungen	71
1.3.7 Ausblick individuelle Flugbewegungen Phase 2.2	72
1.4 Test Detektionssysteme	72
2 Fledermäuse	74
2.1 Akustische Erfassung von Fledermäusen (AP 3.1)	75
2.1.1 Methodische Grundlagen	75
2.1.2 Überblick über die Fledermaus-Erfassungen der Phase 2.1 an den Messmasten und FWEA	79
2.1.3 Überblick über die Fledermaus-Erfassungen der Phase 2.1 im Umfeld	100
2.2 Auswertung und Korrelation von Witterungs-, Umwelt- und Betriebsparametern	

	mit der Fledermausaktivität (AP 3.2)	107
2.2.1	Meteorologische Zusammenhänge	107
2.2.2	Einfluss der FWEA auf die Fledermausaktivität (Vorher-Nachher-Untersuchung)	115
2.3	Experimentelle Untersuchungen	122
2.3.1	Aktive Veränderung des Betriebsmodus und Trudelmodus.....	123
2.3.2	Überprüfung von Systemen zur Schlagopferdetektion	123
2.3.3	Entwicklung von Ansätzen zur Abschaltung nach Echtzeitdaten	123
3	Wärmebild	125
3.1	Stereo-Wärmebilderfassung von Fledermäusen (AP 4.1)	125
3.1.1	Erfassungsjahr 2023	126
3.1.2	Erfassungsjahr 2024	126
3.2	Wärmebild-Schlagopfererfassung (AP 4.2).....	145
3.2.1	Abwurftests	148
3.2.2	Detektionen seit Einbau im Juli 2023 bis Mai 2025	149
3.2.3	Falsch positive Detektionen	149
4	Insekten	152
4.1	Einleitung.....	152
4.2	Methode.....	152
4.2.1	Konzept	152
4.2.2	Insektenfotofalle	153
4.2.3	Automatisierte Auswertung.....	164
4.2.4	Deskriptive und Statistische Analyse Insektenabundanz & Fledermausaktivität... ..	171
4.2.5	Radar-Daten	174
4.2.6	DNA-Barcoding.....	174
4.3	Ergebnisse	175
4.3.1	Erfassungsjahr 2023	175
4.3.2	Erfassungsjahr 2024	178
4.3.3	Statistische Modellierung der Einflussparameter.....	189
4.3.4	Radar-Daten	202
4.3.5	DNA-Barcoding.....	203
4.4	Diskussion.....	205
4.4.1	Insektenfotofalle	205
4.4.2	Insektenabundanz	206
4.4.3	Insektenabundanz und Fledermausaktivität	207

4.4.4	Fazit	209
	Literaturverzeichnis	210
	Abbildungsverzeichnis	214
	Tabellenverzeichnis	222
	Abkürzungsverzeichnis.....	224

Zusammenfassung

Arbeitspaket Vögel

Im Rahmen von Phase 2 wird mit Präsenz der Forschungswindenergieanlagen (FWEA) die Erhebung der Basisdaten zur generellen Flugaktivität mittels Radar (hauptsächlich der Vögel, aber auch Insekten und Fledermäuse) und zu individuellen Flugbewegungen des Rotmilans mittels Laser-Range-Finder (LRF) und Telemetrie (GPS) wiederholt. Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse des ersten Teils von Phase 2. In dieser Zeit befanden sich die FWEA rund eineinhalb Jahre im Trudelmodus und ein halbes Jahr teilweise in Betrieb. Die Registrierung der präzisen Drehgeschwindigkeit der Rotoren war im Verlauf der Phase technisch noch nicht möglich. Für den Trudelmodus gehen wir davon aus, dass die Geschwindigkeit bei weniger als 4 rpm lag (= 37,7 km/h). In Betrieb drehten die Rotoren der FWEA maximal mit 37,7 km/h, mit 122.5 km/h oder 250 km/h.

Das Ziel der Analysen der Radardaten im Rahmen von Phase 2 war es, explorativ zu prüfen, ob es Hinweise gibt, dass die mittels Radar gemessene Flugaktivität fliegender Tiere von der Präsenz und/oder der Drehung der Rotoren der FWEA beeinflusst wird. Die Ergebnisse sind lediglich als Hinweise auf mögliche Effekte zu betrachten. Eine Verdichtung der Datengrundlage ist unumgänglich, bevor eine tiefgründige Analyse und Interpretation der Daten vorgenommen werden kann. Insbesondere ist auch ein Einbezug der meteorologischen Parameter notwendig.

Betreffend Vogelzug gibt es Hinweise, dass vor allem tagsüber die mittlere Flugaktivität des Flugtyps „Singvogel“ von der Präsenz und der Drehung der Rotoren der FWEA beeinflusst wird. Auch die Zugrichtung am Tag und die nächtliche Artenzusammensetzung innerhalb des Flugtyps „Singvogel“ scheint von der Präsenz der FWEA und den drehenden FWEA beeinflusst zu werden. So war die Flugaktivität der tagziehenden Singvogel-Flugtypen im Vergleich zu Phase 1 (ohne FWEA) tiefer, wenn die FWEA im Trudelmodus präsent waren (Frühling und Herbst) und wenn die FWEA gedreht haben (bis jetzt nur eine Herbstsaison). Weiter zogen die tagziehenden Singvogel-Flugtypen im Vergleich mit Phase 1 im Herbst tagsüber südlicher, wenn die FWEA gedreht haben und die Häufigkeit der Vogelarten mit einer Flügelschlagfrequenz von ca. 10 Hz war in der Nacht im Vergleich zu Phase 1 tiefer. Die Effekte erwecken den Verdacht, dass die Singvogel-Flugtypen das Testfeld vor allem tagsüber umfliegen. Die Höhenverteilungen zeigen, dass die Vögel tagsüber generell tiefer ziehen als in der Nacht. Daher könnte sich die Präsenz und Drehung der FWEA auf tagziehende Kleinvögel stärker auswirken als auf den Nachtzug.

Bei den Insekten basieren alle Vergleichsdaten von Phase 2 lediglich auf einem Jahr, da ein Jahr von der Analyse ausgeschlossen werden musste. Darum kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Hinweise auf Effekte lediglich auf einem Jahreseffekt beruhen und nichts mit den FWEA zu tun haben. So waren im Vergleich mit Phase 1 mit den FWEA im Trudelmodus wie auch mit drehenden FWEA teilweise im Mittel deutlich mehr Insekten pro km und h unterwegs, insbesondere in der Nacht. Zudem waren im Herbst die Flugrichtungen der Insekten mit drehenden FWEA stärker westlich ausgerichtet als ohne FWEA oder mit den FWEA im Trudelmodus. Eine Verdichtung der Datengrundlage ist unumgänglich, bevor eine tiefgründige Analyse und Interpretation der Daten vorgenommen werden kann.

Bei den Fledermäusen gibt es ebenfalls Hinweise, dass die FWEA einen Einfluss haben könnten. Mit den FWEA im Trudelmodus wie auch mit drehenden FWEA war die mittlere

Flugaktivität der Fledermäuse über alle Höhenintervalle betrachtet etwas tiefer als in Phase 1 (ohne FWEA). Darüber hinaus ist anhand der Höhenverteilungen ersichtlich, dass sich die Flugaktivität mit den FWEA im Trudelmodus im Vergleich mit Phase 1 (ohne FWEA) weiter nach unten zu verschieben scheint. Mit den FWEA im Trudelmodus trat die höchste Flugaktivität in tiefer liegenden Höhenintervallen auf als in Phase 1 (ohne FWEA). Für eine Beurteilung des Musters der Höhenverteilung mit drehenden FWEA ist die Datengrundlage noch zu klein. Die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 3 und 5 zeigen, dass zwischen der Flugaktivität der Fledermäuse und der Insektenaktivität ein positiver Zusammenhang besteht. Möglicherweise hat sich mit der Präsenz der FWEA die räumliche Verteilung der Insekten verschoben, was eine Verschiebung der räumlichen Verteilung der Fledermausaktivität bewirkt haben könnte.

Zum Flugverhalten der Rotmilane lag im Fokus von Phase 2 die Fragestellung, ob es Hinweise darauf gibt, dass die Flughöhe, die Fluggeschwindigkeit und die minimale radiale Annäherungsdistanz gegenüber den Standorten der FWEA von der Präsenz und/oder der Drehung der Rotoren der FWEA beeinflusst wird, und ob sich die Windverhältnisse auf das Flugverhalten der Rotmilane bezüglich der FWEA auswirken. Generell lässt sich sagen, dass sich zum Einfluss der Drehung der Rotoren der FWEA noch keine Aussagen treffen lassen, da die Datengrundlage momentan noch zu gering ist. Gering ist die Datengrundlage oft auch bei höheren Windgeschwindigkeiten und größeren Standardabweichungen des Windes (Böigkeit).

Mit Präsenz der FWEA im Trudelmodus waren sowohl die Flughöhe wie auch die minimale radiale Annäherungsdistanz im Vergleich zu Phase 1 (ohne FWEA) grösser. Zudem wirkte sich die Windgeschwindigkeit und die Standardabweichung der Windgeschwindigkeit (Böigkeit) auf die minimale radiale Annäherungsdistanz im Vergleich zur Phase 1 (ohne FWEA) anders aus. Während für Phase 1 (ohne FWEA) erwartungsgemäß kaum Effekte auftraten, nahm die minimale radiale Annäherungsdistanz mit zunehmender Windgeschwindigkeit tendenziell zu und mit zunehmender Standardabweichung der Windgeschwindigkeit (Böigkeit) ab.

In einem Review zur Thematik von Vogelkollisionen an WEA wird im Zusammenhang mit starkem Wind der negative Einfluss auf die Kontrolle der Flugmanövrierfähigkeit der Vögel erwähnt. Es ist plausibel anzunehmen, dass auch die Böigkeit des Windes die Kontrolle der Manövrierfähigkeit reduziert. Möglicherweise halten die Rotmilane bei starkem Wind zu den FWEA im Trudelmodus mehr Abstand, damit sie vom Wind nicht zu nahe an die FWEA herangetragen werden. Mit böigem Wind dürfte die Kontrolle der Distanz zu den FWEA schwieriger sein als bei ruhigem Wind, so dass sie mit böigem Wind näher an die im Trudelmodus befindlichen FWEA herangetragen werden als bei ruhigem Wind.

Im Verlauf von Phase 2 sind gemäß den Kriterien des Kompetenzzentrums für Naturschutz und Energiewende (KNE) zwei automatische Vogeldetektionssysteme getestet worden. Im ersten Test wurde der vom ZSW entwickelte BirdRecorder und im zweiten Test das von Bio-seco entwickelt BPS Long-Range System untersucht. Die Ergebnisse der Tests liegen in separaten Berichten vor.

Arbeitspaket Fledermäuse

Ziel der fledermausbasierten Naturschutzbegleitforschung ist es unter anderem, zu einem besseren Verständnis über das Fledermausvorkommen und -verhalten an WEA zu gelangen. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Erhebungen sollen die Prognosesicherheit der Fledermausaktivität und damit die bestehenden Vermeidungsmaßnahmen verbessern. Entscheidend für eine Optimierung von Vermeidungsmaßnahmen ist eine solide Datenbasis, die die Fledermausaktivität umfassend, dauerhaft und in verschiedenen Höhen erfasst. Hierzu eignen

sich insbesondere erprobte akustische Verfahren, welche zusätzlich eine Art-/Artgruppenbestimmung der aufgenommenen Fledermäuse erlauben. Um den Einfluss von WEA auf das Verhalten und die Aktivität von Fledermäusen beurteilen zu können, sind allerdings nicht nur akustische Daten von den WEA selbst nötig, sondern auch Kenntnisse über Verhaltens- und Aktivitätsmuster der Fledermäuse in einem weitgehend unbeeinflussten Umfeld. Ermöglicht wird dies am Testfeld über stratifizierte akustische Dauererfassungen an den Messmasten und in deren Umgebung.

Im Forschungsprojekt fanden zwischen 2018 und 2022 Vorher-Untersuchungen (Phase 1 des Projekts) in dem in Planung befindlichen Windenergie-testfeld statt. Dazu wurden Daten an den bereits errichteten Windmessmasten und in der näheren Umgebung des Testfelds erhoben. In dieser Zeit befanden sich noch keine WEA auf dem Testfeld, sodass die gewonnenen Daten einen weitgehend unbeeinflussten Zustand widerspiegeln. Die Errichtung der Forschungs-WEA (FWEA) erfolgte im Verlauf des Jahres 2023 und somit startete Phase 2 des Projekts. Der reguläre Betrieb der zwei Anlagen startete im Sommer 2024. Die aus dem Jahr 2023 gewonnenen Daten beinhalten somit das möglicherweise veränderte Verhalten der Fledermäuse gegenüber den neuen WEA-Strukturen im Testfeld, je nach Windverhältnissen mit trudelnden Rotoren, ab Sommer 2024 auch im offiziellen Betrieb. Im Erfassungsjahr 2024 wurden erstmalig alle sechs Strukturen (vier Messmasten und zwei FWEA) und das Umfeld zeitgleich beprobt.

In den statistischen Modellen zur Interpretation der festgestellten Fledermausaktivität sind alle akustischen Daten von 2019 bis 2024 (Messmasten und FWEA) respektive 2023 (Umfelderfassung) enthalten. Obwohl die Rohdaten Fledermausrufe aus neun Arten bzw. Artengruppen enthalten (Zwergfledermaus, Mückenfledermaus, Rauhautfledermaus, Abendsegler, Mopsfledermaus, Gattung *Myotis*, Gattung *Plecotus*, Artengruppe Nyctaloid, Artengruppe Pipistrelloid), wurde die Modellierung aufgrund der Datenlage nur für die Zwergfledermaus, die Rauhautfledermaus und die Nyctaloid-Gruppe durchgeführt. Bezüglich der meteorologischen Einflussparameter Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit konnten für die untersuchten Arten/Artengruppen die geläufigen Zusammenhänge nachgewiesen werden: mit steigenden Temperaturen steigt die Nachweiswahrscheinlichkeit, wohingegen höhere Niederschlagsmengen generell für eine geringere Nachweiswahrscheinlichkeit der untersuchten Fledermäuse sorgen. Auf steigende Windgeschwindigkeiten reagieren die untersuchten Arten/Artengruppen zwar generell mit einer Abnahme der Aktivität, wobei jedoch artspezifische Unterschiede bestehen, die sich durch die Integration der Windunterstützung in das Modell differenzierter betrachten lassen. Bei der Windunterstützung handelt es sich um eine Darstellungsvariante der Windrichtung, die vor allem für die ziehenden Arten die besondere Ökologie der Fledermäuse berücksichtigt. Dabei wurde die SSW-Windkomponente für die erste Jahreshälfte als volle Windunterstützung, d.h. als Rückenwind definiert, in der zweiten Jahreshälfte die NNE-Windkomponente. Für die migrierende Rauhautfledermaus und die Artengruppe Nyctaloid, die ebenfalls Fledermausarten mit ausgeprägtem Zugverhalten beinhalten (Abendsegler, Kleinabendsegler), zeigen die Modelle eine erhöhte Nachweiswahrscheinlichkeit für höhere Windgeschwindigkeiten bei Bedingungen mit Rückenwind. Diese Beobachtungen lassen sich mit dem Zugverhalten der Rauhautfledermaus und des Abendseglers sowie des Kleinabendseglers begründen. Da diese im Frühjahr und Herbst Deutschland von Südwest nach Nordost bzw. in entgegengesetzte Richtung passieren und zu diesen Zeiten meteorologisch bedingt höhere Windgeschwindigkeiten erreicht werden als etwa in den Sommermonaten, fallen die Aktivitätszeiten mit höheren Windgeschwindigkeiten zusammen. Um die Zugwege

möglichst energieeffizient zurücklegen zu können, bevorzugt insbesondere die Rauhautfledermaus, aber auch die Artengruppe Nyctaloid zu diesen Zeiten Bedingungen mit Rückenwind. In den letzten Jahren zeigten verschiedene Untersuchungen, dass die genannten Arten gezielt Bedingungen mit Rückenwind und höheren Windgeschwindigkeiten während der Migration nutzen (Dechmann et al. 2017; Lagerveld et al. 2023; Hurme et al. 2024; Panzeri et al. 2024; Hurme et al. 2025). Die Ergebnisse aus dem Testfeld legen nahe, dass die Windrichtung bzw. die Windunterstützung potenziell geeignete Parameter sind, um die Anwesenheit von migrierenden Fledermausarten an WEA präziser vorherzusagen.

Für die Analyse, ob sich die Anwesenheit der FWEA im Testfeld auf die Anwesenheitswahrscheinlichkeiten der verschiedenen Fledermausarten auswirken, wurden die Jahre vor und nach dem Bau der FWEA verglichen. Zusätzlich wurde ein weiteres Modell nur für die Zeit nach dem Bau der FWEA gefittet. Dieses soll mögliche Interaktionen zwischen der Anwesenheit der FWEA und der Detektionshöhe der Fledermausrufe aufdecken, separat für Messmasten und FWEA, um verändertes Flugverhalten im Testfeld identifizieren zu können. Aufgrund fehlender Betriebsdaten konnten bisher keine Rotordrehzahlen oder Informationen zum Betriebsmodus in die Modelle integriert werden.

Die Zwergfledermaus zeigt nach dem Bau der FWEA keine veränderte Aktivitätsverteilung, nennenswerte Unterschiede zwischen der Nachweiswahrscheinlichkeit an Messmasten und der FWEA liegen nicht vor. Insgesamt wird die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus in den verschiedenen Höhen und an den verschiedenen Strukturen, also deren räumliche Verteilung, nicht durch die Anwesenheit der FWEA beeinflusst. Ob sich durch den regulären Betrieb der FWEA, der am 22.07.2024 startete, Veränderungen der Effekte ergeben, müssen die zukünftigen Auswertungen und experimentellen Untersuchungen zeigen.

Im Gegensatz zur Zwergfledermaus wird die Rauhautfledermaus nach dem Bau der FWEA häufiger im Testfeld nachgewiesen und das insbesondere auf einer Höhe von 10 m sowie 35 m und in der zweiten Nachthälfte während der Herbstmonate. Demnach halten sich die Rauhautfledermäuse am Testfeld bevorzugt am Turm und Turmfuß der FWEA auf, was auf eine gewisse Attraktionswirkung der Strukturen während der Zugzeit hindeutet. Dieses spezifische Verteilungsmuster lässt sich möglicherweise mit der Quartiersuche durch die Rauhautfledermäuse begründen. Zum einen benötigen die ziehenden Tiere am Ende der Nacht ein Quartier zum Übertragen. Zum anderen ist denkbar, dass die ziehenden Rauhautfledermäuse am Testfeld nach geeigneten Paarungsquartieren suchen und hierfür die Türme der FWEA inspizieren. Dies führt zu vermehrten Rufaufnahmen an den Mikrofonen der FWEA-Türme in der zweiten Hälfte der Nacht. Die Vermutung, dass Fledermäuse WEA und deren Türme mit Bäumen oder anderen Strukturen verwechseln, die Quartierpotenzial bieten könnten, existiert bereits seit Beginn der Diskussionen um die Auswirkungen von WEA auf Fledermäuse (Cryan 2008; Cryan & Barclay 2009; Cryan et al. 2014). Für die Anwesenheit der Rauhautfledermaus am Testfeld scheint dieser Erklärungsansatz zumindest möglich.

Ähnlich zur Rauhautfledermaus wird auch die Artengruppe Nyctaloid nach dem Bau der FWEA häufiger nachgewiesen als noch in den Jahren ohne FWEA, allerdings nicht nur auf den niedrigen Erfassungshöhen wie die Rauhautfledermaus, sondern über alle Höhen und Strukturen (Messmaste und FWEA) hinweg. Ob es sich bei diesem Muster um eine tatsächliche Attraktionswirkung der FWEA im Testfeld handelt, muss in den kommenden Jahren mit weiteren Daten überprüft werden.

Während der Projektphase 2 konnten somit interessante meteorologische Zusammenhänge zwischen der Nachweiswahrscheinlichkeit der untersuchten Fledermausarten und Artengruppen beleuchtet sowie Aktivitätsveränderungen durch die Anwesenheit der FWEA festgestellt werden. Weitere Erfassungsjahre und gezielte experimentelle Untersuchungen sollen es zukünftig ermöglichen, auch den konkreten Einfluss des WEA-Betriebs auf das Verhalten der Fledermäuse zu untersuchen.

Arbeitspaket Wärmebild

Das Kapitel beschreibt die Anwendung moderner Kameratechnik (3D Wärmebild und nahes Infrarot) zur Untersuchung des nächtlichen Flugverhaltens von Fledermäusen an Windenergieanlagen (WEA) und die Entwicklung von Methoden zur Erfassung potenzieller Schlagopfer (Fledermäuse und Vögel). Im Mittelpunkt stehen dabei biologische Fragestellungen wie Aktivitätsmuster, artspezifisches Flugverhalten, Wechselwirkungen mit der Anlage und die Bedeutung von Umweltfaktoren.

Das entwickelte Stereo-Wärmebildsystem ermöglicht es erstmals, Fledermaus-Flugbahnen dreidimensional und über längere Zeiträume direkt an einer WEA zu verfolgen. Die beiden Kameras des Systems wurden in einem Abstand von 15 Metern untereinander am Messmast installiert und lieferten von April bis Oktober 2024 kontinuierlich nächtliche Bilddaten. Durch eine präzise 3D-Kalibrierung mittels Drohnenflügen konnte die Position der Tiere im Raum mit einer Genauigkeit von etwa 1,6 Metern bestimmt werden.

Die Analyse der Bilddaten zeigt, dass Fledermäuse in 1,3 % der Nachtstunden aktiv waren. Eine Verschneidung der Wärmebild- mit den Akustikdaten (AP 2) ermöglichte es, etwa 15 % der Flugbahnen einer Art oder Gattung zuzuordnen. Die übrigen Flugbahnen blieben unbestimmt, meist weil die Tiere zu weit entfernt von den Mikrofonen flogen. Die Auswertung der Flugbahnen ergab deutliche artspezifische Unterschiede im Verhalten. Nyctaloide zeigten häufig kreis- bzw. schleifenförmige Flugbahnen, die sehr nah an einem einzelnen Rotorblatt vorbeiführen. Dieses Verhalten könnte der Nahrungssuche auf dem jeweiligen Rotorblatt oder der Erkundung dienen. Zwergfledermäuse flogen eher abgehackte, dreidimensionale Bahnen mit vielen Richtungswechseln, teils mit Annäherung an die Gondel oder den Turm. Einige Flugmuster deuten auf Jagdverhalten im freien Luftraum hin. Im Frühjahr gab es eine leichte Präferenz für Nordflüge, im Herbst dominierten West-Südwest-Richtungen und größere Flughöhen – ein Hinweis auf saisonales Zugverhalten. Die Aktivität der Fledermäuse war stark temperaturabhängig: Sie wurden ab etwa 4 °C aktiv (in der Zugzeit), bevorzugten aber grundsätzlich der Jahreszeit entsprechende, höhere Temperaturen. Bei Korrelation der Flugbahnen mit den Winddaten zeigten sich zwei Muster: Im Sommer und im Höhenbereich der WEA bevorzugten Fledermäuse eher windarme Bedingungen, während im Herbst auch hohe Windgeschwindigkeiten genutzt wurden – vermutlich, um den Rückenwind für den Zug zu nutzen.

Die Dichteanalysen der Flugbahnpunkte zeigten, dass Fledermäuse sich etwa doppelt so häufig in unmittelbarer Nähe des Turms aufhielten wie in größerer Entfernung (außerhalb des Rotorradius). Dies spricht für eine gewisse Attraktionswirkung der WEA auf die Tiere. Die Gründe dafür könnten vielfältig sein, etwa Insektenansammlungen im Bereich der Anlage, Orientierung an Strukturen oder Neugierverhalten. Die beobachteten Interaktionen reichten von Annäherungen an die Gondel und die Rotorblätter bis zu Höhengewinnen entlang des Turms.

Um Schlagopfer zu detektieren, wurden in den Gondeln der Forschungsanlagen Wärmebild- und Tageslichtkameras installiert. Diese überwachen dauerhaft große Flächen unterhalb der WEA. Validierungstests mit Fledermaus- und Vogelphantomen zeigten eine Erkennungsrate

von etwa 71 % (Wärmebild) bzw. 88 % (Tageslicht). Seit Juli 2023 wurden zahlreiche Detektionen festgestellt (z.B. durch Tiere, Fußspuren, bewegtes Gras oder Schatten), die sich alle als falsch positiv erwiesen haben. Um diese besser klassifizieren zu können, werden seit Inbetriebnahme der WEAs auch hochfrequente Bilddaten gespeichert. Dadurch konnte bis Mai 2025 kein tatsächliches Schlagopfer nachgewiesen werden und alle Detektionen wurden als falsch-positiv gekennzeichnet. Die Algorithmen zur Auswertung werden laufend weiterentwickelt, um die Detektionssicherheit zu verbessern und die Rate falsch-positiver Meldungen zu senken. In der folgenden Projektphase sollen die hochfrequenten Daten auf experimenteller Basis auch algorithmisch verwendet werden. Bei Auftreten eines tatsächlichen Schlagopfers in der Nacht könnte auch das Stereo-Wärmebildsystem als weiterer Nachweis und zur genaueren Untersuchung dienen.

Arbeitspaket Insekten

Eine Hypothese für das Auftreten von Fledermäusen an Windenergieanlagen (WEA) ist, dass Fledermäuse dort Insekten jagen, die sich im Bereich der WEA aufhalten (Cryan, Barclay 2009). Studien, die diesen Zusammenhang untersuchen, sind jedoch rar. Ziel dieses Arbeitspakets ist es daher, das Wissen zu Auftretensmustern von Insekten auszuweiten und damit ggf. die Vorhersage von Fledermausaktivitäten an WEA zu verbessern. Für die Erfassung der Insektenabundanz wurde bereits in Phase 1 des vorliegenden Forschungsprojekts eine Insektenfotofalle entwickelt, womit Insekten automatisiert fotografisch erfasst werden können. In Phase 1 (vor dem Bau der Forschungswindenergieanlagen, FWEA) wurde die Insektenfotofalle bereits erfolgreich eingesetzt und es konnte ein schwach signifikanter Zusammenhang der Insektenabundanz mit der gemessenen Fledermausaktivität nachgewiesen werden (Musiol et al. 2023). Besonders stark waren sowohl für die Insekten als auch für die Fledermäuse die Zusammenhänge hinsichtlich der Witterungsbedingungen (Temperatur signifikant positiv, Windgeschwindigkeit signifikant negativ) sowie der Erfassungshöhe (signifikant negativ) (Musiol et al. 2023). Diese Ergebnisse decken sich mit den wenigen bestehenden Vergleichsstudien (De Jong et al. 2019; Trusch et al. 2020). In der vorliegenden Untersuchung in Phase 2 (nach dem Bau der FWEA) über die Jahre 2023 und 2024 wurden die Erfassungen auf alle vier Messmasten sowie die beiden FWEA ausgeweitet. Die Untersuchungen zur Insektenabundanz wurden – wie in Phase 1 – in direkter räumlicher Nähe zu den Erfassungen der akustischen Fledermausaktivität an den Messmasten bzw. den FWEA durchgeführt und es wurden jeweils vier unterschiedliche Erfassungshöhen beprobt (Messmasten: 10m, 35m, 65m und 95m; FWEA: 10m, 35m, 47m und 75m). Insgesamt kamen 24 Insektenfotofallen zum Einsatz, wobei im Juli 2023 zunächst die Geräte an den nördlichen Messmasten installiert wurden. Im März 2024 fand die Installation an den südlichen Messmasten statt, im April 2024 an den FWEA-Türmen und im September 2024 an den FWEA-Gondeln. Zusätzlich zu den nächtlichen Erfassungen der Insektenabundanz wurden in Phase 2 auch tagaktive Insekten erfasst, da diese Insekten möglicherweise nachts an den Strukturen verbleiben und somit eine Attraktion für Fledermäuse darstellen. Zur Erfassung der tagaktiven Insekten wurden die bestehenden Insektenfotofallen mit farbigen Lockflächen ausgestattet. Die Daten aus 2023 wurden manuell ausgewertet, 196 Insekten wurden erfasst. Für die enorme Bilddatenmenge aus 2024 wurde eine Methode zur automatisierten Auswertung mit Hilfe neuronaler Netze zur Objekterkennung etabliert. Hierbei wurden in Summe 30.251 Aufnahmen mit Insektendetektionen automatisiert festgestellt. Die Daten wurden deskriptiv und statistisch ausgewertet, wobei sich die statistische Analyse auf die Daten ab Juni 2024 beschränkt, da hier das Aufnahmeregime tiefergehend angepasst wurde (10 min/h Lockphase mit Bildern alle 10 s). Die erfassten Daten mittels

Insektenfotofalle wurden außerdem mit den Daten der Radar-Erfassungen aus AP 2 verschnitten, wobei sich zeigte, dass sich das großräumige Insektenauftreten (Radar) auch in den kleinräumigen Erfassungen (Insektenfotofalle) widerspiegelt. Neben den quantitativen Erfassungen wurde zudem auch für die qualitative Bewertung der Insektenabundanz im Rotorbereich einmalig ein DNA-Barcoding von Proben der Rotorblätter der FWEA durchgeführt, wobei die drei Ordnungen Diptera, Hymenoptera und Hemiptera dominierten, wie auch in vergleichbaren Studien gezeigt (Weschler, Tronstad 2024). Die Ergebnisse bestätigen die meteorologischen Zusammenhänge hinsichtlich Temperatur (positiv) und Windgeschwindigkeit (negativ) mit der Insektenabundanz. Auch der negative Zusammenhang mit zunehmender Erfassungshöhe konnte erneut nachgewiesen werden. Zudem bestanden Unterschiede zwischen der tagsüber und nachts erfassten Insektenabundanz und es wurden am Tag häufiger Insekten erfasst. Außerdem wiesen die Insektenabundanzmuster sowohl tagsüber als auch nachts Peaks auf, wobei am frühen Nachmittag die meisten Insekten erfasst wurden sowie jeweils zu Nachtbeginn und -ende. Vermutet wird, dass sich hier v.a. der Zusammenhang der Insektenabundanz mit der Temperatur widerspiegelt. Neu konnten Unterschiede der Abundanzmuster hinsichtlich der Struktur und der räumlichen Erfassungspositionen aufgezeigt werden: Sowohl tagsüber als auch nachts wurden an den westlichen Strukturen mehr Insekten erfasst als an den östlichen sowie tagsüber mehr Insekten an den FWEA festgestellt als an den Messmasten, wobei an letzteren auch tendenziell eher kleinere Insekten nachgewiesen wurden. Als Ursache werden verschiedene Faktoren vermutet: Mikrometeorologische Unterschiede (z.B. geringere Windgeschwindigkeiten oder bessere Windabschattung an den FWEA) und Faktoren wie Vegetation sowie Relief, die ebenfalls die lokalen Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Wind stark beeinflussen könnten (im Westen des Windtestfelds befindet sich ein Wald mit einer starken Abbruchkante). Außerdem könnten die vorhandenen Vegetationsunterschiede als Nahrungs- und Reproduktionshabitat eine Rolle spielen. Möglich ist auch, dass tageszeitabhängige Effekte wie Verschattung und Besonnung der Strukturen relevant sind: Die hellen, weißen Oberflächen der FWEA erwärmen und speichern die Wärme länger, was eventuell attraktiv für (größere) Insekten ist. Zudem denkbar ist, dass die weiße Farbgebung der FWEA von Bedeutung ist und speziell Fliegen-Arten stärker anziehen, die an den FWEA-Strukturen auch vermehrt via Insektenfotofalle und per DNA-Barcoding im Rotorbereich nachgewiesen werden konnten. Hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Insekten- und artspezifischer Fledermausaktivität zeigte sich, dass vor allem nachts eine signifikante Beziehung besteht, wenn die Insektenabundanz gesamtheitlich berücksichtigt wird (über den gesamten Tag/Nacht). Für die Zwergfledermaus wurde außerdem nachgewiesen, dass die Insektenabundanz am Tag ein Proxy für die Fledermausaktivität in der darauffolgenden Nacht sein kann, wobei vermutet wird, dass an den Strukturen rastende Insekten von den Fledermäusen abgesammelt werden (Beobachtungen aus AP 4). Jedoch erwiesen sich die meteorologischen Parameter (Temperatur und Windgeschwindigkeit) für alle untersuchten Fledermausarten/-gruppen (Zwerg- & Flughautfledermaus, Großer Abendsegler, Nyctaloid und Myotis) als besonders maßgeblich. Die Analyse der reinen Präsenz-/Absenzdaten von Insekten während der 10-minütigen Erfassungszeiträume ergaben keinen signifikanten Zusammenhang mit der Fledermausaktivität. Es werden methodische Aspekte der Analyse vermutet, die bestehende Effekte möglicherweise verzerren könnten, die jedoch aus Gründen der Vergleichbarkeit mit AP 3 gewählt wurden. Für zukünftige Auswertungen werden hier Zählraten angestrebt, um eine feinere Auflösung der Zusammenhänge zu erreichen. Insgesamt konnten in dieser Untersuchungsphase wertvolle Erkenntnisse im Hinblick auf die Insektenabundanzmuster und ihrer Korrelation mit der Fledermausaktivität erzielt werden. Bei den weiterführenden geplanten Erfassungen wird im

Besonderen aus den angestrebten vergleichenden Untersuchungen an den FWEA während der Betriebs- und Nicht-Betriebsphasen, ein weiterer wichtiger Erkenntnisgewinn erwartet.

Abstract

Work package birds

As part of Phase 2, the collection of basic data on general flight activity using radar (mainly birds, but also insects and bats) and on individual flight movements of red kites using laser range finder (LRF) and telemetry (GPS) is being repeated in the presence of the research wind turbines (RWT). This report contains the results of the first part of Phase 2, during which the RWT were in an idling mode (blades were constantly pitched out of the wind) for around one and a half years and partially in operation for six months. It was not yet technically possible to control the precise rotational speed of the rotors during this phase. For the idling mode, we assume that the speed was less than 4 rpm (= 37.7 km/h). In operation, the rotors of the RWT turned at a maximum speed of 37.7 km/h, 122.5 km/h or 250 km/h.

The aim of the analyses of the radar data in Phase 2 was to explore whether there are indications that the flight activity of flying animals measured by radar is influenced by the presence and/or rotation of the wind turbine rotors. The results should only be regarded as indications of possible effects. It is essential to increase the amount of basic data before the data can be analysed and interpreted in depth. In particular, the meteorological parameters must also be included.

With regard to bird migration, there are indications that the average flight activity of the 'songbird' flight type is influenced by the presence and rotation of the wind turbine rotors, particularly during the day. The flight direction during the day and the nocturnal species composition within the 'songbird' flight type also appear to be influenced by the presence and rotation of the RWT. Compared to phase 1 (without RWT), the flight activity of the diurnal songbird flight types was lower when the RWT were present in an idling mode (spring and autumn) and when the RWT were rotating (so far only one autumn season). Furthermore, compared to phase 1, the diurnal migratory songbird flight types moved more southerly during the day in autumn when the RWT were rotating and the frequency of bird species with a wing beat frequency of approx. 10 Hz was lower at night compared to phase 1. The effects give rise to the suspicion that the songbird flight types fly around the test field mainly during the day. The altitude distributions show that the birds generally fly lower during the day than at night. The presence and rotation of the RWT could therefore have a larger effect on diurnal migratory songbirds than on nocturnal migration.

In the case of insects, all comparative data from Phase 2 are based on only one year, as one year had to be excluded from the analysis. Therefore, it cannot be ruled out that the indications of effects are only based on a one-year effect and have nothing to do with the RWT. In comparison with Phase 1, there were significantly more insects per kilometre and hour on average with the RWT in an idling as well as in a rotating mode, particularly at night. In addition, the flight directions of the insects in autumn were more westerly with rotating RWT than without RWT or with the RWT in idling mode. An increase of the amount of data is essential before the data can be analysed and interpreted in depth.

There are also indications that the RWT could have an influence on the bats. With the RWT in idling mode as well as with rotating RWT, the mean flight activity of the bats was slightly lower across all height intervals than in phase 1 (without RWT). In addition, the height distributions show that the flight activity with the RWT in idling mode appears to shift further downwards compared to Phase 1 (without RWT). With the RWT in idling mode, the highest flight activity

occurred at lower altitude intervals than in phase 1 (without RWT). The data basis is still too small to assess the pattern of height distribution with rotating RWT. The results from work packages 3 and 5 show that there is a positive correlation between the flight activity of bats and insect activity. The spatial distribution of insects may have shifted with the presence of the RWT, which could have caused a shift in the spatial distribution of bat activity.

With regard to the flight behaviour of red kites, Phase 2 focused on the question of whether there are indications that the flight altitude, flight speed and minimum radial approach distance to the locations of the RWT is influenced by the presence and/or rotation of the wind turbine rotors, and whether the wind conditions affect the flight behaviour of red kites in relation to the RWT. In general, it can be said that no statements can yet be made on the influence of the rotation of the rotors of the RWT, as the data basis is currently still too small. The data basis is often also low for higher wind speeds and larger standard deviations of the wind speed (gustiness).

With the presence of the RWT in idling mode, both the flight altitude and the minimum radial approach distance were larger compared to phase 1 (without RWT). In addition, the wind speed and the standard deviation of the wind speed (gustiness) had a different effect on the minimum radial approach distance compared to phase 1 (without RWT). While, as expected, there were hardly any effects for phase 1 (without RWT), the minimum radial approach distance tended to increase with increasing wind speed and decreased with increasing standard deviation of wind speed (gustiness).

In a review on the topic of bird collisions at wind turbines, the negative influence on the control of the birds' flight manoeuvrability is mentioned in connection with strong winds. It is plausible to assume that the gustiness of the wind also reduces the control of manoeuvrability. It is possible that the red kites keep a larger distance from the RWT in idling mode in strong winds so that they are not carried too close to the RWT by the wind. With gusty winds, it may be more difficult to control the distance to the RWT than with calm winds, so that they are carried closer to the RWT in idling mode with gusty winds than with calm winds.

In the course of phase 2, two automatic bird detection systems were tested in accordance with the criteria of the Competence Centre for Nature Conservation and Energy Transition (KNE). In the first test, the BirdRecorder developed by ZSW and in the second test the BPS Long-Range System developed by Bioseco were analysed. The results of the tests are available in separate reports.

Translated with DeepL.com (free version), modified by Janine Aschwanden

Work package bats

One of the objectives of bat-based conservation research is to gain a better understanding of bat occurrence and behaviour at wind turbines. The findings from the surveys are intended to improve the reliability of bat activity predictions and thus the existing avoidance measures. A solid database that comprehensively and continuously records bat activity at different heights is crucial for optimising avoidance measures. Proven acoustic methods are particularly suitable for this purpose, as they also allow the species/species groups identification of the recorded bats. However, in order to assess the influence of wind turbines on the behaviour and activity of bats, it is necessary to have not only acoustic data from the wind turbines themselves, but also knowledge of the behaviour and activity patterns of bats in a largely

uninfluenced environment. This is made possible at the test site by stratified acoustic continuous recordings at the measuring masts and in their surroundings.

Between 2018 and 2022, preliminary investigations (phase 1 of the project) were carried out in the wind energy test field, which then was in the planning stage. Data was collected at the wind measurement masts that had already been erected and in the immediate vicinity of the test field. At that time, there were no wind turbines on the test field, so the data obtained reflects a largely uninfluenced state. The research wind turbine (FWEA) was erected in the course of 2023, marking the start of phase 2 of the project. Regular operation of the two turbines began in the summer of 2024. The data collected in 2023 therefore includes the potentially altered behaviour of bats towards the new wind turbine structures in the test field, depending on wind conditions with ideling rotors, from summer 2024 onwards in official operation. In 2024, all six structures (four measuring masts and two wind turbines) and the surrounding area were sampled simultaneously for the first time.

The statistical models used to interpret the recorded bat activity include all acoustic data from 2019 to 2024 (measurement masts and FWEA) and 2023 (environmental recording). Although the raw data contains bat calls from nine species or species groups (common pipistrelle, soprano pipistrelle, Nathusius' pipistrelle, common noctule, western barbastelle, genus *Myotis*, genus *Plecotus*, species group Nyctaloid, species group Pipistrelloid), modelling was only carried out for the pipistrelle, the Nathusius' pipistrelle and the Nyctaloid group due to the data available. With regard to the meteorological parameters of temperature, precipitation and wind speed, the usual correlations could be demonstrated for the species/species groups studied: as temperatures rise, the probability of detection increases, whereas higher precipitation levels generally result in a lower probability of detection of the bats studied. The species/species groups studied generally respond to increasing wind speeds with a decrease in activity, although there are species-specific differences that can be considered in a more differentiated manner by integrating wind assistance into the model. Wind assistance is a variation of wind direction that takes into account the ecology of migratory bat species. The SSW (south-south-west) wind component was defined as full wind assistance, i.e. tailwind, for the first half of the year, and the NNE (north-north-east) wind component for the second half of the year. For the migrating Nathusius' pipistrelle and the Nyctaloid species group, which also includes bat species with pronounced migratory behaviour (e.g. common noctule, lesser noctule), the models show an increased probability of detection at higher wind speeds in tailwind conditions. These observations can be explained by the migratory behaviour of the Nathusius' pipistrelle, the common noctule and the lesser noctule. As these species pass Germany from southwest to northeast in spring or in the opposite direction in autumn, and higher wind speeds are reached at these times than in the summer months due to meteorological conditions, their activity coincide with higher wind speeds. In order to cover the migration routes as energy-efficiently as possible, the Nathusius' pipistrelle in particular, but also the Nyctaloid species group, prefer tailwind conditions at these times. In recent years, various studies have shown that the species mentioned specifically take advantage of tailwind conditions and higher wind speeds during migration (Dechmann et al. 2017; Lagerveld et al. 2023; Hurme et al. 2024; Panzeri et al. 2024; Hurme et al. 2025). The results from the test field suggest that wind direction and wind assistance are potentially suitable parameters for a more accurate prediction of migrating bat species at wind turbines.

To analyse whether the presence of wind turbines in the test field affects the probability of different bat species being present, the years before and after the construction of the wind

turbines were compared. In addition, another model was fitted for the period after the construction of the wind turbines only. This model is intended to reveal possible interactions between the presence of the wind turbines and the detection height of bat calls, separately for measurement masts and wind turbines, in order to identify changes in flight behaviour in the test field. Due to a lack of operating data, it has not yet been possible to integrate rotor speeds or information on operating modes into the models.

The common pipistrelle shows no change in activity distribution after the construction of the wind turbines, and there are no significant differences between the detection probability at measurement masts and the wind turbines. Overall, the probability of detecting common pipistrelles at different heights and at different structures, i.e. their spatial distribution, is not influenced by the presence of the wind turbines. Future evaluations and experimental investigations will have to show whether the regular operation of the wind turbines, which began on 22 July 2024, will result in any changes in the effects.

In contrast to the common pipistrelle, the Nathusius' pipistrelle is detected more frequently in the test field after the construction of the wind turbines, especially at heights of 10 m and 35 m and in the second half of the night during the autumn months. Accordingly, the Nathusius' pipistrelles in the test field prefer to stay close to the tower and tower base of the wind turbines, which indicates a certain attraction effect of the structures during the migration period. This specific distribution pattern can possibly be explained by the search for roosts. On the one hand, the migrating bats need a roost at the end of the night. On the other hand, it is conceivable that the migrating Nathusius' pipistrelles are searching for suitable mating roosts at the test field and are inspecting the towers of the wind turbines for this purpose. This leads to increased bat call recordings at the wind turbine towers in the second half of the night. The assumption that bats confuse wind turbines with trees or other structures that could offer potential roosting sites has existed since the beginning of discussions about the effects of wind turbines on bats (Cryan 2008; Cryan & Barclay 2009; Cryan et al. 2014). This explanation seems at least possible for the presence of the Nathusius' pipistrelle at the test field.

Similar to the Nathusius' pipistrelle, the Nyctaloid species group is also detected more frequently after the construction of the wind turbines than in the years without, but not only at low detection heights like the Nathusius' pipistrelle, but across all heights and structures (measurement masts and wind turbines). Whether this pattern is actually due to attraction effects of the wind turbines must be verified in the coming years with further data.

During project phase 2, interesting meteorological correlations between the detection probability of the bat species/species groups studied were thus highlighted, and changes in activity due to the presence of the wind turbines were identified. Further years of bat recording and experimental studies should make it possible in future to investigate the specific influence of wind turbine operation on bat behaviour.

Translated with DeepL.com (free version), modified by Bruntje Lüdtkke

Work package thermal imaging

This chapter describes the application of modern camera technology (3D thermal imaging and near-infrared) to investigate the nocturnal flight behavior of bats at wind turbines (WTs) and the development of methods to detect potential collision victims (bats and birds). The focus

is on biological questions such as activity patterns, species-specific flight behavior, interactions with the turbine, and the influence of environmental factors.

The developed stereo thermal imaging system enables, for the first time, three-dimensional tracking of bat flight paths over extended periods directly at a WT. The system's two cameras were installed 15 meters apart on the measurement mast and continuously recorded nightly image data from April to October 2024. Precise 3D calibration using drone flights allowed the spatial position of the animals to be determined with an accuracy of approximately 1.6 meters.

Analysis of the image data showed that bats were active during 1.3% of the night hours. By combining thermal imaging with acoustic data (AP 2), about 15% of the flight paths could be assigned to a species or genus. The remaining flight paths remained unclassified, mostly because the animals flew too far from the microphones. Evaluation of the flight paths revealed clear species-specific differences in behavior. Nyctaloids frequently exhibited circular or looping flight paths, passing very close to individual rotor blades. This behavior may serve foraging on the rotor blade or exploration. Common pipistrelles tended to fly abrupt, three-dimensional paths with many changes of direction, sometimes approaching the nacelle or the tower. Some flight patterns indicated hunting behavior in open airspace. In spring, there was a slight preference for northward flights, while in autumn, west-southwest directions and higher altitudes dominated—an indication of seasonal migration. Bat activity was strongly temperature-dependent: they became active at around 4°C (during migration periods) but generally preferred higher, seasonally appropriate temperatures. Correlating flight paths with wind data revealed two patterns: in summer and at WT hub height, bats preferred low-wind conditions, whereas in autumn, high wind speeds were also utilized, presumably to take advantage of tailwinds during migration.

Density analyses of the flight path points showed that bats were about twice as likely to be found in the immediate vicinity of the tower compared to greater distances (outside the rotor radius). This suggests a certain attraction of the WTs for the animals. The reasons for this could be varied, such as insect aggregations near the turbine, orientation by structures, or curiosity-driven behavior. Observed interactions ranged from approaches to the nacelle and rotor blades to altitude gains along the tower.

To detect collision victims, thermal imaging and daylight cameras were installed in the nacelles of the research turbines. These continuously monitor large areas beneath the WTs. Validation tests with bat and bird dummies showed detection rates of about 71% (thermal imaging) and 88% (daylight). Since July 2023, numerous detections have been recorded (e.g., animals, footprints, moving grass, or shadows), all of which proved to be false positives. To improve classification, high-frequency image data have been stored since the WTs became operational. Up to May 2025, no actual collision victims were detected, and all detections were classified as false positives. The evaluation algorithms are continuously being improved to enhance detection reliability and reduce the rate of false positives. In the next project phase, the high-frequency data will also be used experimentally for algorithmic analysis. If an actual collision victim is detected at night, the stereo thermal imaging system could also serve as further evidence and enable more detailed investigation.

Translated with Perplexity, modified by Christof Happ

Work package insects

One hypothesis for the occurrence of bats at wind turbines is that they hunt for insects present in the vicinity of the turbines (Cryan, Barclay 2009). However, studies investigating this relationship are rare. The aim of this work package (WP) is therefore to expand the knowledge on insect activity patterns and use this information to improve the predictions of bat activity at wind turbines. An insect camera trap was developed as part of this research project to automatically record insects with photos. The insect camera trap was successfully used in phase I of the project (prior to the construction of the research wind turbines) and a weakly significant correlation between insect abundance and bat activity was found (Musiol et al. 2023). The correlations with weather conditions were particularly strong for both the insects and the bats (temperature: significantly positive, wind speed: significantly negative) and the height at which insects were recorded (significantly negative) (Musiol et al. 2023). These results are consistent with the few existing comparable studies (De Jong et al. 2019; Trusch et al. 2020). In the present study in Phase 2 (after the construction of the wind turbines), carried out in 2023 and 2024, the surveys were extended to all four measuring masts and the two research wind turbines. As in phase I, insect abundance was measured with the camera traps in close proximity to the acoustic bat recorders, both on the measuring masts and the wind turbines. Four different survey heights were sampled (on the masts: 10m, 35m, 65m, and 95m; wind turbines: 10m, 35m, 47m and 75m). In total 24 insect camera traps were implemented, and the first camera traps were installed in July 2023 on the northern measuring masts. The further installations took place on the southern measuring masts in March 2024, in April 2024 on the wind turbine towers and in September 2024 on the roof of the wind turbine nacelles. In addition to measuring the nocturnal insect activity, diurnal insect activity was also measured in Phase II, as diurnally active insects may remain on the structures at night and thus represent an attraction for bats. In order to survey diurnal insects, the camera traps were equipped with a colored attracting surface. The data from 2023 were evaluated manually and 196 insects were recorded. To evaluate the tremendous volume of image data collected in 2024 an automated evaluation method was established, which uses neural networks (machine learning) for object detection. A total of 30,251 images with one or more insect detections were identified using this automated method. The data were evaluated descriptively and statistically, whereby the statistical analyses were limited to the data from June 2024 onwards, as the recording regime was adjusted from then (recording 10 min per hour, with one image every 10s). Furthermore, the data measured from the insect camera traps was compared to the insect data captured by radar (see WP 2). This showed that the large-scale insect occurrence (radar) was also reflected in the small-scale observations (insect camera trap). In addition to the quantitative insect measurements, DNA barcoding samples were taken from the rotor blade of one research wind turbine for a qualitative assessment of insect abundance in the rotor area. Insect diversity in these samples was dominated by three orders: Diptera (flies) Hymenoptera (bees, ants and wasps) and Hemiptera (true bugs). Similar results have been found in comparable studies (Weschler, Tronstad 2024). The results confirmed the meteorological correlations with insect abundance regarding temperature (positive correlation) and wind speed (negative correlation). The negative correlation with increasing recording height was also demonstrated again. Furthermore, there were differences between the insect abundance during the day and at night, insects were recorded more frequently during the day. Moreover, insect abundance patterns showed peaks during the day and at night, with most insects recorded in the early afternoon and at the beginning and end of the night. It is assumed that this primarily reflects the relationship between insect abundance and temperature.

Differences in insect abundance patterns with regard to the structure and the spatial recording positions were identified. More insects were recorded at the western structures than at the eastern ones, both during the day and at night. Furthermore, more insects were recorded at the wind turbines during the day than at the measuring masts, although smaller insects tended to be detected at the latter. Various factors are thought to cause this: micrometeorological differences (e.g. low wind speeds, or higher protection from the wind at the wind turbines) and factors such as the vegetation and topography, which could also strongly influence the local wind and temperature conditions (to the west of the wind test field site there is a forest with a steep slope). The nearby forest could also play a role for insects as a habitat for feeding and reproduction. It is also possible that certain effects such as shading and sunlight on the structures are relevant, depending on the time of day. The white, bright surface of the wind turbines can warm up during the day and store heat for longer, which may make them more attractive to insects. Additionally, it is possible that the white colour of the wind turbines is relevant and particularly attractive for fly species, which were detected more frequently on the camera traps on the wind turbines and in the DNA barcoding of the rotor blade. Regarding the relationship between insect activity and species-specific bat activity, there is a significant correlation, especially at night, when insect abundance is considered as a whole (over the entire day or night). For the Common pipistrelle bat, insect abundance during the day was shown to be a possible proxy for bat activity in the following night, whereby it is assumed that insects resting on the structures are gleaned by the bats (observations from WP 4). However, the meteorological parameters (temperature and wind speed) proved to be particularly significant for all bat species/species groups investigated (Common pipistrelle, *Nathusius pipistrelle*, Common noctule, *Nyctaloid* and *Myotis*). An analysis of just the presence/absence data of insects during the 10-minute recording periods revealed no significant correlation with bat activity (here also considered as presence/absence). The structure of the statistical model for this particular analysis was chosen for reasons of comparability with WP3, but aspects of this methodological decision are suspected to possibly distort existing effects seen in the aforementioned analysis. For future analyses, count data will be used to achieve a finer resolution of correlations. Overall, valuable knowledge regarding insect abundance patterns and their correlation with bat activity were gained in this study. Further important findings are expected to be gained from the planned ongoing insect assessments, in particular from the assessment comparing insect activity at the wind turbines during operational and non-operational phases.

Einleitung

Seit Beginn der Energiewende kommt es durch den Ausbau der Windenergienutzung zu Konflikten mit dem Artenschutz, insbesondere bezogen auf bestimmte windenergiesensible Vogel- und Fledermausarten. Zwar bestehen seit längerem verschiedene Regelwerke, die einen besseren Artenschutz bei der Planung und Genehmigung von Windenergieanlagen (WEA) gewährleisten sollen, beispielsweise in Leitfäden auf Bundesländerebene und seit dem Jahr 2022 auch im neuen Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG). Eine entscheidende Entschärfung oder gar Beilegung des Konflikts konnte jedoch damit bislang nicht erreicht werden. Mit den inzwischen erhöhten Zielsetzungen für den Ausbau der Windenergienutzung bis zum Jahr 2040 besteht daher nach wie vor die Herausforderung, die Konflikte zwischen der Windenergienutzung und dem Erhalt der biologischen Vielfalt bestmöglich zu lösen und dafür insbesondere praktische Lösungsansätze aufzuzeigen bzw. weiterzuentwickeln. Im Zentrum stehen dabei effektive Vermeidungs- und Minimierungsmaßnahmen zum besseren Schutz von Vögeln und Fledermäusen bei der Umsetzung von Windenergieprojekten. Vor dem Hintergrund der Zumutbarkeitsschwelle für Schutzmaßnahmen im BNatSchG stellt sich zudem die Aufgabe, auch die Kosten für diese Maßnahmen im Blick zu haben, insbesondere, wenn es um innovative technische Maßnahmen wie Antikollisionssysteme geht.

Das Süddeutsche Windenergie-testfeld WINSENT, dessen Planung und Errichtung vom Bundeswirtschaftsministerium sowie vom Umweltministerium Baden-Württemberg gefördert wurde und das der technischen Optimierung der Windenergienutzung im bergig-komplexen Gelände dienen soll, steht auch der Naturschutzbegleitforschung zur Verfügung. Es bietet einzigartige Möglichkeiten, insbesondere technische Lösungen zu konzipieren, weiterzuentwickeln und zu testen. Hierfür ist das Vorhaben „NatForWINSENT-II – Umsetzung der Naturschutzforschung am Windtestfeld an Land“ konzipiert worden. In dessen Rahmen haben die Forschenden erstmals die Möglichkeit, das Verhalten von Vögeln und Fledermäusen an Windenergieanlagen detailliert und in Abhängigkeit von meteorologischen Bedingungen zu untersuchen und für experimentelle Untersuchungen auch in das Betriebsregime der Windenergieanlagen einzugreifen.

Das Testfeld befindet sich auf den Gebieten der Städte Geislingen an der Steige und Donzdorf im Landkreis Göppingen. Es besteht aus zwei Forschungswindenergieanlagen mit einer Gesamthöhe von knapp 100 Metern und vier Windenergiemessmasten gleicher Höhe (Abb 1.) Windenergieanlagen und Messmasten sind mit umfangreicher Sensorik, in Folge der bisherigen Vorhabenphasen von NatForWINSENT auch zur Erfassung von Vögeln, Fledermäusen und Insekten, ausgestattet. Als letztes wurden die beiden Forschungswindenergieanlagen (FWEA) im März 2023 errichtet, die offizielle Einweihung des Testfelds durch den baden-württembergischen Ministerpräsidenten Winfried Kretschmann erfolgte im September 2023, die Inbetriebnahme der beiden Forschungs-Windenergieanlagen im Juli 2024.



Abb. 1: Drohnenaufnahme des Windenergetestfelds WINSSENT; Quelle: ZSW

Grundlage für die im Vorhaben vorgesehenen Untersuchungen sind Forschungskonzepte für Vögel und Fledermäuse, die im Rahmen des Vorgängervorhabens „NatForWINSSENT“, FKZ 3517 86 1600 in den Jahren 2017/2018 entwickelt wurden. Neben der Relevanz der Forschungsfragen stand bei der Konzeptentwicklung auch immer die Frage im Mittelpunkt, für welche Untersuchungen die Gegebenheiten des Testfelds WINSSENT geeignet sind.

Mit der Umsetzung der Konzepte wurde bereits im Vorhaben „NatForWINSSENT-II, Phase 1: Vorher-Untersuchungen“, FKZ 3518 86 0100, begonnen. In dessen Rahmen wurden in den Jahren 2018 bis 2021 umfangreiche Naturschutzdaten erhoben, vor dem Hintergrund der Forschungsfragen ausgewertet und unter anderem mit meteorologischen Daten des Testfelds verschnitten. Weiterhin wurde mit Insektenfotofallen eine Technik zur Erfassung der Insektenabundanz konzipiert und getestet ebenso wie ein Stereo-Wärmebildkamerasystem für die Aufzeichnung von nächtlichen Fledermaus-Flugwegen sowie ein Schlagopferkamerasystem, das Schlagopfer sowohl am Tage als auch in der Nacht erfassen soll.

Zusammenfassend haben die Untersuchungen in Phase 1 ergeben, dass im Testfeld WINSSENT sehr gute Voraussetzungen für die Naturschutzforschung gegeben sind, insbesondere was das Artvorkommen am Standort betrifft. Zudem dokumentiert der entsprechende Abschlussbericht (BfN-Schrift 649) bereits wichtige neue Erkenntnisse, die schon in Phase 1 ohne Forschungswindenergieanlagen gewonnen werden konnten. Hervorzuheben sind dabei Ergebnisse zu Flughöhen und –geschwindigkeiten der in Testfeldumgebung angesiedelten Rotmilane, Wetterabhängigkeiten des Vogelzugsgeschehens sowie auch Abhängigkeiten der Fledermausaktivität von Witterungsbedingungen.

Auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse in Phase 1 werden nun in Phase 2, auf deren ersten Teil sich dieser Abschlussbericht bezieht, Veränderungen der Artzusammensetzung und insbesondere des Flugverhaltens bestimmter Arten in Abhängigkeit vom Vorhandensein und vom Betriebszustand der beiden Forschungswindenergieanlagen im Detail untersucht. Im besonderen Fokus stehen dabei zukünftig experimentelle Untersuchungen unter Nutzung der an den Forschungswindenergieanlagen, den vier Messmasten sowie im Freifeld vorhandenen Sensorik. Im ersten Teil der Phase 2 wurden zunächst die wesentlichen Erfassungen von Vögeln, Fledermäusen und Insekten aus Phase 1 fortgesetzt und Veränderungen gegenüber der

Situation ohne FWEA analysiert. Im weiteren Verlauf von Phase 2 werden dann die besonderen Vorzüge des Testfelds WINSENT zum Tragen kommen, insbesondere, wenn bei experimentellen Untersuchungen in das Betriebsregime der Anlagen eingegriffen werden kann, beispielsweise um das Verhalten von Vögeln (insbesondere Rotmilanen) und Fledermäusen an den FWEA bei bestimmten Rotorgeschwindigkeiten näher zu untersuchen.

Der Berichtszeitraum dieses Abschlussberichts erstreckt sich über den ersten Teil von Phase 2, der die Erfassungsjahre 2023 und 2024 mit der sehr weitgehenden Auswertung aller, in diesen beiden Jahren erfassten Daten umfasst. Im ersten Erfassungsjahr waren die Windenergieanlagen während der kompletten Erfassungssaison bereits errichtet und befanden sich im Trudelbetrieb. Die Inbetriebnahme der Windenergieanlagen startete im April 2024, konnte jedoch erst Ende Juli 2024 weitgehend abgeschlossen werden. Der Grund hierfür ist eine Nebenbestimmung der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung des Testfelds, die eine phänologiebedingte Abschaltzeit zum Schutz des Rotmilans während der Aufzuchtzeit der Jungvögel zur Tageszeit zwischen dem 1. Mai und dem 31. Juli jedes Jahres vorsieht. In dieser Zeit war es daher nicht möglich, die im April begonnene Inbetriebnahme abzuschließen. Aufgrund einer Sondergenehmigung, die vor dem Hintergrund eines im Rahmen dieses Vorhabens dokumentierten verfrühten Beginns der Rotmilan-Brutphase im Jahr 2024 erwirkt wurde, konnte dies aber bereits in der letzten Juliwoche durchgeführt werden. Ab Anfang August 2024 konnten die Untersuchungen dann auch mit am Tage drehenden Rotoren fortgeführt werden, sofern genügend Wind wehte und die Anlagen nicht aufgrund anderer Nebenbestimmungen abgeschaltet bleiben mussten.

Anders als die Vogelforschung kann die Fledermausforschung grundsätzlich auch zwischen Mai und Juli von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang bei laufenden Windenergieanlagen stattfinden, sofern sie nicht aufgrund der beauftragten Abschaltalgorithmen zum Fledermausschutz abgeschaltet sind. Um die Zeit auch vor der vollständigen Inbetriebnahme der Windenergieanlagen nutzen zu können, wurde Anfang Juni 2024 eigens hierfür ein Drehzahlregler implementiert, der die Anlagen bei ausreichendem Wind nachts mit einer konstanten Drehzahl von 12 Umdrehungen pro Minute (rpm; ohne Stromerzeugung) laufen ließ. Allerdings war dies nur in vergleichsweise wenigen Nächten der Fall, da in der überwiegenden Zahl der Nächte die Abschaltalgorithmen für Fledermäuse (Temperaturen von $> 10^{\circ}\text{C}$, Windgeschwindigkeiten $< 6 \text{ m/s}$) griffen.

1 Vögel

Janine Aschwanden und Barbara Helm

1.1 Ausgangslage

1.1.1 Überblick Vögel Phase 2

Im Arbeitspaket Vögel (AP 2) sind die Hauptziele die Entwicklung und Erprobung technischer Maßnahmen zur Vermeidung von Vogelkollisionen (insbesondere bedarfsgerechter Abschaltungen) sowie die Formulierung von Anforderungen an Antikollisionssysteme. Konkret soll auch die Wirksamkeit technischer Vermeidungsmaßnahmen für Vögel dargelegt werden. Dabei stehen Fragestellungen im Zusammenhang mit der Entwicklung und Erprobung von technischen Systemen im Fokus.

Im Rahmen von Phase 2 wird die Erhebung der Basisdaten zur generellen Flugaktivität mittels Radar (Vögel, Insekten, Fledermäuse) und zu individuellen Flugbewegungen des Rotmilans mittels Laser-Range-Finder (LRF) und Telemetrie (GPS) nun mit Präsenz der Forschungswindenergieanlagen (FWEA) fortgesetzt. Diese Daten werden wie in Phase 1 mit den auf dem Testfeld erhobenen technischen, meteorologischen und ökologischen Grunddaten verschnitten. Daraus entsteht ein Datensatz, der sich mit dem Datensatz aus Phase 1 vergleichen lässt. So kann untersucht werden, ob und wie sich beispielsweise das Flugverhalten der Vögel hinsichtlich Nutzung des Luftraums vor und nach der Errichtung der FWEA beispielsweise auch unter dem Aspekt der Wetterverhältnisse unterscheidet.

In Phase 2 werden die Basisdaten im Rahmen systematischer Experimente zusätzlich in Bezug zu den Betriebsparametern der FWEA (insbesondere Rotorgeschwindigkeit) gesetzt. Dadurch kann untersucht werden, ob und wie die Präsenz der FWEA sowie unterschiedliche Betriebsparameter der FWEA das Flugverhalten der Vögel beeinflussen.

Auch die im Rahmen der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung durchgeführten Kartierungen werden, wie bereits während der Phase 1 in Phase 2 fortgeführt, so dass ein Vorher-Nachher-Vergleich möglich sein wird. Daraus resultiert ein Erkenntnisgewinn zum Einfluss von WEA auf das Verhalten der Vögel (z.B. Verlagerung von Brutstätten/Revieren) und zur Kollisionsgefährdung der betrachteten Arten an WEA.

Die in Phase 2 erhobenen Basisdaten sind zudem die Grundlage für die Erprobung von Erfassungssystemen von Drittanbietern wie auch für die experimentelle Erprobung der Wirksamkeit konkreter Vermeidungsmaßnahmen (s. AP 2.4 und AP 2.5). Die Erkenntnisse aus den verschiedenen Untersuchungen in AP 2 werden zudem herangezogen, um Schlussfolgerungen zur Entwicklung neuer bzw. Anpassung bekannter Vermeidungsmaßnahmen und deren Praxisumsetzung zu formulieren.

Aus administrativen Gründen besteht Phase 2 aus mehreren Teilen. Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse des ersten Teils von Phase 2.

1.1.2 Datengrundlage und Ziel für Phase 2

Zurzeit der Erstellung des vorliegenden Berichts enthielt die Datengrundlage für Phase 1 (ohne FWEA) Daten von vier Jahren und für Phase 2 (mit FWEA) Daten von zwei Jahren. Innerhalb von Phase 2 befanden sich die FWEA rund eineinhalb Jahre im Trudelmodus (22.03.2023 bis 25.05.2024) und ein halbes Jahr teilweise in Betrieb (26.05.2024 bis 31.12.2024). Aus diesem

Grund stand zur Zeit der Erstellung des vorliegenden Berichts lediglich erst eine geringe Datenmenge zur Verfügung, die mit sich drehenden FWEA gesammelt werden konnte.

In Studien, welche Effekte von WEA auf das Verhalten von Tieren untersuchen, sind die WEA normalerweise in Betrieb. Dabei korreliert die Rotorgeschwindigkeit jeweils mit der Windgeschwindigkeit. Dadurch ist jeweils unbekannt, ob einem möglichen Effekt der Wind, die bloße Präsenz der WEA oder die Drehung der Rotoren an sich zugrunde liegt. Da sich die FWEA im vorliegenden Projekt über einen gewissen Zeitraum hinweg im Trudelmodus befanden, bietet die vorliegende Datengrundlage die seltene Gelegenheit den Effekt der bloßen Präsenz der FWEA bei unterschiedlichen Windverhältnissen zu untersuchen. Dies kann auch als Teil des Experiments betrachtet werden, mit welchem im weiteren Verlauf von Phase 2 der Einfluss verschiedener Betriebszustände der FWEA auf das Flugverhalten der Vögel untersucht werden soll.

Das Ziel von Phase 2 besteht darin, die bis anhin vorliegende Datengrundlage hauptsächlich explorativ zu nutzen, um Hinweise zu erhalten, ob die Präsenz und/oder die Drehung der FWEA in irgendeiner Art und Weise einen Effekt auf die mittels Radar gemessene Flugaktivität fliegender Tiere sowie auf das individuelle Flugverhalten der Rotmilane im Bereich des Testfelds hat.

1.1.3 Betriebsdaten FWEA Phase 2

Seit dem 26.05.2024 werden Betriebsdaten der FWEA erhoben und vom ZSW zur Verfügung gestellt. Die Betriebsdaten bestehen aus kontinuierlichen Angaben mit Zeitstempeln von wann bis wann die FWEA einen bestimmten Betriebszustand aufwiesen. Die Registrierung der präzisen Drehgeschwindigkeit der Rotoren war im Verlauf von Phase 2 technisch aber noch nicht möglich. Stattdessen wurde seitens des ZSW die Drehgeschwindigkeit (rpm = rounds per minute) der Rotoren der FWEA in Form einer jeweiligen Maximalgeschwindigkeit in drei Klassen (4 rpm = 37,7 km/h, 13 rpm = 122.5 km/h, 26 rpm = 250.7 km/h) angegeben. Für den Trudelmodus gehen die Autoren davon aus, dass die Geschwindigkeit bei weniger als 4 rpm lag.

1.1.4 Meteodaten Phase 2

Seit Beginn des Projekts werden auf dem Testfeld mit diversen Sensoren teilweise auf unterschiedlichen Höhen über Boden (ü.B.) meteorologische Parameter erhoben. Im Rahmen von Phase 2.1 wurden im Zusammenhang mit dem individuellen Flugverhalten der Rotmilane vor allem die Daten zur Windgeschwindigkeit und zur Standardabweichung der Windgeschwindigkeit auf rund 100 m ü. B. genutzt. Die Standardabweichung der Windgeschwindigkeit kann als Maß für die Böigkeit des Windes verwendet werden. Gemäß Definition des Deutschen Wetterdienstes (DWD) spricht man von einer Bö, wenn der gemessene 10-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit innerhalb weniger Sekunden (höchstens 20, mindestens 3 Sekunden anhaltend) um mindestens 5,0 m/s (10 Knoten) überschritten wird (Deutscher Wetterdienst 2025). Die American Meteorological Society bezeichnet eine Bö als "A sudden, brief increase in the speed of the wind" (American Meteorological Society 2025). Die Idee zur Verwendung dieses Parameters im Zusammenhang mit dem Flugverhalten von Greifvögeln bezüglich von WEA stammt von Wanner (2017).

1.2 Generelle Flugaktivität (Radar)

1.2.1 Ziele und Fragestellung

Hauptziel der Radaruntersuchung in Phase 2 ist die Erfassung der generellen Flugaktivität von fliegenden Tieren (ziehende Vögel, Insekten und Fledermäuse) im Gebiet des Testfelds nach der Errichtung der FWEA und vergleichende Analysen der Flugaktivität bezogen auf Phase 1 (vor der Errichtung).

Im vorliegenden Bericht wurde insbesondere folgende Fragestellung untersucht:

- Gibt es Hinweise, dass die mittels Radar gemessene Flugaktivität fliegender Tiere von der Präsenz und/oder der Drehung der Rotoren der FWEA beeinflusst wird?

1.2.2 Radardaten und Verschneidung mit Betriebsdaten der FWEA

Seit Beginn des Projekts wurden die Radardaten mit dem BirdScanMR1 kontinuierlich (24/7) erhoben (Musiol et al. 2023). Im Verlauf des Projekts ist der in Echtzeit ablaufende Klassifizierungsalgorithmus des Radargerätes vom Hersteller ständig verbessert und weiterentwickelt worden. So wurde auch die automatische Erkennung von Fledermäusen implementiert. Sämtliche bis anhin erfassten Radardaten wurden daher mit der neuesten Version des Klassifizierungsalgorithmus rückwirkend neu klassifiziert und die Flugaktivitäten neu berechnet, so dass die Radardaten über die Jahre hinweg vergleichbar sind. Im Verlauf der Datenanalyse stellte sich heraus, dass das Radargerät im Jahr 2023 einen leichten Sensitivitätsverlust aufwies. Dadurch wurde vom Radargerät ein geringeres Volumen als normal überwacht. Der Radarhersteller konnte die Daten für Vögel (und Fledermäuse) entsprechend dem geringeren überwachten Volumen korrigieren. Wie stark sich der Sensitivitätsverlust auf die Erfassung der Insektenaktivität ausgewirkt hat, ist unbekannt. Mit großer Wahrscheinlichkeit sind aufgrund des Sensitivitätsverlustes weniger kleine Insekten erfasst worden. Um zu verhindern, dass die Ergebnisse bezüglich der Insekten nicht verfälscht werden, wurden die Daten aus dem Jahr 2023 von der vorliegenden Analyse ausgeschlossen.

Pro Tiergruppe (Vögel, Insekten und Fledermäuse) wurde separat eine Standardauswertung der Radardaten vorgenommen. Die Standardauswertung der Radardaten zielt darauf ab, den Verlauf der Flugaktivität von fliegenden Tieren (Vögel, Insekten und Fledermäuse) im Bereich des Testfelds räumlich und zeitlich darzustellen und zu beschreiben (z.B. saisonaler Verlauf der Flugaktivität, Höhenverteilung, Flugrichtungen). Dabei wird die Flugaktivität im gesamten vom Radar überwachten Höhenbereich (Vögel: 50 – 1.100 m ü.B, Insekten: 50 – 540 m ü.B., Fledermäuse: 50 – 1.100 m ü.B.) sowie im Höhenbereich der FWEA (alle Tiergruppen: 50 – 120 m ü.B.) hinsichtlich der Kollisionsproblematik von Vögeln, Insekten und Fledermäusen jeweils separat visualisiert. Je nach Tiergruppe umfasst die Standardauswertung unterschiedliche Komponenten, da in den Radardaten nicht zu allen Tiergruppen gleich viele Informationen vorhanden sind.

Um Hinweise zu erhalten, ob die Präsenz und/oder die Drehung der FWEA in irgendeiner Art und Weise einen Effekt auf die mittels Radar gemessenen Flugaktivitäten fliegender Tiere hat, wurde die Standardauswertung pro Tiergruppe in Abhängigkeit der unterschiedlichen Phasen des vorliegenden Projekts durchgeführt. Dafür wurden einerseits die stündlichen Flugaktivitätswerte (Anzahl Tiere pro km und h) wie auch die einzelnen Echos, die für die Analyse der Flugrichtungen und der Flügelschlagfrequenzen nötig sind, mit den Betriebsdaten der FWEA verschnitten und einer Phase respektive einem Betriebszustand zugeteilt. Für die Verschneidung der Radardaten mit den Phasen respektive den Betriebsdaten der FWEA wurden

Kategorien festgelegt, wobei die Kategorie mit drehenden FWEA zwei Varianten umfasst. Eine Variante enthält alle Drehgeschwindigkeiten inklusive der Drehgeschwindigkeit 37,7 km/h (= mit FWEA drehend), und die andere Variante enthält nur die Drehgeschwindigkeiten >37,7 km/h (= mit FWEA schnell). Mit diesem Ansatz wurde geprüft, ob mögliche Effekte stärker ausgeprägt sind, wenn nur höhere Drehgeschwindigkeiten einbezogen werden. Daraus ergeben sich für die Analysen der Radardaten folgende Kategorien:

- Phase 1: ohne FWEA
- Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (FWEA off = beide FWEA hatten an der Rotorspitze eine Geschwindigkeit von weniger als 37,7 km/h),
- Phase 2: mit FWEA drehend (FWEA on = mindestens eine der beiden FWEA hatte an der Rotorspitze eine Geschwindigkeit von 37,7 km/h oder schneller)
- Phase 2: mit FWEA schnell drehend (FWEA on >37,7 km/h = mindestens eine der beiden FWEA hatte an der Rotorspitze eine Geschwindigkeit von mehr als 37,7 km/h)

Die mittels Radar gemessenen Flugaktivitätsdaten (Anzahl Tiere pro km und h) liegen in stündlichen Werten vor. Damit die Betriebsdaten der FWEA mit den stündlichen Flugaktivitätsdaten verschnitten werden können, muss für jede Stunde bestimmt werden, welcher Betriebszustand für die entsprechende Stunde gilt. Es wurde festgelegt, dass eine Stunde einem Betriebszustand zugeordnet wird, sobald der Betriebszustand einer der beiden FWEA innerhalb einer Stunde länger als 20 min andauert. Drehte beispielsweise eine FWEA innerhalb einer Stunde 35 min lang mit mindestens 37,7 km/h, so wurde die gesamte Stunde als „FWEA drehend = FWEA on“ gewertet (auch wenn nur eine der beiden FWEA gedreht hat).

Die Verschneidung der einzelnen Echos mit den Betriebsdaten der FWEA wurde anhand der Zeitstempel der einzelnen Echos vorgenommen. Dazu wurde für jedes Echo geprüft, welchen Betriebszustand die FWEA zum entsprechenden Zeitpunkt hatten, als das Echo registriert worden ist.

1.2.3 Radardaten Vogelzug und Ergebnisse

Die Standardauswertung Vogelzug wurde jeweils für den Höhenbereich 50-1.100 m ü.B. und für den Höhenbereich 50-120 m ü.B. (Höhenbereich der Rotoren der FWEA, Musiol et al. 2023) sowie getrennt für Tag und Nacht durchgeführt. Als Hauptzugzeiten wurden die Zeitperioden 15.02. – 15.05. (Frühling) und 15.08. – 15.11. (Herbst) genutzt. Entsprechend dieser Zeitperioden wurden die Datengrundlagen den Phasen und den Betriebszuständen der FWEA zugeordnet (Tab. 1 und Tab. 2).

Die Standardauswertung betreffend Vogelzug enthält den ganzjährigen saisonalen Verlauf der Flugaktivität und die mittlere Flugaktivität zur Hauptzugzeit für alle Vögel vereint sowie separat für die Flugtypen Singvogel, Wasservogel und Segler. Weiter sind in der Standardauswertung bezüglich der Hauptzugzeit die Zusammensetzung des Vogelzugs, die Verteilung der Flügelschlagfrequenzen für den Flugtyp Singvogel, die Verteilung der Flugrichtungen über alle Vögel vereint und die Höhenverteilung ebenfalls über alle Vögel vereint, enthalten.

Tab. 1: Liste der berücksichtigten Zeitperioden für ziehende Vögel in Abhängigkeit der Phase, der Präsenz und des Betriebszustands der FWEA und der Jahre.

Phase	Präsenz und Betriebszustand FWEA	Jahr	Frühlingszug	Herbstzug
1	Ohne FWEA	2019	-	12.09.-15.11.
1	Ohne FWEA	2020	15.02.-15.05.	15.08.-15.11.
1	Ohne FWEA	2021	15.02.-15.05.	15.08.-15.11.
1	Ohne FWEA	2022	15.02.-15.05.	15.08.-15.11.
1	Ohne FWEA	2023	15.02.-21.03.	
2	Mit FWEA off (nur im Trudelmodus)	2023	22.03.-15.05.	15.08.-15.11.
2	Mit FWEA off (nur im Trudelmodus)	2024	15.02.-15.05.	
2	Mit FWEA in Betrieb (im Trudelmodus, drehend oder schnell drehend)	2024		15.08.-15.11.

Tab. 2: Anzahl stündliche Flugaktivitätswerte der ziehenden Vögel pro Phase und Betriebszustand der FWEA in Abhängigkeit der Zeitperiode (Frühling: 15.02. bis 15.05., Herbst: 15.08. bis 15.11.) und der Tageszeit.

Phase	Präsenz und Betriebszustand FWEA	Frühlingszug		Herbstzug	
		Tag	Nacht	Tag	Nacht
1	Ohne FWEA	3.711	2.718	4.297	3.853
2	Mit FWEA off (nur im Trudelmodus)	2.040	1.402	2.112	1.970
2	Mit FWEA on, drehend	0	0	241	81
2	Mit FWEA on, schnell drehend	0	0	224	79

In allen Phasen (Phase 1: ohne FWEA [2019-2022], Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus [2023/2024], Phase 2: mit FWEA drehend [2024]) zeigt der Jahresverlauf der Flugaktivität der Vögel den typischen Verlauf mit den Zu- und Abnahmen im Verlauf des Herbstes und des Frühlings (= Zugzeiten, Abb. 2). Diese Muster sind auch im spezifisch ausgewählten Höhenbereich bezüglich der Rotoren der FWEA ersichtlich (Abb. 3). Im Winter ist die lokale Flugaktivität natürlicherweise sehr niedrig. Im Sommer ist ebenfalls eine gewisse Flugaktivität vorhanden, welche die Bewegungen der lokalen Vögel vor Ort widerspiegelt, insbesondere auch die Flugaktivität von Schwalben und Seglern.

Vereinigt über die beiden Hauptzugzeiten, waren im Projektgebiet bis zu einer Höhe von 1.100 m ü.B. während Phase 1 (ohne FWEA, 2019-2022) tagsüber rund 170 Vögel pro km und h (\pm sd 345) und nachts über 615 Vögel pro km und h (\pm sd 1.005) unterwegs. In Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (2023/2024) waren die Werte mit 135 Vögel pro km und h (\pm sd 275) tagsüber und mit 545 Vögel pro km und h (\pm sd 805) nachts über etwas tiefer als in Phase 1. Für die Phase 2: mit FWEA drehend (2024) liegen erst Werte für eine Herbstsaison vor. Die Flugaktivität ziehender Vögel betrug am Tag 110 Vögel pro km und h (\pm sd 210) und in der Nacht

575 Vögel pro km und h (\pm sd 535). Die nach Saison und Tageszeit aufgeteilten Mittelwerte können Tab. 3 entnommen werden.

Im Höhenbereich von 50 – 120 m (Rotorbereich FWEA) lagen die über die beiden Hauptzugzeiten gepoolten Flugaktivitätswerte in Phase 1 (ohne FWEA, 2019-2022) bei 65 Vögel pro km und h (\pm sd 140) am Tag und bei 100 Vögeln pro km und h (\pm sd 205) in der Nacht (Tab. 1). In Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (2023/2024) beliefen sich die Werte tagsüber auf 45 Vögel pro km und h (\pm sd 85) und nachts auf 90 Vögel pro km und h (\pm sd 135). Mit drehenden FWEA im Herbst 2024 lag die Flugaktivität im Mittel bei 35 Vögel pro km und h (\pm sd 60) am Tag und bei 90 Vögel pro km und h (\pm sd 100) in der Nacht. Die nach Saison und Tageszeit aufgeteilten Mittelwerte können Tab. 3 entnommen werden.

Insgesamt scheint die Flugaktivität (Tab. 3) mit FWEA off (im Trudelmodus) und mit drehenden FWEA in beiden betrachteten Höhenbereichen tiefer zu liegen als in Phase 1 (ohne FWEA). Die im Vergleich zu Phase 1 tieferen Werte der mittleren Flugaktivität der Vögel im Allgemeinen beruhte vor allem auf einer Abnahme der Flugaktivität des Flugtyps „Singvögel“. Bei den Flugtypen „Wasservögel“ und „Segler“ traten keine solchen Effekte auf (Tab. 4 bis Tab. 6).

In der Nacht machten kleine Singvögel sowohl im Frühling wie auch im Herbst in allen Phasen und Höhenbereichen den größten Anteil der Zugvögel aus (Tab. 7 bis Tab. 10). Dies gilt auch für den Tag in Phase 1: ohne FWEA und in Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus. Lediglich in Phase 2: mit FWEA drehend war der Anteil der Singvögel im Herbst 2024 tagsüber in beiden Höhenbereichen mit knapp 30% (50-1.100 m ü.B.) und rund 35% (50-120 m ü.B.) deutlich kleiner als tagsüber in den anderen Phasen mit rund 50% und mehr.

In Phase 1: ohne FWEA und in Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus liegen in beiden Höhenbereichen die meisten Flügelschlagfrequenzen tagsüber im Bereich von 15 – 20 Hz, und nachts über tritt zusätzlich ein Peak im Bereich von 10 Hz/11 Hz auf (Ausnahme Frühling Höhenbereich 50-120 m ü.B.). Der Frequenzbereich von 15 – 20 Hz lässt auf Arten wie Finken, Grasmücken, Stelzen und Laubsänger sowie der Frequenzbereich von 10 Hz/11 Hz auf Arten wie Drosseln, Stare, Lerchen und Schwalben schließen (Bruderer et al. 2010). In Phase 2: FWEA drehend und schnell drehend im Herbst 2024 sind tagsüber nur noch sehr wenige Echos übrig, so dass die Verteilung wenig repräsentativ ist. In der Nacht nimmt der Peak im Frequenzbereich 10 Hz/11 Hz im Vergleich zu Phase 1: ohne FWEA und Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus stark ab.

Die Flugrichtungen verlaufen tagsüber in beiden Höhenbereichen sowohl in Phase 1: ohne FWEA wie auch in Phase 2: mit FWEA im Trudelbetrieb klar in Richtung NO im Frühling und in Richtung SW im Herbst (Abb. 10 bis Abb. 13). In Phase 2: mit WEA drehend und schnell drehend ist in der Verteilung im Herbst im Höhenbereich 50-1.100 m ü.B. eine mehr südlich gerichtete Tendenz erkennbar (Abb. 12). In der Nacht ist für diesen Höhenbereich in Phase 2: mit FWEA drehend und schnell drehend hingegen keine solche Tendenz ersichtlich. Im Höhenbereich 50-120 m ü.B. ist das Muster für Phase 2: mit FWEA drehend und schnell drehend unklar, da zu wenige Echos enthalten sind (Abb. 13). Generell scheinen die Verteilungen in der Nacht im Vergleich zum Tag im Frühling jeweils stärker östlich (ONO) und im Herbst stärker westlich (WSW) ausgerichtet zu sein. Lediglich im Höhenbereich 50-120 m ü.B. ist dieses Muster im Frühling weniger stark ausgeprägt (Abb. 11).

Im Vergleich zu Phase 1: ohne FWEA weisen die Höhenverteilungen des Vogelzugs in Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus und Phase 2: mit FWEA drehend und schnell drehend insbesondere in den unteren Höhenintervallen eine geringere Flugaktivität auf (Abb. 14 und Abb. 15).

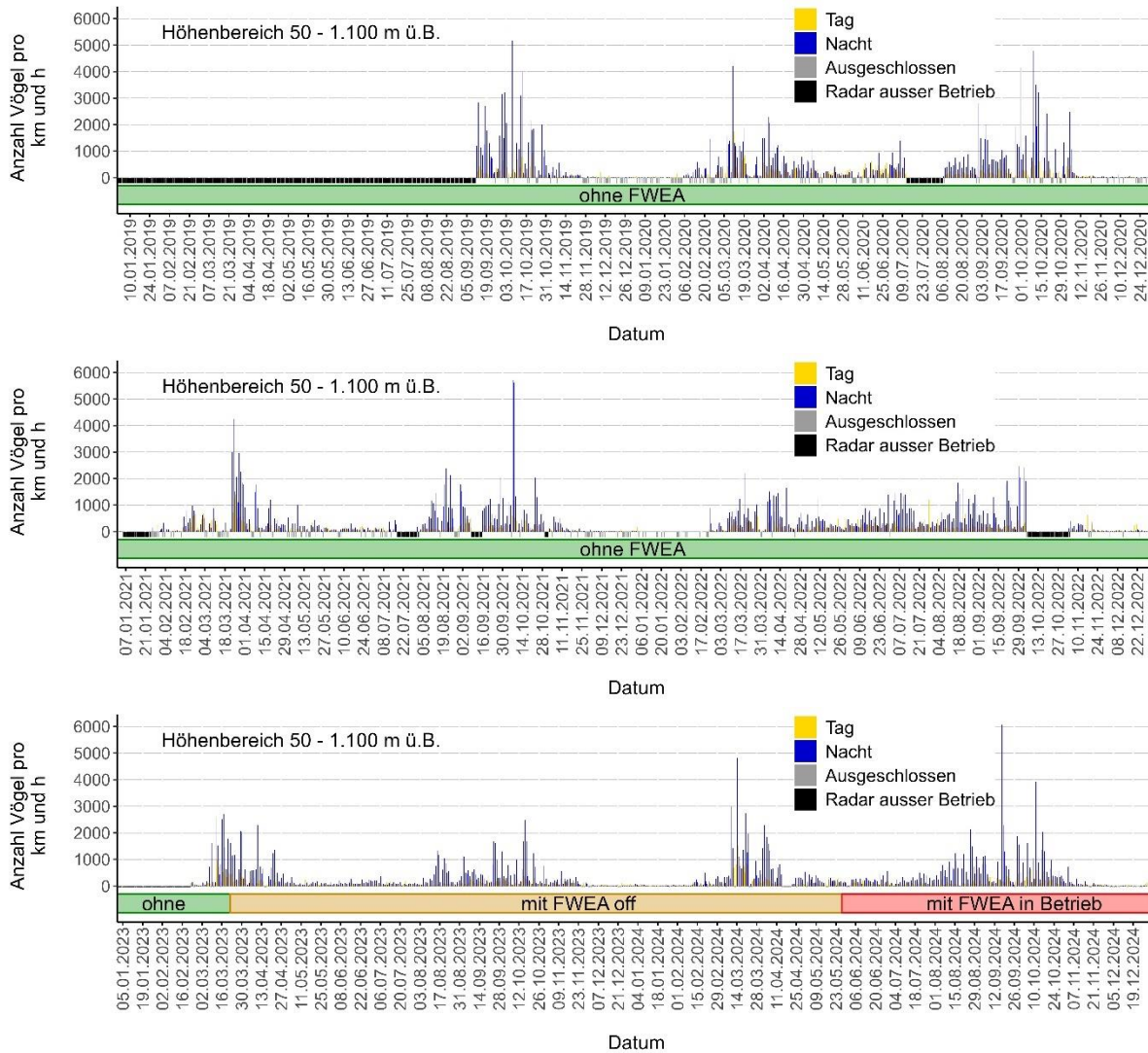


Abb. 2: Saisonaler Verlauf der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Vögeln im Höhenbereich von 50–1.100 m ü.B. Von 2019/2020 (oben), von 2021/2022 (Mitte) und 2023/2024 (unten) in Abhängigkeit der Phasen (Balken unter der Nulllinie: Phase 1: ohne FWEA (grün), Phase 2: mit FWEA off (orange, nur im Trudelmodus) und Phase 2: mit FWEA in Betrieb (rot, im Trudelmodus, drehend oder schnell drehend)). Ausgeschlossen: Aufgrund von einer zu geringen Beobachtungszeit (z.B. wegen Niederschlag) wurde keine Flugaktivität berechnet.

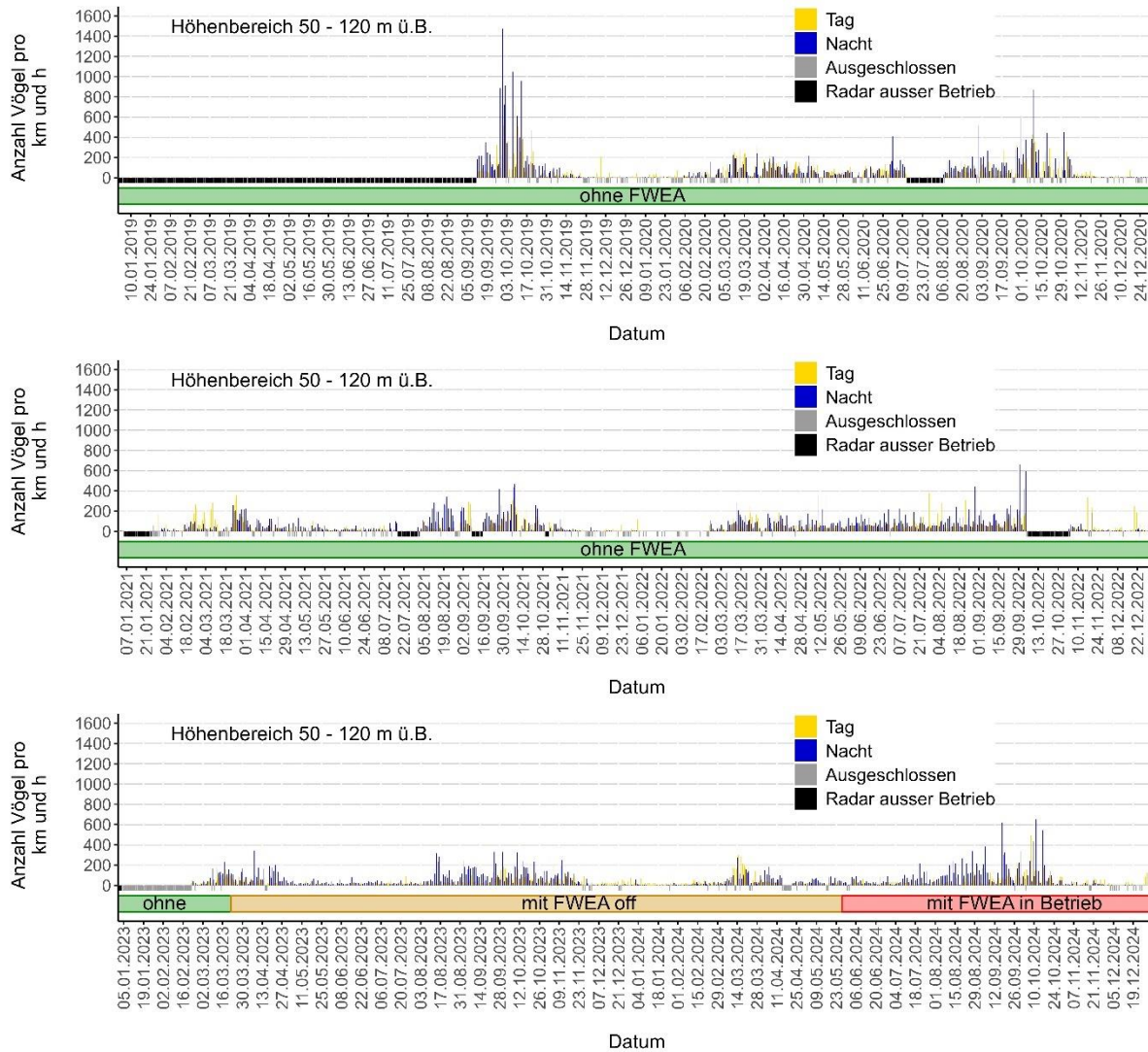


Abb. 3: Saisonaler Verlauf der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Vögeln im Höhenbereich von 50 – 120 m ü.B. Von 2019/2020 (oben), von 2021/2022 (Mitte) und 2023/2024 (unten) in Abhängigkeit der Phasen (Balken unter der Nulllinie: Phase 1: ohne FWEA (grün), Phase 2: mit FWEA off (orange, nur im Trudelmodus) und Phase 2: mit FWEA in Betrieb (rot, im Trudelmodus, drehend oder schnell drehend)). Ausgeschlossen: Aufgrund von einer zu geringen Beobachtungszeit (z.B. wegen Niederschlag) wurde keine Flugaktivität berechnet.

Tab. 3: Mittlere Flugaktivität aller Vögel (Anzahl ziehende Vögel pro km und h) mit Standardabweichung (\pm sd). Pro Höhenbereich zur Hauptzugzeit im Frühling und Herbst am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit der Phase (Phase 1: ohne FWEA 2019-2022. Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus 2023/2024, Phase 2: mit FWEA drehend 2024, Phase 2: mit FWEA schnell drehend 2024).

Höhenbereich (m)	Saison	Tageszeit	ohne FWEA	mit FWEA off	mit FWEA on	mit FWEA on >37,7 km/h
50-1.100	Frühling	Tag	175 (385)	135 (315)	NA	NA
		Nacht	500 (770)	525 (825)	NA	NA
	Herbst	Tag	160 (300)	135 (230)	110 (210)	110 (215)
		Nacht	690 (1.140)	560 (790)	575 (535)	580 (540)
50-120	Frühling	Tag	55 (105)	35 (70)	NA	NA
		Nacht	65 (95)	55 (95)	NA	NA
	Herbst	Tag	70 (165)	55 (95)	35 (60)	40 (60)
		Nacht	125 (255)	115 (150)	90 (100)	90 (100)

Tab. 4: Mittlere Flugaktivität „Singvögel“ (Anzahl ziehende „Singvögel“ pro km und h) mit Standardabweichung (\pm sd). Pro Höhenbereich zur Hauptzugzeit im Frühling und Herbst am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit der Phase (Phase 1: ohne FWEA 2019-2022. Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus 2023/2024, Phase 2: mit FWEA drehend 2024, Phase 2: mit FWEA schnell drehend 2024).

Höhenbereich (m)	Saison	Tageszeit	ohne FWEA	mit FWEA off	mit FWEA on	mit FWEA on >37,7 km/h
50-1.100	Frühling	Tag	100 (250)	85 (230)	NA	NA
		Nacht	260 (400)	300 (465)	NA	NA
	Herbst	Tag	75 (195)	70 (145)	30 (65)	30 (65)
		Nacht	450 (775)	400 (610)	430 (415)	435 (420)
50-120	Frühling	Tag	40 (90)	25 (60)	NA	NA
		Nacht	50 (75)	50 (85)	NA	NA
	Herbst	Tag	40 (120)	35 (75)	13 (25)	15 (25)
		Nacht	105 (225)	100 (130)	75 (90)	75 (90)

Tab. 5: Mittlere Flugaktivität „Wasservögel“ (Anzahl ziehende „Wasservögel“ pro km und h) mit Standardabweichung (\pm sd). Pro Höhenbereich zur Hauptzugzeit im Frühling und Herbst am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit der Phase (Phase 1: ohne FWEA 2019-2022. Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus 2023/2024, Phase 2: mit FWEA drehend 2024, Phase 2: mit FWEA schnell drehend 2024).

Höhenbereich (m)	Saison	Tageszeit	ohne FWEA	mit FWEA off	mit FWEA on	mit FWEA on >37,7 km/h
50-1.100	Frühling	Tag	1 (6)	1 (4)	NA	NA
		Nacht	55 (110)	60 (145)	NA	NA
	Herbst	Tag	2 (8)	2 (10)	1 (4)	1 (4)
		Nacht	45 (95)	45 (70)	25 (30)	25 (30)
50-120	Frühling	Tag	0.5 (3)	0.2 (2)	NA	NA
		Nacht	4 (12)	2 (5)	NA	NA
	Herbst	Tag	0.7 (5)	1 (6)	0.6 (3)	0.5 (2)
		Nacht	4 (10)	5 (15)	3 (8)	3 (8)

Tab. 6: Mittlere Flugaktivität „Segler“ (Anzahl ziehende „Segler“ pro km und h) mit Standardabweichung (\pm sd). Pro Höhenbereich zur Hauptzugzeit im Frühling und Herbst am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit der Phase (Phase 1: ohne FWEA 2019-2022. Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus 2023/2024, Phase 2: mit FWEA drehend 2024, Phase 2: mit FWEA schnell drehend 2024).

Höhenbereich (m)	Saison	Tageszeit	ohne FWEA	mit FWEA off	mit FWEA on	mit FWEA on >37,7 km/h
50-1.100	Frühling	Tag	15 (25)	10 (20)	NA	NA
		Nacht	7 (20)	9 (25)	NA	NA
	Herbst	Tag	30 (75)	25 (70)	35 (70)	35 (70)
		Nacht	10 (35)	15 (40)	15 (25)	15 (25)
50-120	Frühling	Tag	6 (15)	5 (15)	NA	NA
		Nacht	3 (10)	3 (15)	NA	NA
	Herbst	Tag	15 (50)	13 (35)	17 (35)	17 (40)
		Nacht	5 (15)	6 (25)	7 (10)	7 (10)

Tab. 7: Mittels Radar im Höhenbereich von 50 – 1.100 m ü.B. ermittelte Zusammensetzung des Vogelzugs nach Flugtypen (prozentuale Anteile). Zur Hauptzugzeit im Frühling am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit der Phase (Phase 1: ohne FWEA und Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus).

50 – 1.100 m ü. B.	ohne FWEA (Frühling 2020-2022)		mit FWEA off (Frühling 2023/2024)	
	Tag	Nacht	Tag	Nacht
Flugtypen				
Singvogel	57,0	51,7	62	57,8
Wasservogel	0,8	10,9	0,7	11,1
Segler	7,5	1,5	8,1	1,7
Großvogel	4,2	0,3	4,3	0,3
Schwarm	4,2	0,3	4,2	0,3
unbekannt	26,3	35,3	20,7	28,8
Total (%)	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab. 8: Mittels Radar im Höhenbereich von 50 – 120 m ü.B. ermittelte Zusammensetzung des Vogelzugs nach Flugtypen (prozentuale Anteile). Zur Hauptzugzeit im Frühling am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit der Phase (Phase 1: ohne FWEA und Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus).

50 – 120 m ü. B.	ohne FWEA (Frühling 2020-2022)		mit FWEA off (Frühling 2023/2024)	
	Tag	Nacht	Tag	Nacht
Flugtypen				
Singvogel	67,5	77,3	76,9	88,9
Wasservogel	0,8	5,8	0,7	3,3
Segler	10,5	4,9	14,3	5,4
Großvogel	2,6	0,3	3,4	0,4
Schwarm	2,0	0,2	2,6	0,2
unbekannt	16,6	11,5	2,1	1,8
Total (%)	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab. 9: Mittels Radar im Höhenbereich von 50 – 1.100 m ü.B. ermittelte Zusammensetzung des Vogelzugs nach Flugtypen (prozentuale Anteile). Zur Hauptzugzeit im Herbst am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit der Phase (Phase 1: ohne FWEA, Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus, Phase 2: mit FWEA drehend und Phase 2: mit FWEA schnell drehend).

50 – 1.100 m ü. B. (Herbst)	ohne FWEA (Herbst 2019-2022)		mit FWEA off (Herbst 2023/2024)		mit FWEA on (Herbst 2024)		mit FWEA on, >37,7 km/h (Herbst 2024)	
	Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht
Flugtypen								
Singvogel	46,0	64,9	52,4	71,3	28,9	74,9	29,1	74,8
Wasservogel	1,3	6,7	1,7	7,7	0,9	4,4	0,9	4,4
Segler	17,5	1,8	19,0	2,5	33,5	3,0	33,2	2,9
Großvogel	7,0	0,1	5,6	0,3	10,3	0,1	10,2	0,1
Schwarm	4,6	0,2	4,2	0,2	1,5	0,1	1,6	0,1
unbekannt	23,6	26,3	17,1	18,0	24,9	17,5	25,0	17,7
Total (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab. 10: Mittels Radar im Höhenbereich von 50 – 120 m ü.B. ermittelte Zusammensetzung des Vogelzugs nach Flugtypen (prozentuale Anteile). Zur Hauptzugzeit im Herbst am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit der Phase (Phase 1: ohne FWEA, Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus, Phase 2: mit FWEA drehend und Phase 2: mit FWEA schnell drehend).

50 – 120 m ü. B. (Herbst)	ohne FWEA (Herbst 2019-2022)		mit FWEA off (Herbst 2023/2024)		mit FWEA on (Herbst 2024)		mit FWEA on, >37,7 km/h (Herbst 2024)	
	Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht
Flugtypen								
Singvogel	56,0	85,2	64,7	86,4	35,4	85,6	36,0	85,3
Wasservogel	1,1	2,8	1,9	4,0	1,6	3,6	1,3	3,7
Segler	22,6	3,9	23,8	5,5	46,9	7,8	46,3	7,9
Großvogel	5,1	0,2	3,8	0,9	10,0	0,2	10,3	0,3
Schwarm	2,8	0,1	2,2	0,1	1,2	0,0	1,3	0,0
unbekannt	12,4	7,8	3,6	3,1	4,9	2,8	4,8	2,8
Total (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

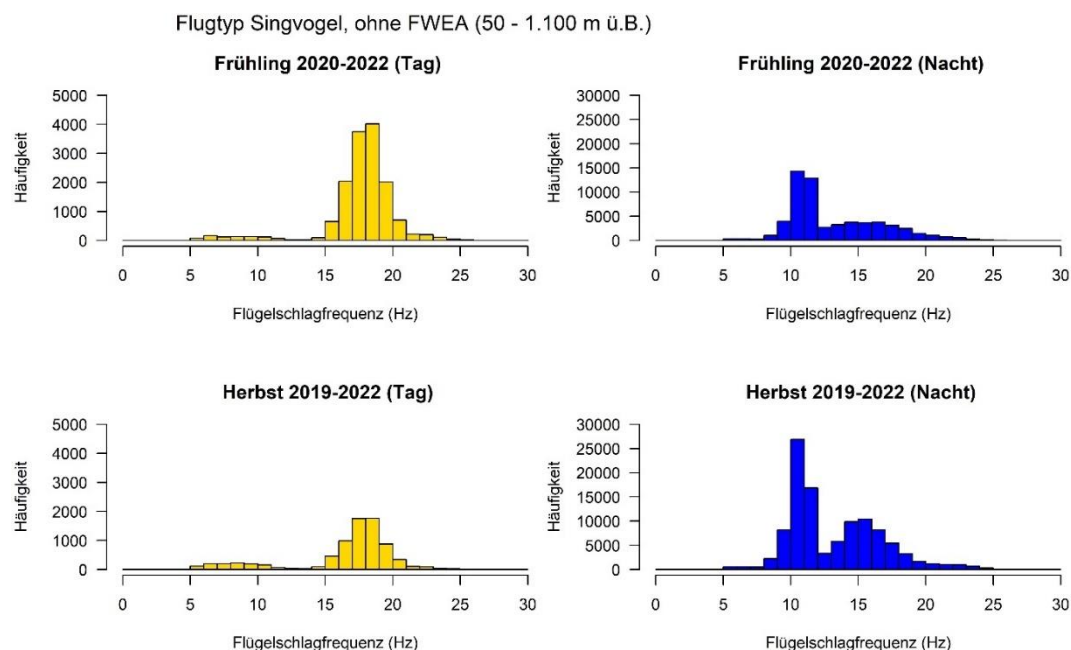


Abb. 4: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flügel Schlagfrequenzen ziehender Vögel. Am Tag (gelb) und in der Nacht (blau) zur Hauptzugzeit im Frühling (oben, 15.02. bis 15.05.) und im Herbst (unten, 15.08. bis 15.11.) während Phase 1: ohne FWEA. Frühling Tag N=15.407, Frühling Nacht N=72.880, Herbst Tag N=8.589, Herbst Nacht N=120.675. N=Anzahl Echos.

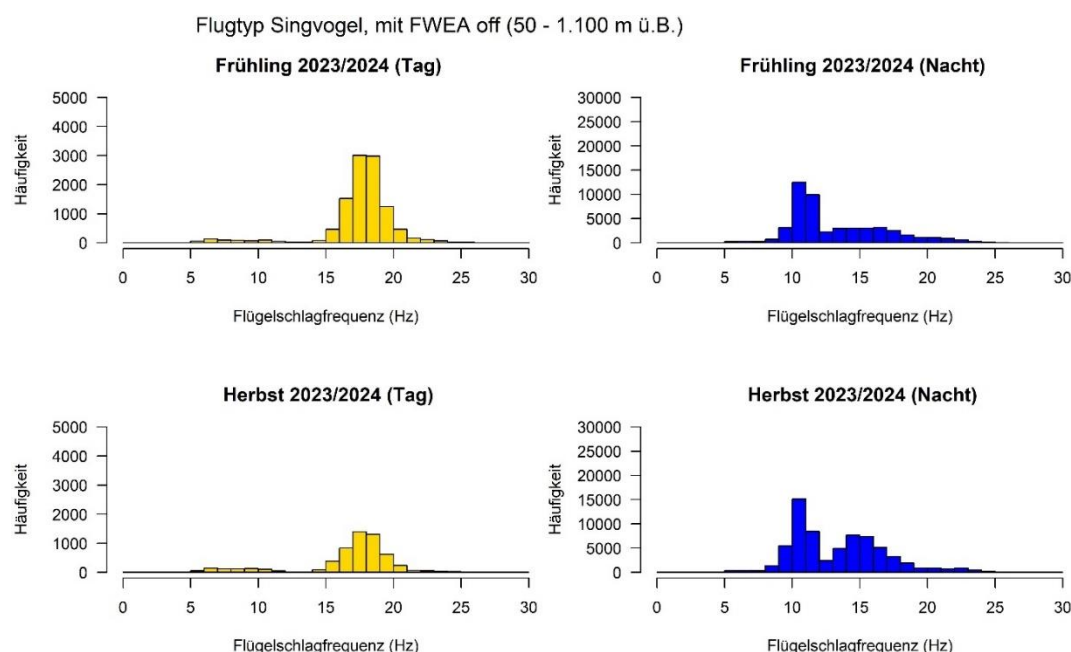


Abb. 5: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flügel Schlagfrequenzen ziehender Vögel. Am Tag (gelb) und in der Nacht (blau) zur Hauptzugzeit im Frühling (oben, 15.02. bis 15.05.) und im Herbst (unten, 15.08. bis 15.11.) während Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus. Frühling Tag N=11.117, Frühling Nacht N=61.575, Herbst Tag N=6.366, Herbst Nacht N=77.797. N=Anzahl Echos.

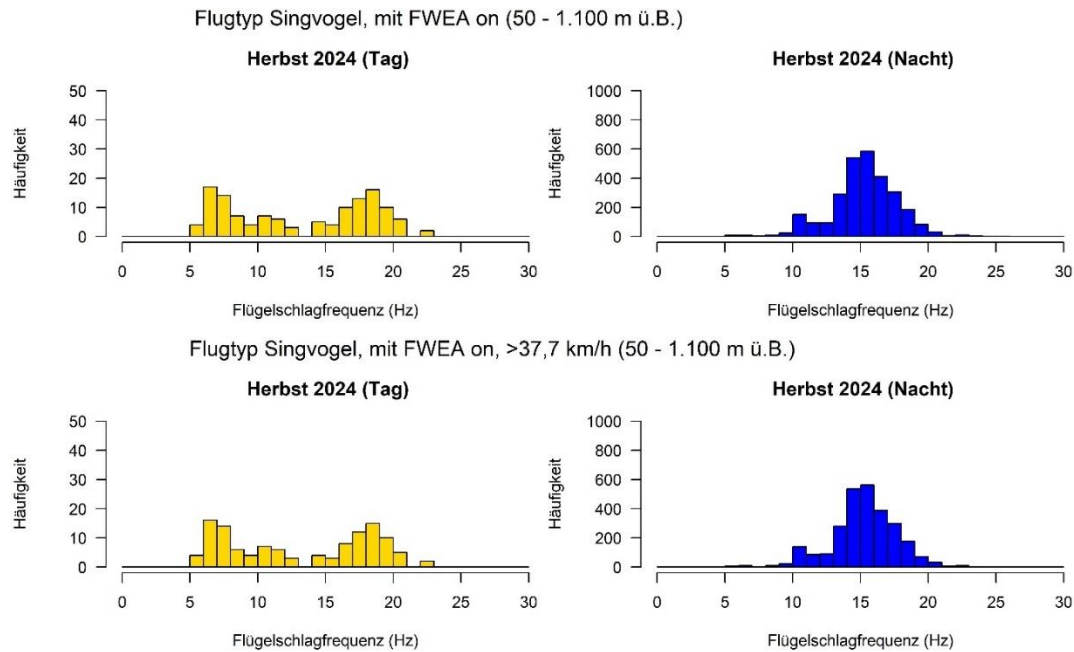


Abb. 6: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flügel Schlagfrequenzen ziehender Vögel. Am Tag (gelb) und in der Nacht (blau) zur Hauptzugzeit im Herbst (15.08. bis 15.11.) während Phase 2: mit FWEA drehend (oben) und mit FWEA schnell drehend (>37,7 km/h, unten). Zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts waren für die Frühlingsperiode noch keine Daten vorhanden, die mit drehenden FWEA gesammelt werden konnten. Herbst Tag FWEA drehend N=181, Herbst Nacht FWEA drehend N=2.995, Herbst Tag FWEA schnell drehend N=170, Herbst Nacht FWEA schnell drehend N=2.873. N=Anzahl Echos.

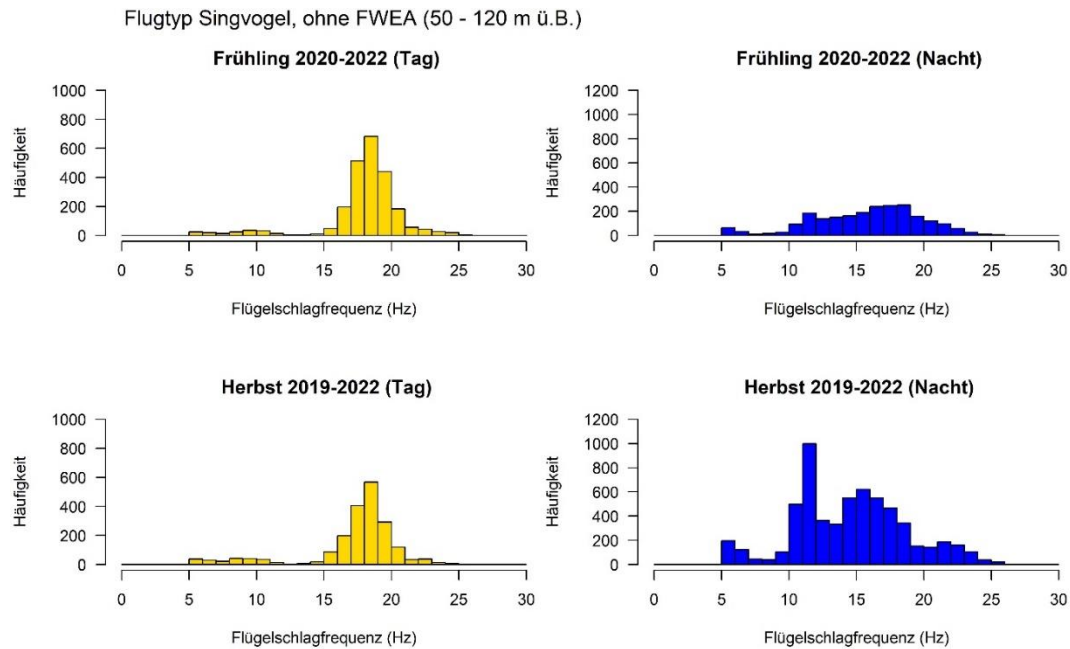


Abb. 7: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-120 m ü.B. ermittelten Flügelschlagfrequenzen ziehender Vögel. Am Tag (gelb) und in der Nacht (blau) zur Hauptzugzeit im Frühling (oben, 15.02. bis 15.05.) und im Herbst (unten, 15.08. bis 15.11.) während Phase 1: ohne FWEA. Frühling Tag N=2.425, Frühling Nacht N=3.381, Herbst Tag N=2.125, Herbst Nacht N=6.183. N=Anzahl Echos.

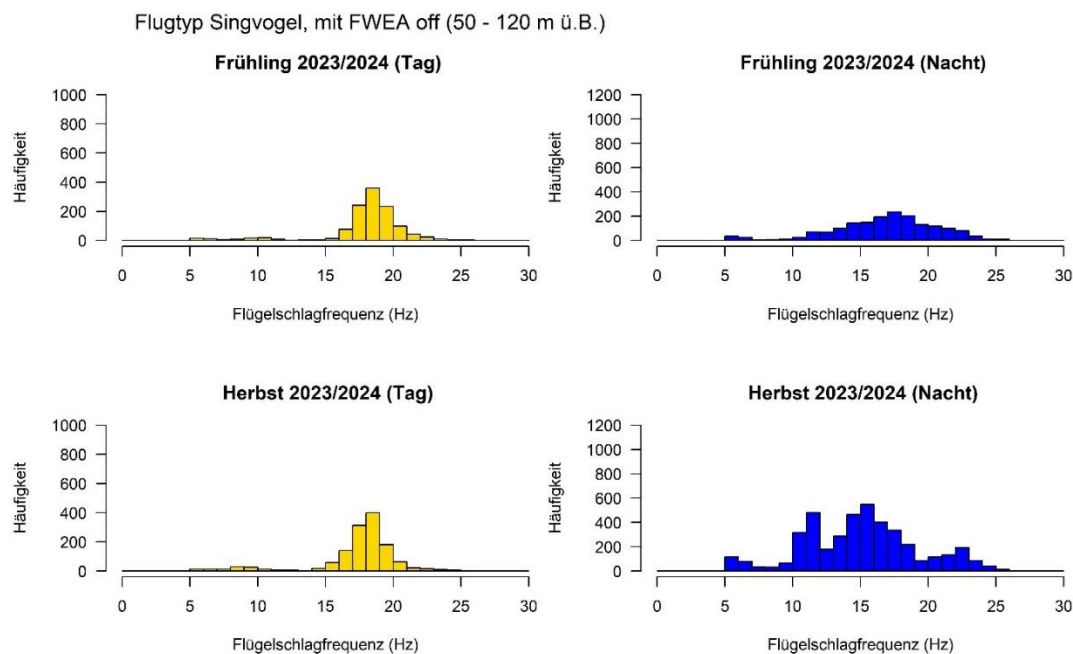


Abb. 8: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-120 m ü.B. ermittelten Flügelschlagfrequenzen ziehender Vögel. Am Tag (gelb) und in der Nacht (blau) zur Hauptzugzeit im Frühling (oben, 15.02. bis 15.05.) und im Herbst (unten, 15.08. bis 15.11.) während Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus. Frühling Tag N=1.244, Frühling Nacht N=1.815, Herbst Tag N=1.442, Herbst Nacht N=4.387. N=Anzahl Echos.

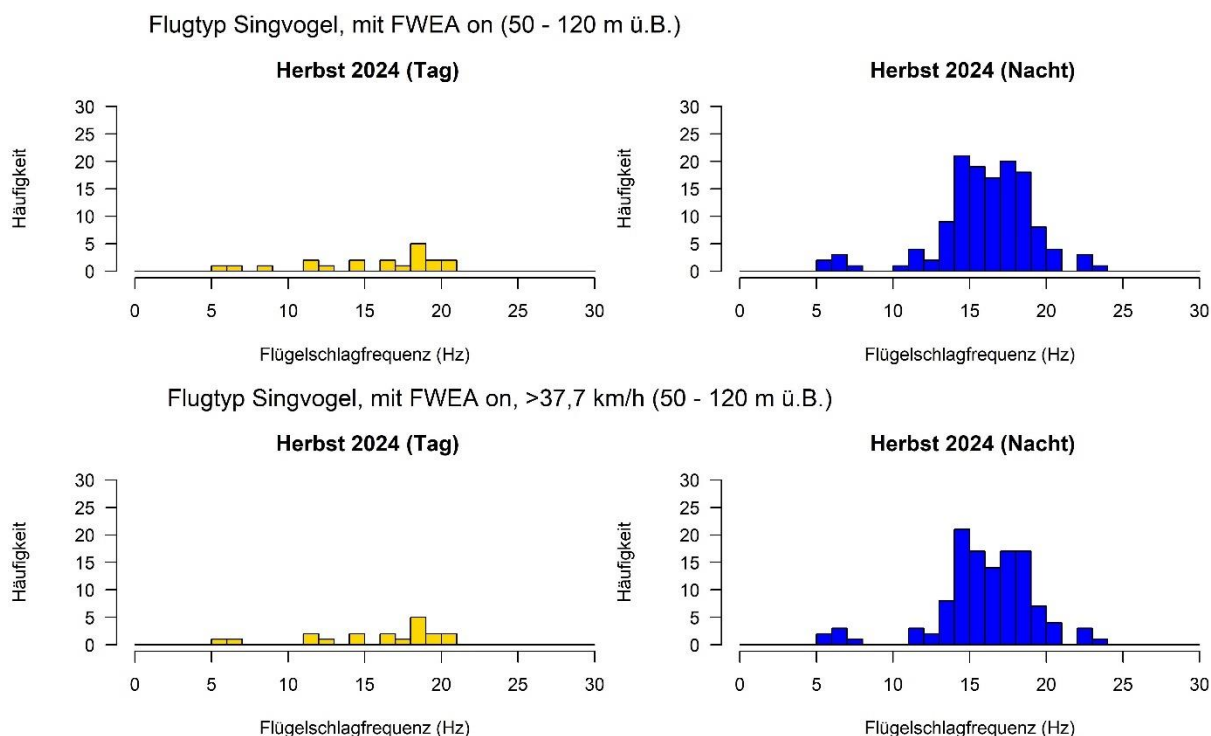


Abb. 9: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-120 m ü.B. ermittelten Flügelschlagfrequenzen ziehender Vögel. Am Tag (gelb) und in der Nacht (blau) zur Hauptzugzeit im Herbst (15.08. bis 15.11.) während Phase 2: mit FWEA drehend (oben) und mit FWEA schnell drehend (>37,7 km/h, unten). Zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts waren für die Frühlingsperiode noch keine Daten vorhanden, die mit drehenden FWEA gesammelt werden konnten. Herbst Tag FWEA drehend N=35, Herbst Nacht FWEA drehend N=141, Herbst Tag FWEA schnell drehend N=33, Herbst Nacht FWEA schnell drehend N=128. N=Anzahl Echos.

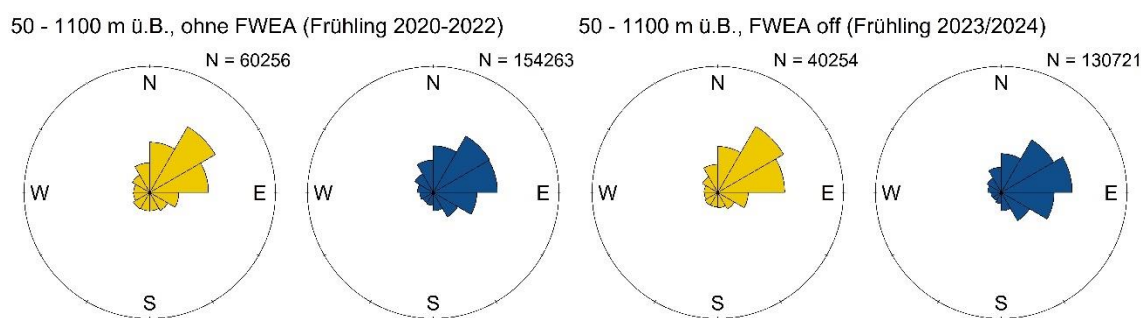


Abb. 10: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen ziehender Vögel. Am Tag (gelb) und in der Nacht (blau) zur Hauptzugzeit im Frühling (15.02 bis 15.05.) während Phase 1: ohne FWEA (links, 2020-2022) und Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (rechts, 2023/2024). N=Anzahl Echos. Zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts waren für die Frühlingsperiode noch keine Daten vorhanden, die mit laufenden FWEA gesammelt werden konnten.

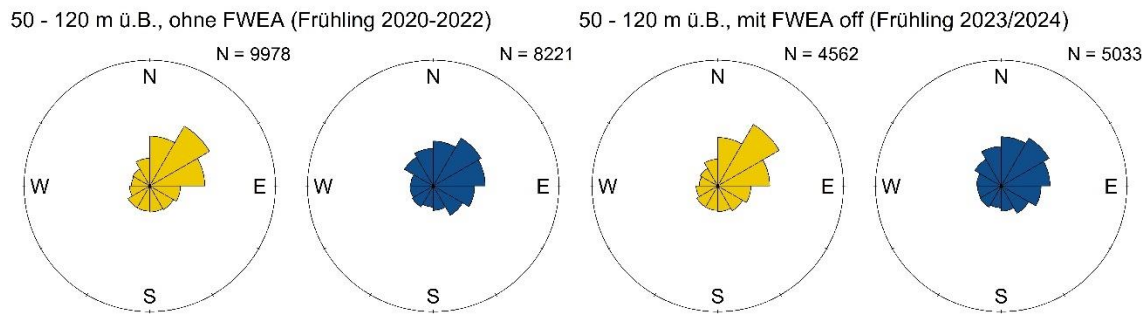


Abb. 11: Verteilung der mittels Radar 50-120 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen ziehender Vögel. Am Tag (gelb) und in der Nacht (blau) zur Hauptzugzeit im Frühling (15.02 bis 15.05.) während Phase 1: ohne FWEA (links, 2020-2022) und Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (rechts, 2023/2024). N=Anzahl Echos. Zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts waren für die Frühlingsperiode noch keine Daten vorhanden, die mit laufenden FWEA gesammelt werden konnten.

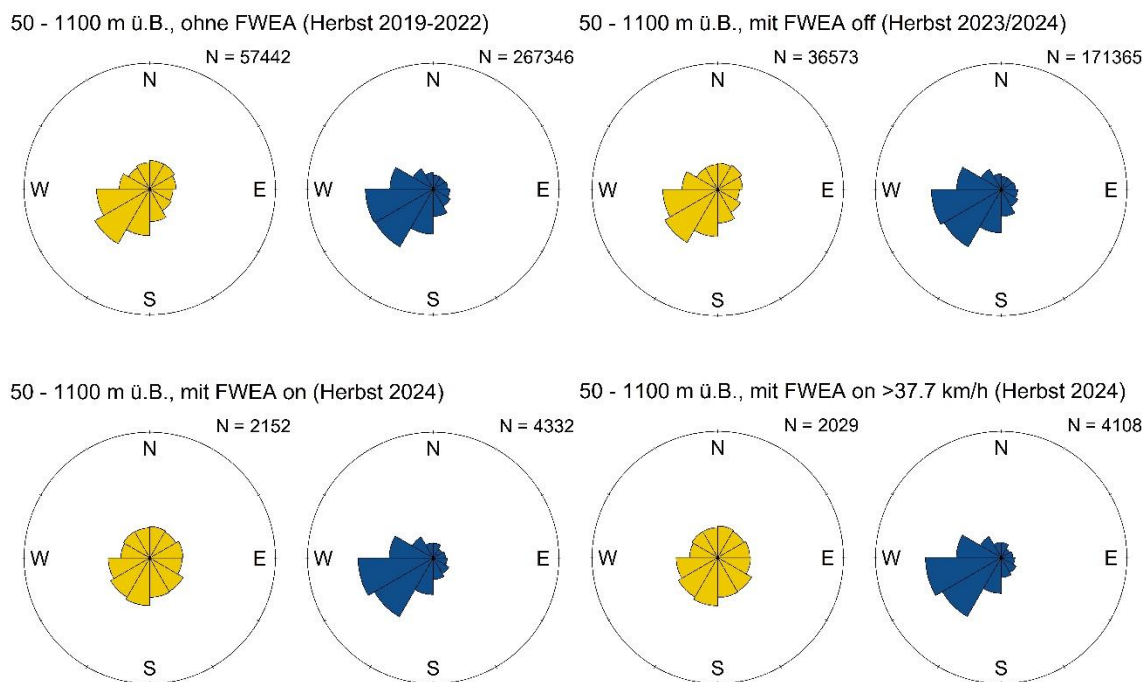


Abb. 12: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen ziehender Vögel. Am Tag (gelb) und in der Nacht (blau) zur Hauptzugzeit im Herbst (15.08. bis 15.11.) während Phase 1: ohne FWEA (oben links, 2019-2022), Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (oben rechts, 2023/2024), Phase 2: mit FWEA drehend (unten links, 2024) und Phase 2: mit FWEA schnell drehend (>37,7 km/h, unten rechts, 2024). N=Anzahl Echos.

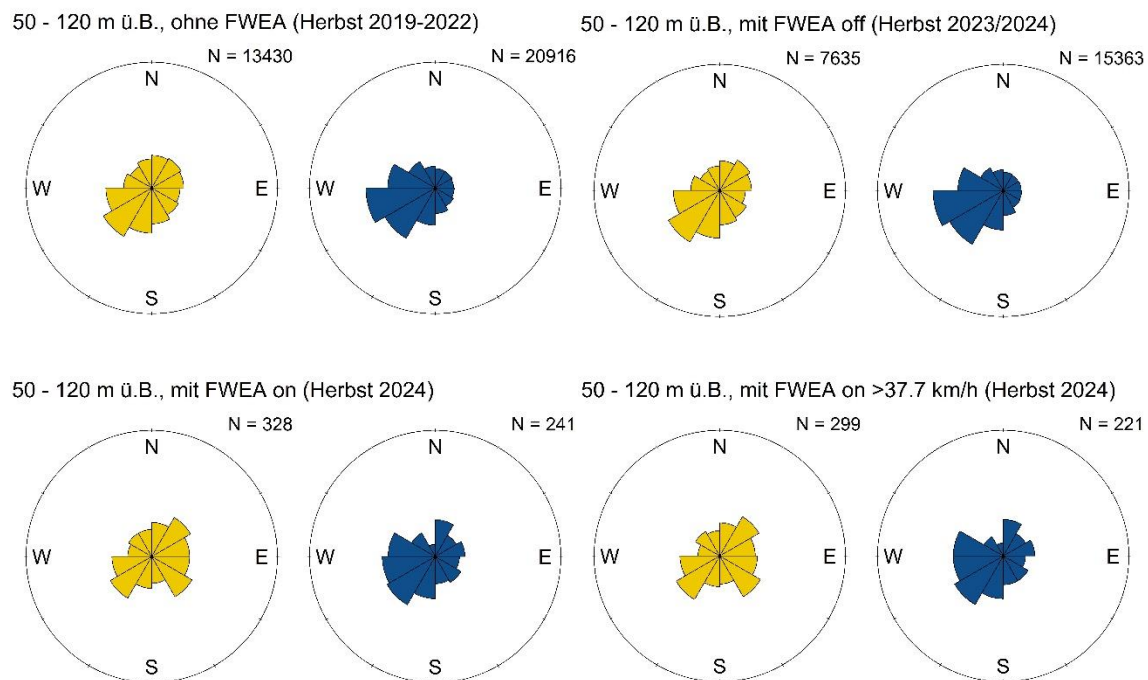


Abb. 13: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-120 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen ziehender Vögel. Am Tag (gelb) und in der Nacht (blau) zur Hauptzugzeit im Herbst (15.08. bis 15.11.) während Phase 1: ohne FWEA (oben links, 2019-2022), Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (oben rechts, 2023/2024), Phase 2: mit FWEA drehend (unten links, 2024) und Phase 2: mit FWEA schnell drehend (>37,7 km/h, unten rechts, 2024). N=Anzahl Echos.

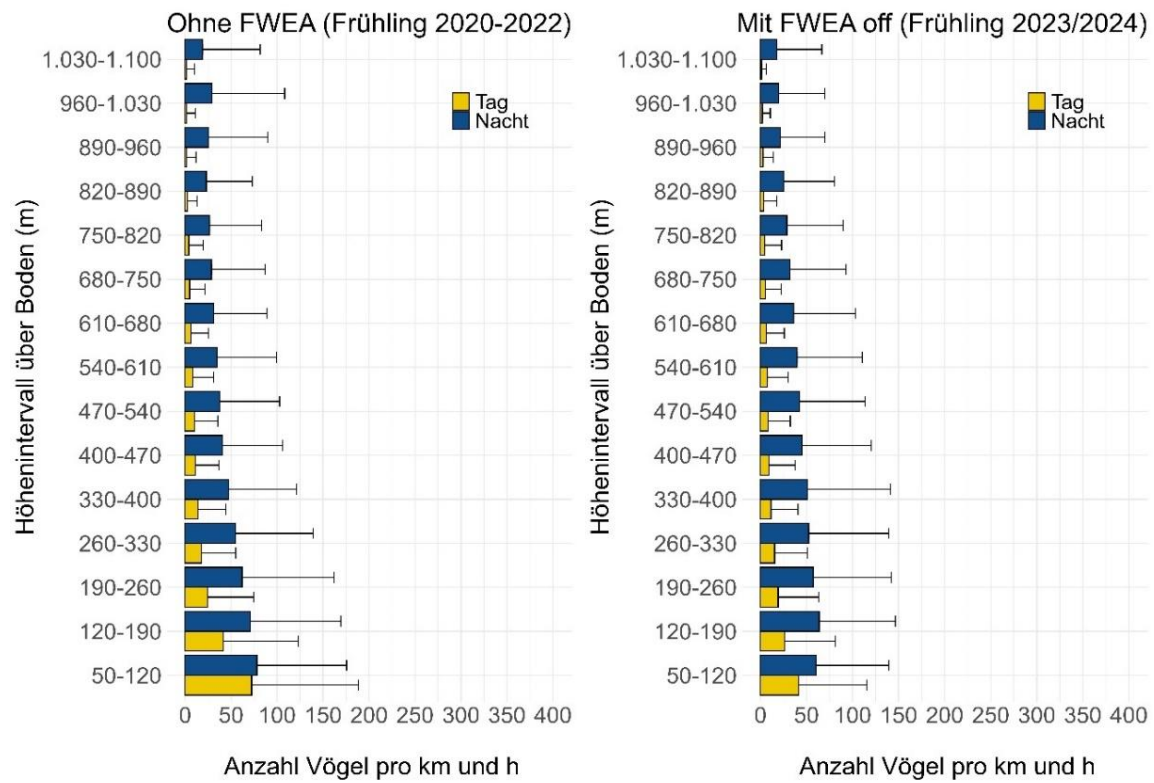


Abb. 14: Höhenverteilung der mittels Radar ermittelten Flugaktivität ziehender Vögel zur Hauptzugzeit im Frühling (15.02. bis 15.05.). Während Phase 1: ohne FWEA (links, 2020-2022, N=96.390) und Phase 2: FWEA im Trudelmodus (rechts, 2023/2024, N=51.600). Zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts waren für die Frühlingsperiode noch keine Daten vorhanden, die mit laufenden FWEA gesammelt werden konnten. N=stündliche Werte.

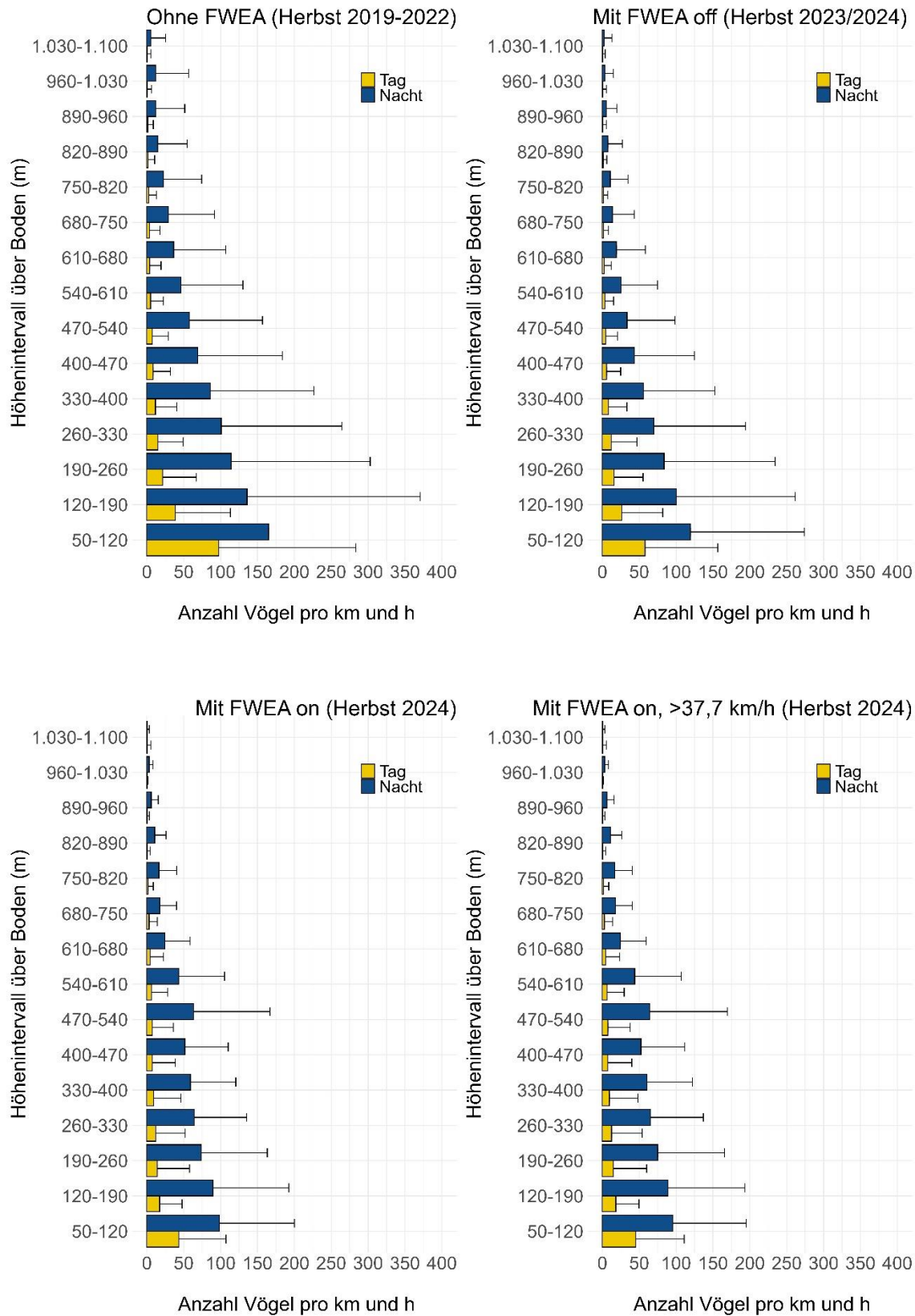


Abb. 15: Höhenverteilung der mittels Radar ermittelten Flugaktivität ziehender Vögel zur Hauptzugzeit im Herbst (15.08 bis 15.11.). Während Phase 1 (oben links, 2019-2022, N=96.390), Phase 2: FWEA im Trudelmodus (oben rechts, 2023/2024, N=61.695), Phase 2: mit FWEA drehend (unten links, 2024, N=4.830) und Phase 2: mit FWEA schnell drehend (>37,7 km/h, unten rechts, 2024, N=4.454). N=stündliche Werte.

1.2.4 Radardaten Insekten und Ergebnisse

Die Standardauswertung für Insekten wurde jeweils für den Höhenbereich 50-540 m ü.B. und für den Höhenbereich 50-120 m ü.B. (Höhenbereich der Rotoren der FWEA, Musiol et al. 2023) sowie getrennt für Tag und Nacht durchgeführt. Anders als bei den Vögeln sind für die mit dem vorhandenen Radar erfassten Insekten keine Zeitperioden offensichtlich, die für Insekten als Zugzeit eingestuft werden könnten. Im Jahresverlauf treten gerichtete Bewegungen von Insekten vor allem im Herbst auf (Shi et al. 2021), was auf ziehende Insekten hindeutet. Deshalb wurden die Insektendaten zeitlich in zwei Perioden eingeteilt (Frühling/Sommer: 01.03. – 15.08. und Herbst: 16.08. – 15.11.). Die Datengrundlagen wurden entsprechend dieser Zeitperioden den Phasen und den Betriebszuständen der FWEA zugeordnet (Tab. 11 und Tab. 12).

Die Standardauswertung betreffend der Flugaktivität von Insekten enthält den saisonalen Verlauf der Flugaktivität, die mittlere Flugaktivität, die Verteilung der Flugrichtungen und die Höhenverteilung. Auf die Darstellung der Verteilung der Flügelschlagfrequenzen wurde verzichtet, da bei der Bestimmung der Flügelschlagfrequenzen für Insekten noch optimierungsbedarf besteht.

Tab. 11: Liste der berücksichtigten Zeitperioden für Insekten in Abhängigkeit der Phase, des Betriebszustand der FWEA und der Jahre. Die Insektendaten aus dem Jahr 2023 wurden aufgrund des Sensitivitätsverlusts des Radargerätes ausgeschlossen.

Phase	Präsenz und Betriebszustand FWEA	Jahr	Frühling/Sommer	Herbst
1	Ohne FWEA	2019	-	14.10.-15.11.
1	Ohne FWEA	2020	01.03.-15.08.	16.08.-15.11.
1	Ohne FWEA	2021	01.03.-15.08.	16.08.-15.11.
1	Ohne FWEA	2022	01.03.-15.08.	16.08.-15.11.
2	Mit FWEA off (nur im Trudelmodus)	2023	22.03.-15.08.	16.08.-15.11.
2	Mit FWEA off (nur im Trudelmodus)	2024	15.03.-26.05.	
2	Mit FWEA in Betrieb (im Trudelmodus, drehend oder schnell drehend)	2024	27.05.-15.08.	16.08.-15.11.

Tab. 12: Anzahl stündliche Flugaktivitätswerte von Insekten pro Phase und Betriebszustand der FWEA in Abhängigkeit der Zeitperiode (Frühling/Sommer: 01.03. bis 15.08., Herbst: 16.08. bis 15.11.) und der Tageszeit.

Phase	Präsenz und Betriebszustand FWEA	Frühling/Sommer		Herbst	
		Tag	Nacht	Tag	Nacht
1	Ohne FWEA	7.873	4.148	4.806	2.430
2	Mit FWEA off (nur im Trudelmodus)	2.454	1.279	937	950
2	Mit FWEA on, drehend	161	101	241	81
2	Mit FWEA on, schnell drehend	116	74	224	79

Der Jahresverlauf der Flugaktivität der Insekten (Anzahl Insekten pro km und h) weist in allen Phasen (Phase 1: ohne FWEA [2019-2022], Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus [2023/2024], Phase 2: mit FWEA drehend [2024]) ein ähnliches Muster auf. Dabei steigt die Flugaktivität der Insekten ab Mitte/Ende März stark an und nimmt gegen Mitte/Ende November wieder ab. Diese Muster treten sowohl im Höhenbereich von 50 bis 540 m ü.B. (Abb. 16) wie auch im spezifisch ausgewählten Rotorbereich der FWEA (Abb. 17) auf. Im Jahr 2023 scheint die Flugaktivität der Insekten insgesamt tiefer zu liegen als in den anderen Jahren. Dies zeigt den Einfluss des Sensitivitätsverlusts des Radargerätes. Vom weiteren Verlauf der Analysen zu den Insekten sind die Daten aus dem Jahr 2023 ausgeschlossen worden.

Gemittelt über die Jahre hinweg zur Hauptaktivitätsphase (01.03. bis 15.11.) und bis zu einer Höhe von 540 m ü.B. waren im Projektgebiet am Tag in Phase 1 (ohne FWEA, 2019-2022) 5.455 (\pm sd 9.250) Insekten pro km und h, und in der Nacht 3.250 (\pm sd 5.970) Insekten pro km und h unterwegs. In Phase 2 mit den FWEA im Trudelmodus (2024) waren die Werte mit 7.880 (\pm sd 10.830) Insekten pro km und h am Tag, und 4.925 (\pm sd 6.820) Insekten pro km und h in der Nacht, höher als in Phase 1 (ohne FWEA). Im ähnlichen Rahmen lagen die Werte tagsüber in Phase 2 mit drehenden FWEA (Tag: 6.800 [\pm sd 9.490] Insekten pro km und h) und schnell drehenden FWEA (Tag: 6.105 [\pm sd 9.130] Insekten pro km und h). In der Nacht war die Flugaktivität mit drehenden FWEA (Nacht: 10.990 [\pm sd 9.780] Insekten pro km und h) und schnell drehenden FWEA (Nacht: 10.045 [\pm sd 9.440] Insekten pro km und h) deutlich höher als in Phase 1 (ohne FWEA) und Phase 2 mit den FWEA im Trudelmodus.

Im Höhenbereich von 50 – 120 m (Rotorbereich FWEA) lagen die Flugaktivitätswerte der Insekten gemittelt über die Jahre während der Hauptaktivität (01.03. bis 15.11.) in Phase 1 (ohne FWEA, 2019-2022) bei 2.440 (\pm sd 4.260) Insekten pro km und h am Tag, und bei 1.140 (\pm sd 2.165) Insekten pro km und h in der Nacht. In Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (2024) beliefen sich die Werte tagsüber auf 3.235 (\pm sd 4.490) Insekten pro km und h und nachts auf 1.565 (\pm sd 2.140) Insekten pro km und h. Mit drehenden FWEA im Herbst 2024 lag die Flugaktivität im Mittel bei 2.465 Insekten (\pm sd 3.615) pro km und h am Tag und bei 3.860 (\pm sd 3.960) Insekten pro km und h in der Nacht. Mit schnell drehenden FWEA waren die Werte sehr ähnlich: 2.490 (\pm sd 3.415) Insekten pro km und h am Tag und 3.440 (\pm sd 3.710) Insekten pro km und h. Die nach Saison und Tageszeit aufgeteilten Mittelwerte können Tab. 13 entnommen werden.

Im Frühling/Sommer sind bei den Flugrichtungen der Insekten in allen Phasen und in beiden betrachteten Höhenbereichen (50 – 540 m ü.B und 50 – 120 m ü.B.) keine einheitlichen Muster vorhanden (Abb. 18 und Abb. 19). Im Herbst scheinen die Flugrichtungen der Insekten im Höhenbereich von 50 – 540 m ü.B. am Tag in allen Phasen süd-südwestlich zu verlaufen (Abb. 20). Dies gilt auch für die Nacht in Phase 1 (ohne FWEA) und die Nacht in Phase 2, mit den FWEA im Trudelmodus. Dahingegen weisen die nächtlichen Flugrichtungen der Insekten mit drehenden FWEA stärker in Richtung west-südwest. Dieses Muster tritt auch in der Nacht im Höhenbereich der Rotoren der FWEA auf (Abb. 21).

Bei den Höhenverteilungen der Insekten fällt vor allem auf, dass im Frühling/Sommer mit drehenden FWEA die Flugaktivität der Insekten in der Nacht deutlich grösser war als in Phase 1 (ohne FWEA) oder als mit den FWEA im Trudelmodus (Abb. 22). Dieser Effekt tritt auch im Herbst auf, ist aber weniger deutlich (Abb. 23). Ansonsten sind bei den Mustern der Höhenverteilungen keine Auffälligkeiten vorhanden.

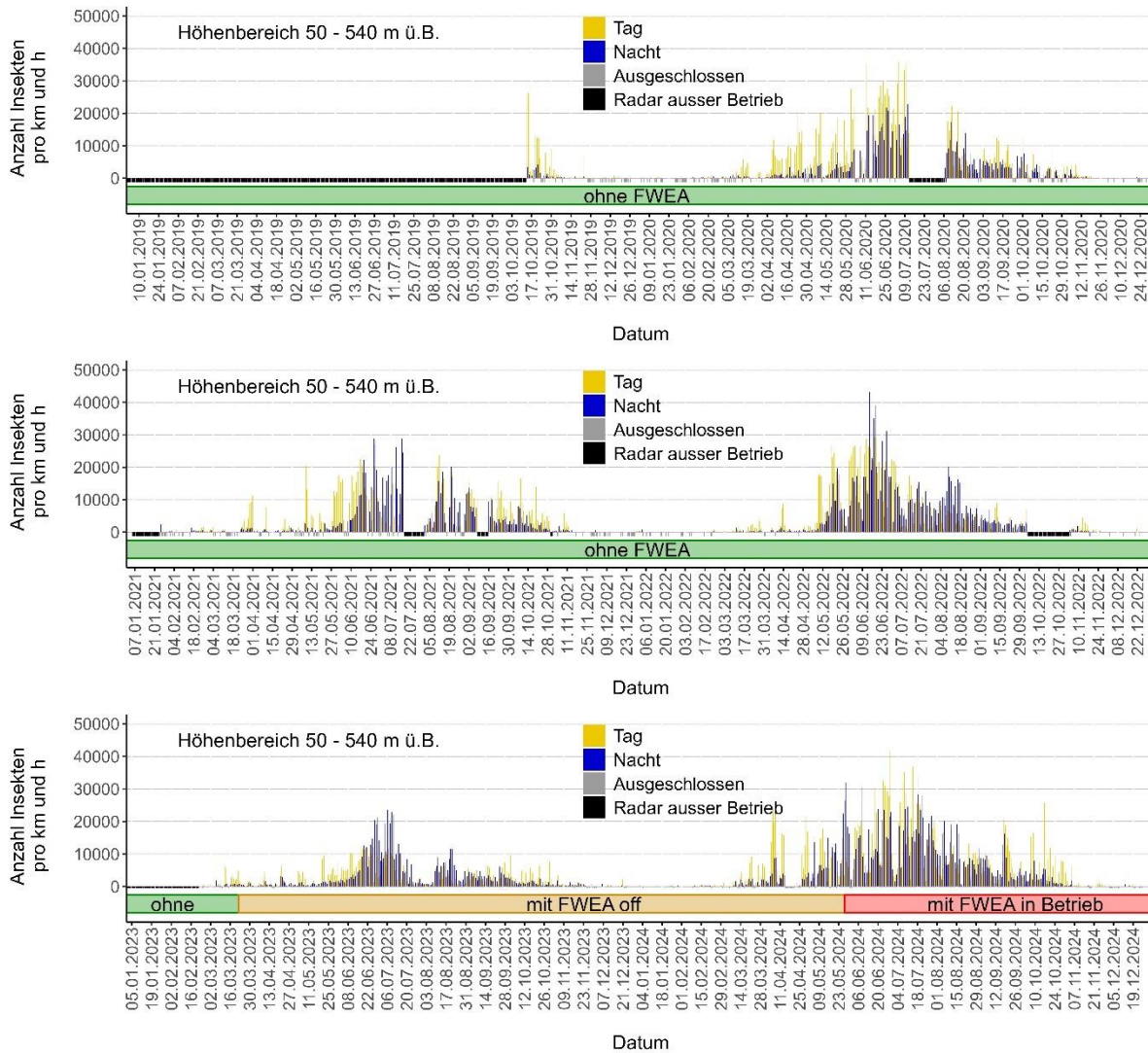


Abb. 16: Saisonaler Verlauf der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Insekten im Höhenbereich von 50 – 540 m ü.B. Von 2019/2020 (oben), von 2021/2022 (Mitte) und 2023/2024 (unten) in Abhängigkeit der Phasen (Balken unter der Nulllinie: Phase 1: ohne FWEA (grün), Phase 2: mit FWEA off (orange, nur im Trudelmodus) und Phase 2: mit FWEA in Betrieb (rot, im Trudelmodus, drehend oder schnell drehend)). Ausgeschlossen: Aufgrund von einer zu geringen Beobachtungszeit (z.B. wegen Niederschlag) wurde keine Flugaktivität berechnet.

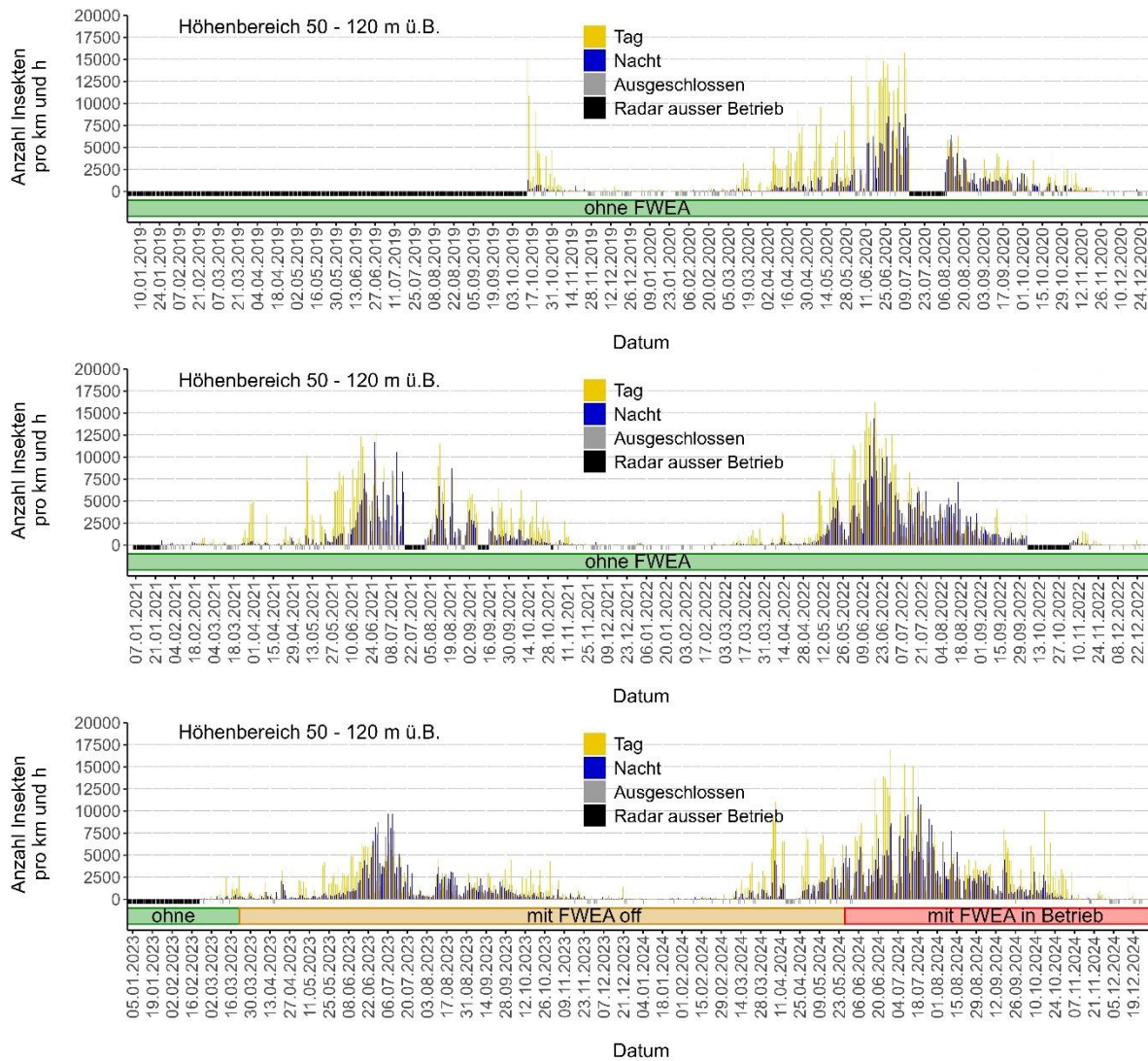


Abb. 17: Saisonaler Verlauf der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Insekten im Höhenbereich von 50–120 m ü.B. Von 2019/2020 (oben), von 2021/2022 (Mitte) und 2023/2024 (unten) in Abhängigkeit der Phasen (Balken unter der Nulllinie: Phase 1: ohne FWEA (grün), Phase 2: mit FWEA off (orange, nur im Trudelmodus) und Phase 2: mit FWEA in Betrieb (rot, im Trudelmodus, drehend oder schnell drehend)). Ausgeschlossen: Aufgrund von einer zu geringen Beobachtungszeit (z.B. wegen Niederschlag) wurde keine Flugaktivität berechnet.

Tab. 13: Mittlere Flugaktivität von Insekten (Anzahl Insekten pro km und h) mit Standardabweichung (\pm sd). Pro Höhenbereich im Frühling/Sommer (Frühl./Som.) und Herbst jeweils am Tag und in der Nacht in Abhängigkeit der Phase (Phase 1: ohne FWEA 2019-2022. Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus 2024, Phase 2: mit FWEA drehend 2024, Phase 2: mit FWEA schnell drehend 2024). Die Daten aus dem Jahr 2023 wurden aufgrund des Sensitivitätsverlust des Radargerätes ausgeschlossen.

Höhenbereich (m)	Saison	Tageszeit	ohne FWEA	mit FWEA off	mit FWEA on	mit FWEA on >37,7 km/h
50-540	Frühl./Som.	Tag	6.530 (10.315)	8.975 (11.825)	9.660 (10.725)	8.415 (10.280)
		Nacht	3.965 (7.255)	6.145 (8.050)	15.000 (10.715)	14.450 (10.850)
	Herbst	Tag	3.280 (6.040)	5.000 (6.870)	4.895 (8.040)	4.910 (8.250)
		Nacht	2.405 (3.765)	3.280 (4.140)	6.000 (5.235)	5.925 (5.275)
50-120	Frühl./Som.	Tag	2.940 (4.810)	3.645 (4.915)	3.830 (4.185)	3.345 (3.900)
		Nacht	1.470 (2.650)	1.965 (2.500)	5.595 (4.420)	5.315 (4.360)
	Herbst	Tag	1.425 (2.570)	2.170 (2.845)	2.050 (2.980)	2.045 (3.050)
		Nacht	750 (1.270)	1.030 (1.345)	1.700 (1.600)	1.685 (1.610)

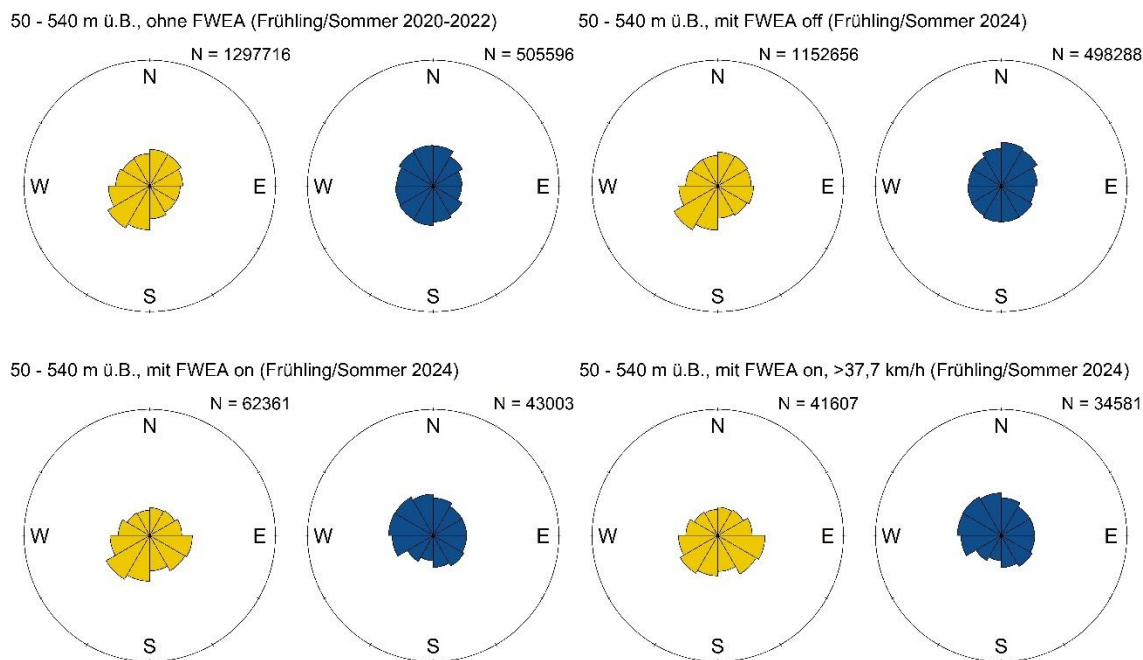


Abb. 18: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-540 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen von Insekten. Am Tag (gelb) und in der Nacht (blau) im Frühling/Sommer (01.03 bis 15.08.) während Phase 1: ohne FWEA (oben links, 2020-2022), Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (oben rechts, 2024), Phase 2: mit FWEA drehend (unten links, 2024) und Phase 2: mit FWEA schnell drehend (>37,7 km/h, unten rechts, 2024). N=Anzahl Echos. Die Daten aus dem Jahr 2023 wurden aufgrund des Sensitivitätsverlust des Radargerätes ausgeschlossen.

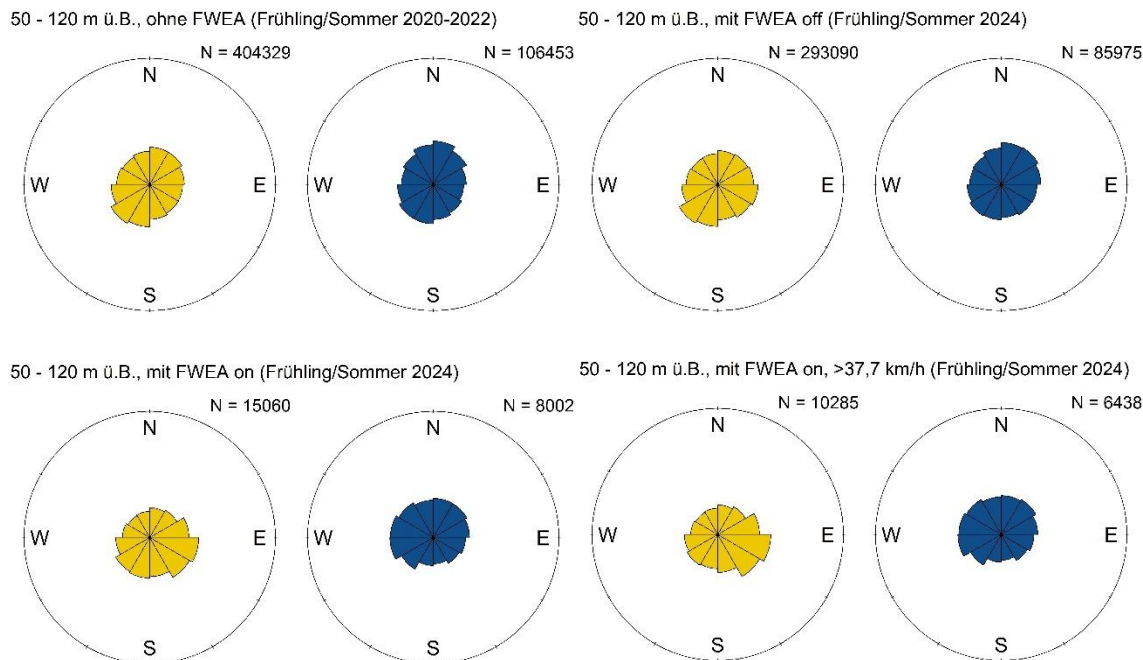


Abb. 19: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-120 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen von Insekten. Am Tag (gelb) und in der Nacht (blau) im Frühling/Sommer (01.03 bis 15.08.) während Phase 1: ohne FWEA (oben links, 2020-2022), Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (oben rechts, 2024), Phase 2: mit FWEA drehend (unten links, 2024) und Phase 2: mit FWEA schnell drehend (>37,7 km/h, unten rechts, 2024). N=Anzahl Echos. Die Daten aus dem Jahr 2023 wurden aufgrund des Sensitivitätsverlust des Radargerätes ausgeschlossen.

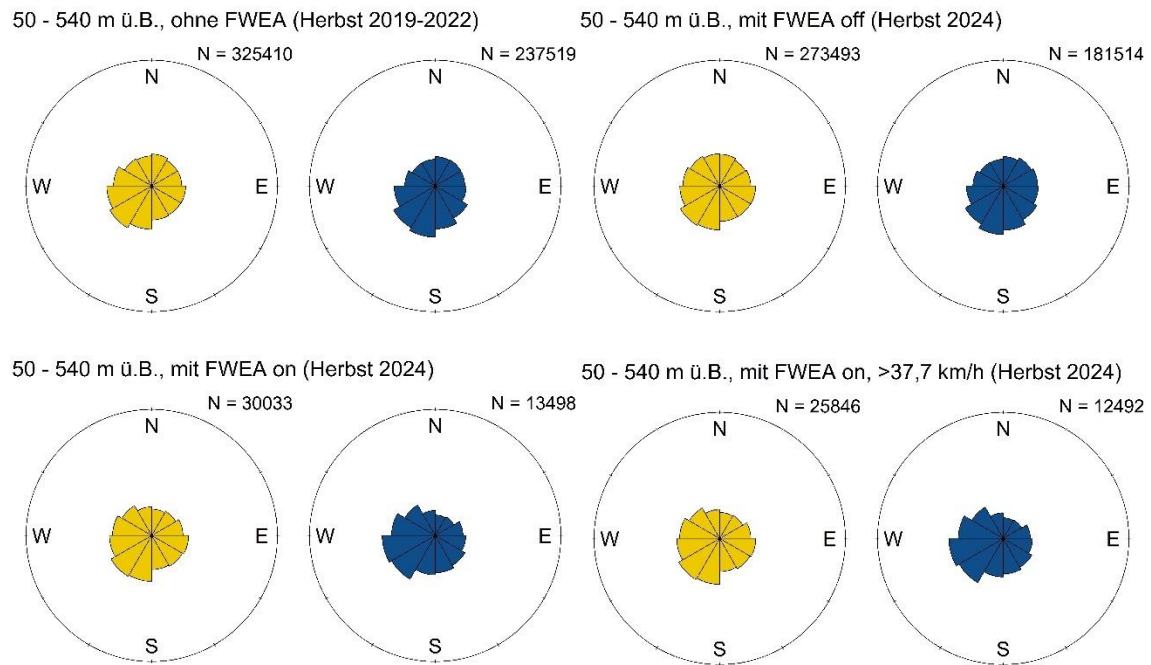


Abb. 20: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-540 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen von Insekten. Am Tag (gelb) und in der Nacht (blau) zur im Herbst (15.08. bis 15.11.) während Phase 1: ohne FWEA (oben links, 2019-2022), Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (oben rechts, 2024), Phase 2: mit FWEA drehend (unten links, 2024) und Phase 2: mit FWEA schnell drehend (>37,7 km/h, unten rechts, 2024). N=Anzahl Echos. Die Daten aus dem Jahr 2023 wurden aufgrund des Sensitivitätsverlust des Radargerätes ausgeschlossen.

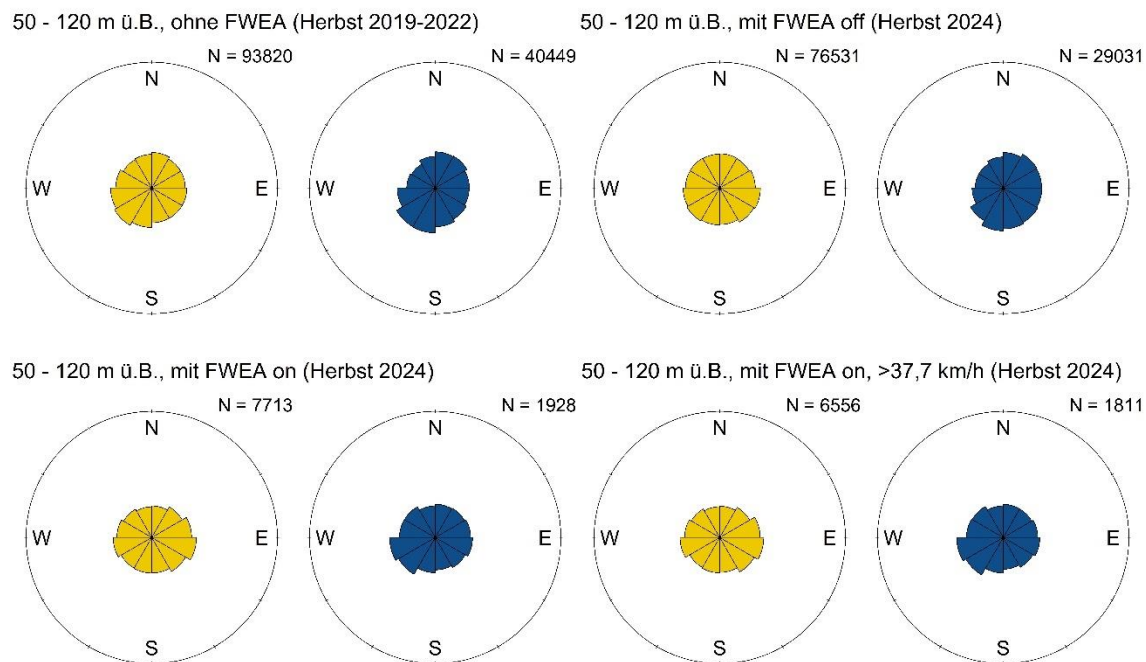


Abb. 21: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-120 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen von Insekten. Am Tag (gelb) und in der Nacht (blau) im Herbst (15.08. bis 15.11.) während Phase 1: ohne FWEA (oben links, 2019-2022), Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (oben rechts, 2024), Phase 2: mit FWEA drehend (unten links, 2024) und Phase 2: mit FWEA schnell drehend (>37,7 km/h, unten rechts, 2024). N=Anzahl Echos. Die Daten aus dem Jahr 2023 wurden aufgrund des Sensitivitätsverlust des Radargerätes ausgeschlossen.

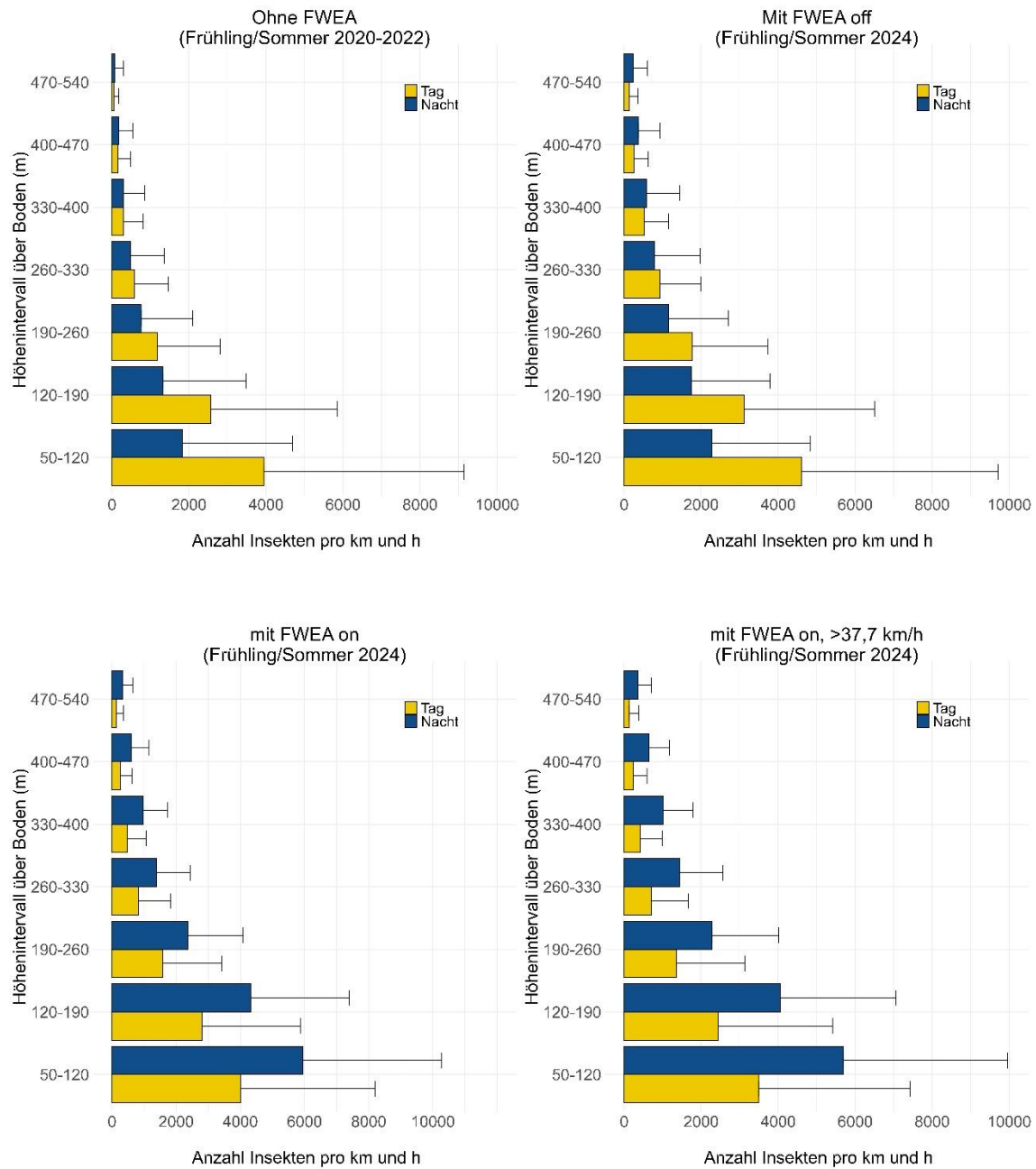


Abb. 22: Höhenverteilung der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Insekten im Frühling/Sommer (01.03. bis 15.08.). Während Phase 1: ohne FWEA (oben links, 2020-2022, N=84.168), Phase 2: FWEA im Trudelmodus (oben rechts, 2024, N=26.642), Phase 2: FWEA drehend (unten links, 2024 N=1.834) und Phase 2: mit FWEA schnell drehend (>37,7 km/h, unten rechts, 2024, N=1.330). N=stündliche Werte. Die Daten aus dem Jahr 2023 wurden aufgrund des Sensitivitätsverlust des Radargerätes ausgeschlossen.

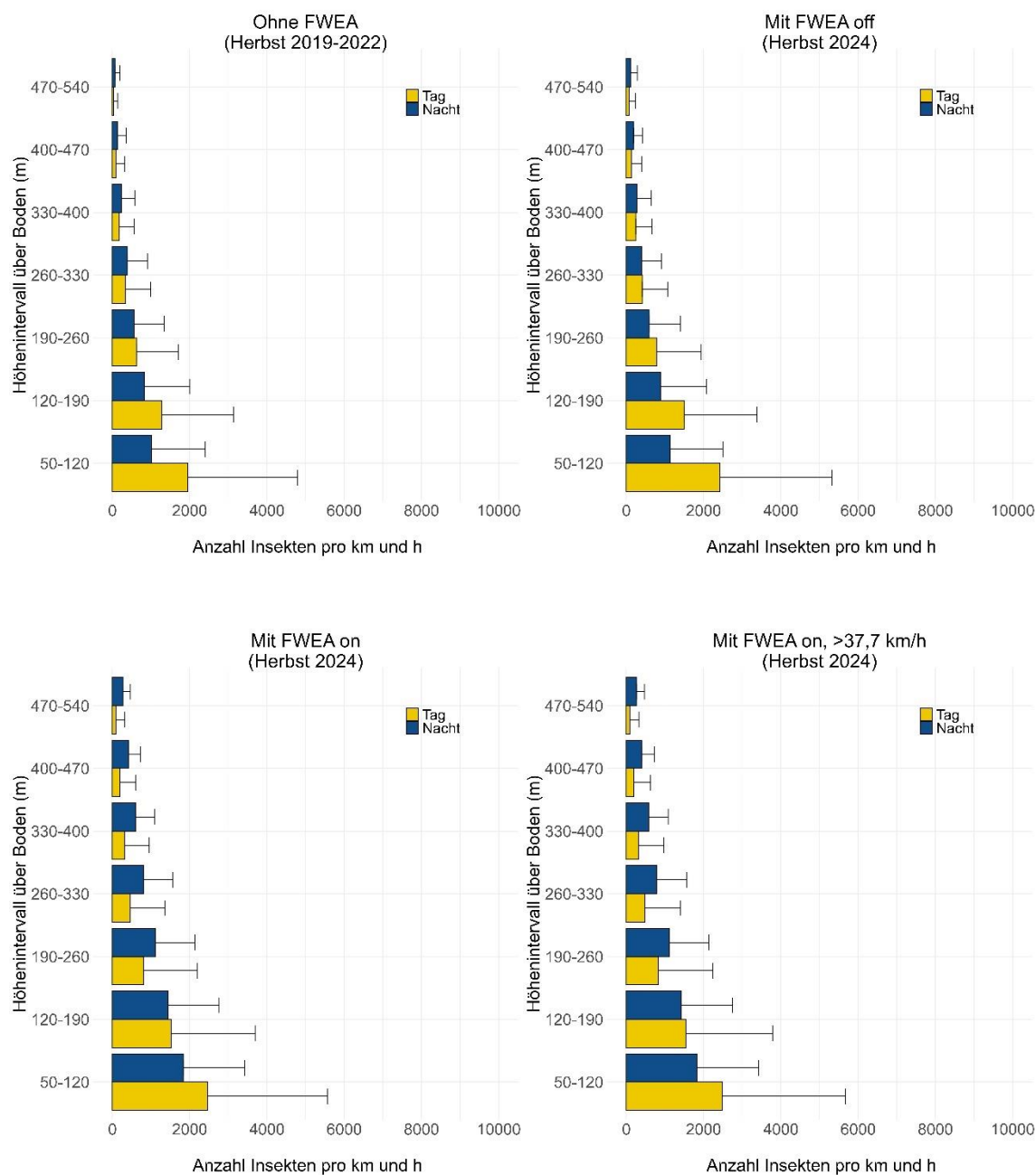


Abb. 23: Höhenverteilung der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Insekten im Herbst (15.08 bis 15.11.). Während Phase 1 (oben links, 2019-2022, N=51.681), Phase 2: FWEA im Trudelmodus (oben rechts, 2024, N=13.342), Phase 2: mit FWEA drehend (unten links, 2024, N=2.254) und Phase 2: mit FWEA schnell drehend (>37,7 km/h, unten rechts, 2024, N=2.121). N=stündliche Werte. Die Daten aus dem Jahr 2023 wurden aufgrund des Sensitivitätsverlust des Radargerätes ausgeschlossen.

1.2.5 Radardaten Fledermäuse und Ergebnisse

Die Standardauswertung der Fledermäuse wurde für dieselben Höhenbereiche durchgeführt wie für die Vögel, nämlich jeweils für den Höhenbereich 50-1.100 m ü.B. und für den Höhenbereich 50-120 m ü.B. (Höhenbereich der Rotoren der FWEA, Musiol et al. 2023). Wie bei den Vögeln gibt es bei Fledermäusen ziehende und residente Arten. Allerdings ist zu ziehenden Fledermausarten viel weniger bekannt als bei den Vögeln. Bei Meschede et al. 2017 werden für drei Fledermausarten Angaben zu den Zugzeiten gemacht:

- Kleiner Abendsegler (*Nyctalus leisleri*): Frühlingszug ab Mitte/Ende April bis anfangs/Mitte Mai, Herbstzug ab Ende Juli bis Oktober
- Grosser Abendsegler (*Nyctalus noctula*): Frühlingszug ab Ende März/Mitte-Ende Mai bis anfangs Mai/anfangs Juni, Herbstzug ab Mitte/Ende Juli bis Mitte August/anfangs September
- Rauhautfledermaus (*Pipistrellus nathusii*): Frühlingszug ab Ende März bis anfangs April/Mitte Mai und Herbstzug ab anfangs August bis anfangs/Ende September

Aufgrund dieser Angaben wurden die Fledermausdaten zeitlich in folgende drei Zeitperioden eingeteilt: Frühling (01.04. – 15.05.), Sommer (16.05. – 31.07.), Herbst (01.08. – 31.10.). Die Datengrundlagen wurden entsprechend dieser Zeitperioden den Phasen und den Betriebszuständen der FWEA zugeordnet (Tab. 14 und Tab. 15).

Die Standardauswertung betreffend der Flugaktivität von Fledermäusen enthält den saisonalen Verlauf der Flugaktivität, die mittlere Flugaktivität, die Verteilung der Flugrichtungen und die Höhenverteilung.

Tab. 14: Liste der berücksichtigten Zeitperioden für Fledermäuse in Abhängigkeit der Phase, des Betriebszustand der FWEA und der Jahre.

Phase	Präsenz und Betriebszustand FWEA	Jahr	Frühling	Sommer	Herbst
1	Ohne FWEA	2019	-	-	12.09.-31.10.
1	Ohne FWEA	2020	01.04.-15.05.	16.05.-31.07.	01.08.-31.10.
1	Ohne FWEA	2021	01.04.-15.05.	16.05.-31.07.	01.08.-31.10.
1	Ohne FWEA	2022	01.04.-15.05.	16.05.-31.07.	01.08.-31.10.
2	Mit FWEA off (nur im Trudelmodus)	2023	01.04.-15.05.	16.05.-31.07.	01.08.-31.10.
2	Mit FWEA off (nur im Trudelmodus)	2024	01.04.-15.05.	-	-
2	Mit FWEA in Betrieb (im Trudelmodus, drehend oder schnell drehend)	2024	-	27.05.-31.07.	01.08.-31.10.

Tab. 15: Anzahl stündliche Flugaktivitätswerte von Fledermäusen pro Phase und Betriebszustand der FWEA in Abhängigkeit der Zeitperiode (Frühling: 01.04. bis 15.05., Sommer: 16.05. bis 31.07., Herbst: 01.08. bis 31.10.).

Phase	Präsenz und Betriebszustand FWEA	Frühling	Sommer	Herbst
1	Ohne FWEA	1.042	1.298	2.651
2	Mit FWEA off (nur im Trudelmodus)	684	885	1.726
2	Mit FWEA on, drehend	0	77	96
2	Mit FWEA on, schnell drehend	0	52	93

Der Jahresverlauf der Flugaktivität der Fledermäuse zeigt in allen Phasen (Phase 1: ohne FWEA [2019-2022], Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus [2023/2024], Phase 2: mit FWEA drehend [2024]) den Verlauf mit einer Zunahme der Flugaktivität ab Frühling bis in den Sommer und dann einer Abnahme ab Sommer bis Ende Herbst (Abb. 24). Im Winter ist natürlicherweise keine Flugaktivität vorhanden. Auffällig ist, dass in den Jahren während Phase 1 (ohne FWEA) hin und wieder starke Peaks auftreten, während das in den beiden Jahren von Phase 2 nicht der Fall war. Im Höhenbereich der Rotoren ist die mittels Radar gemessene Flugaktivität der Fledermäuse insgesamt gering (Abb. 25).

Bis zu einer Höhe von 1.100 m ü.B. bewegten sich im Projektgebiet gemittelt über die Hauptaktivitätszeit (01.04. bis 31.10.) der Jahre während Phase 1 (ohne FWEA, 2019-2022) rund 14 Fledermäuse pro km und h (\pm sd 47). In Phase 2 mit den FWEA im Trudelmodus (2023/2024) waren es 10 Fledermäuse pro km und h (\pm sd 20), mit den FWEA drehend (2024) 11 Fledermäuse pro km und h (\pm sd 18) und mit den FWEA schnell drehend (2024) 10 Fledermäuse pro km und h (\pm sd 18). Im Sommer war die Flugaktivität im Mittel in allen Phasen jeweils höher als im Herbst und Frühling (Tab. 16). Unter 120 m ü.B. war die mittlere Flugaktivität der Fledermäuse in allen Phasen gering (< 1 Fledermaus pro km und h).

Bis zu einer Höhe von 1.100 m ü.B. betrachtet, verlaufen die Flugrichtungen im Frühling sowohl in Phase 1: ohne FWEA wie auch in Phase 2: mit FWEA im Trudelbetrieb klar in Richtung NO. Im Sommer ist in allen Phasen keine Hauptflugrichtung erkennbar, während im Herbst in allen Phasen eine südwestliche Hauptflugrichtung auftritt. Es muss beachtet werden, dass die Datengrundlage in Phase 2 mit drehenden und schnell drehenden FWEA gering ist (wenige Echos). Auf eine Darstellung der Flugrichtungen im Höhenbereich der Rotoren der FWEA (50-120 m ü.B.) wird aufgrund der geringen Anzahl an Echos insgesamt verzichtet.

Die Höhenverteilungen der Fledermäuse, die ohne FWEA und mit den FWEA im Trudelmodus erhoben worden sind, weisen in allen Zeitperioden ein ähnliches Muster auf (Abb. 29 bis Abb. 31): Die Flugaktivität nimmt mit zunehmender Höhe zu und dann ab einer gewissen Höhe wieder ab. Im Frühling ist die Flugaktivität ohne FWEA im Höhenbereich von 260 m bis 330 m über Boden am höchsten. Mit den FWEA im Trudelmodus scheinen die Fledermäuse im Frühling insgesamt gleichmässiger verteilt zu sein. Ohne FWEA tritt die höchste Flugaktivität im Sommer im Höhenbereich zwischen 400 m und 470 m ü.B. auf und mit FWEA im Trudelmodus im Höhenbereich zwischen 330 m und 400 m ü.B. Ein ähnliches Muster ist auch im Herbst erkennbar: Ohne FWEA liegt die höchste Flugaktivität im Höhenbereich von 260 m bis 400 m ü.B. und mit den FWEA im Trudelmodus im Höhenbereich zwischen 190 m und 330 m. Diese Muster deuten darauf hin, dass sich die Hauptflugaktivität im Sommer und Herbst nach unten

verschiebt, wenn die FWEA präsent sind und sich im Trudelmodus befinden. Die Muster der Höhenverteilungen mit drehenden FWEA sind nicht interpretierbar, da die Datengrundlage für diesen Betriebszustand der FWEA noch zu gering ist.

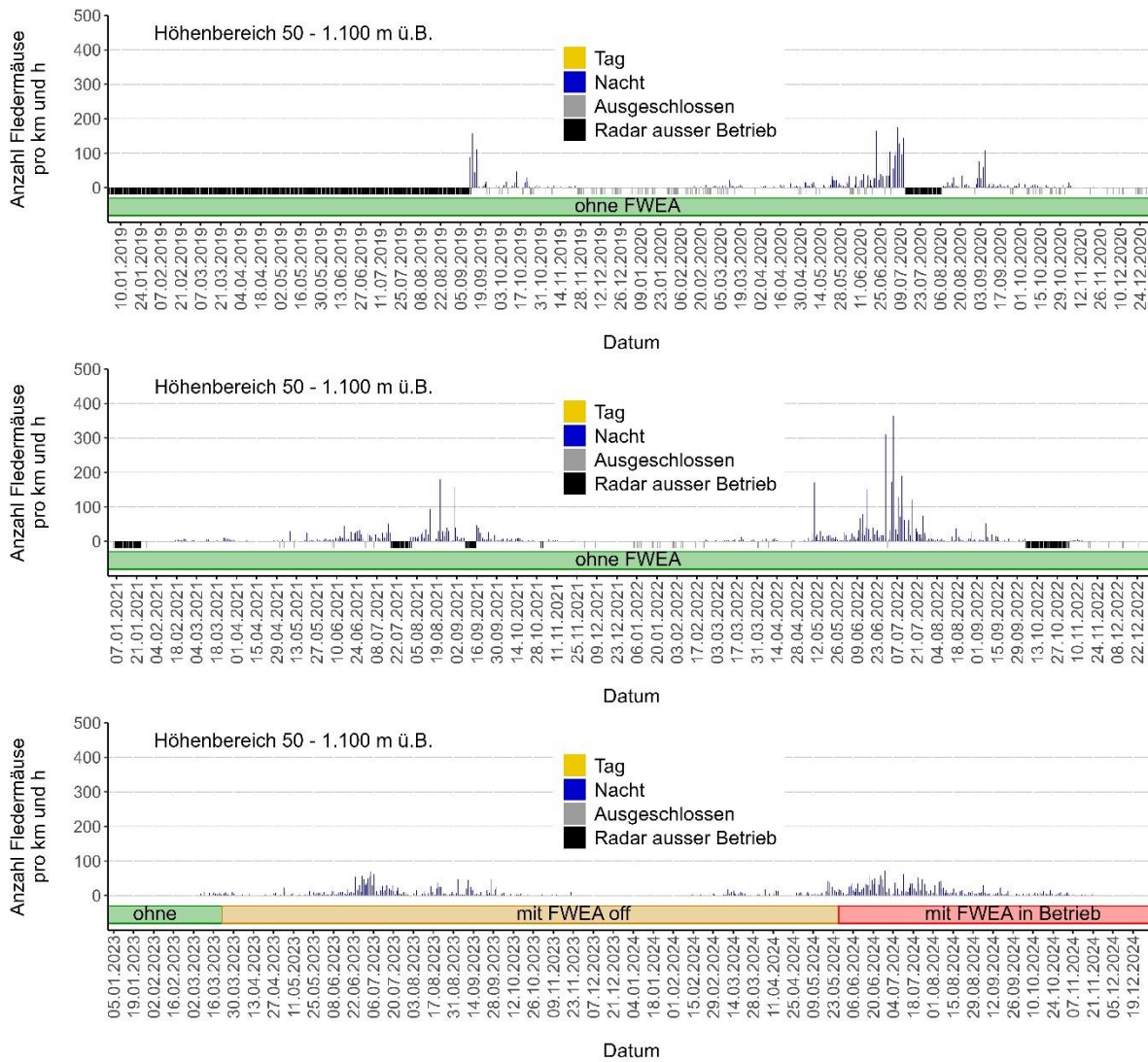


Abb. 24: Saisonaler Verlauf der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Fledermäusen im Höhenbereich von 50 – 1.100 m ü.B. Von 2019/2020 (oben), von 2021/2022 (Mitte) und 2023/2024 (unten) in Abhängigkeit der Phasen (Balken unter der Nulllinie: Phase 1: ohne FWEA (grün), Phase 2: mit FWEA off (orange, nur im Trudelmodus) und Phase 2: mit FWEA in Betrieb (rot, im Trudelmodus, drehend oder schnell drehend)). Ausgeschlossen: Aufgrund von einer zu geringen Beobachtungszeit (z.B. wegen Niederschlag) wurde keine Flugaktivität berechnet.

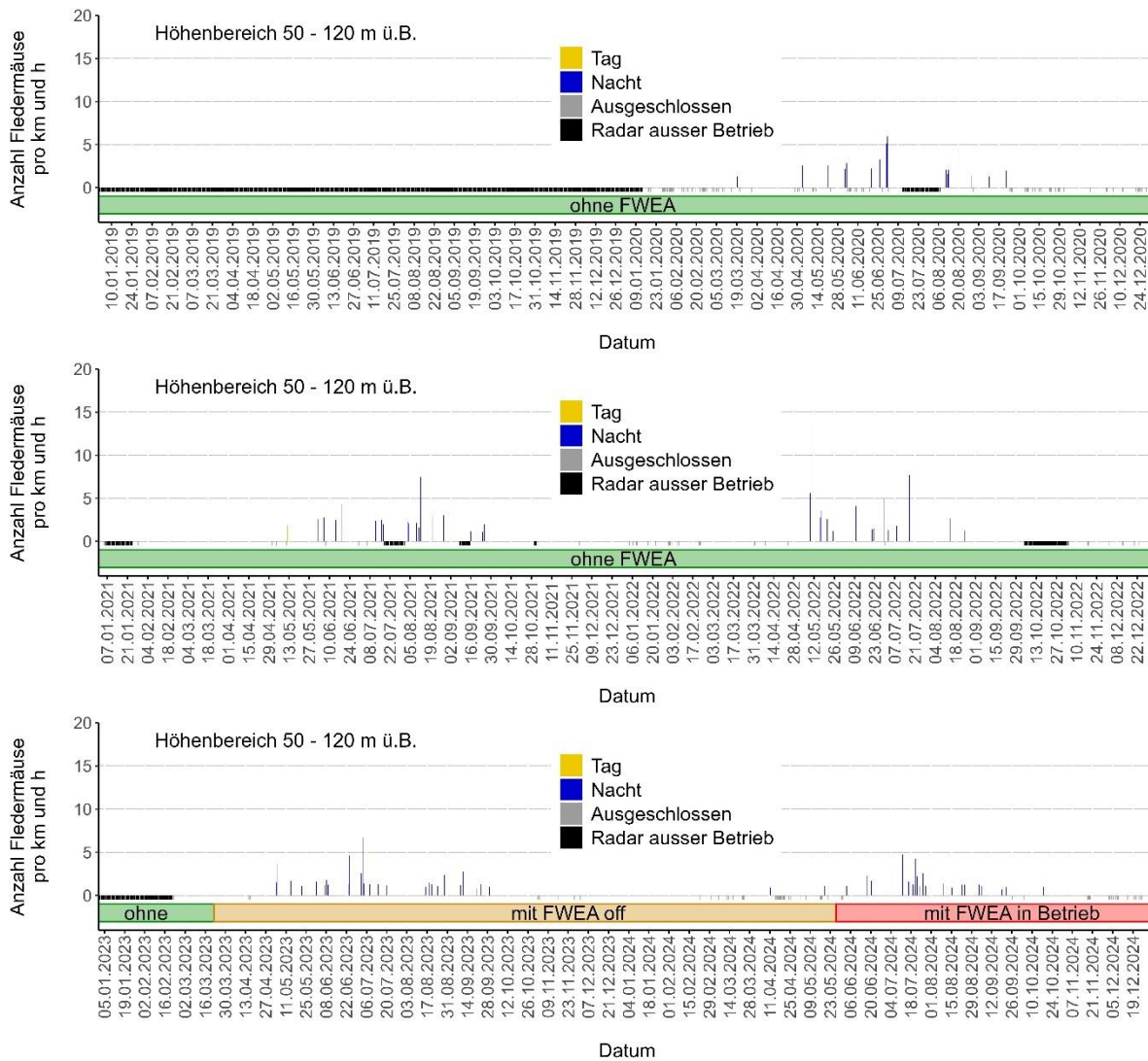


Abb. 25: Saisonaler Verlauf der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Fledermäusen im Höhenbereich von 50 – 120 m ü.B. Von 2019/2020 (oben), von 2021/2022 (Mitte) und 2023/2024 (unten) in Abhängigkeit der Phasen (Balken unter der Nulllinie: Phase 1: ohne FWEA (grün), Phase 2: mit FWEA off (orange, nur im Trudelmodus) und Phase 2: mit FWEA in Betrieb (rot, im Trudelmodus, drehend oder schnell drehend)). Ausgeschlossen: Aufgrund von einer zu geringen Beobachtungszeit (z.B. wegen Niederschlag) wurde keine Flugaktivität berechnet.

Tab. 16: Mittels Radar gemessene mittlere Flugaktivität von Fledermäusen (Anzahl Fledermäuse pro km und h) mit Standardabweichung (\pm sd). Pro Höhenbereich in den Nächten im Frühling (01.04.-15.05.), Sommer (16.05.-31.07.) und Herbst (01.08.-31.10.) in Abhängigkeit der Phase (Phase 1: ohne FWEA 2019-2022. Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus 2023/2024, Phase 2: mit FWEA drehend 2024, Phase 2: mit FWEA schnell drehend 2024).

Höhenbereich (m)	Saison	ohne FWEA	mit FWEA off	mit FWEA on	mit FWEA on, >37,7 km/h
50-1.100	Frühling	4 (19)	3 (7)	NA	NA
	Sommer	29 (70)	19 (28)	19 (23)	19 (25)
	Herbst	11 (38)	8 (18)	5 (9)	5 (9)
50-120	Frühling	0,2 (1,8)	0,1 (1,0)	NA	NA
	Sommer	0,4 (3,0)	0,4 (2,6)	0,1 (0,9)	0,1 (0,9)
	Herbst	0,1 (1,7)	0,2 (1,4)	0 (0)	0 (0)

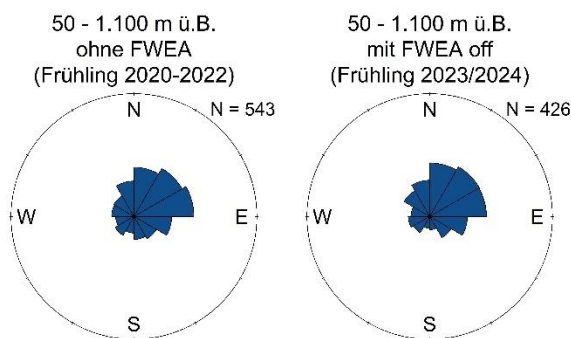


Abb. 26: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen von Fledermäusen im Frühling (01.04 bis 15.05.). Während Phase 1: ohne FWEA (links, 2020-2022) und Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (rechts, 2024). N=Anzahl Echos. Zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts waren für die Frühlingsperiode noch keine Daten vorhanden, die mit laufenden FWEA gesammelt werden konnten.

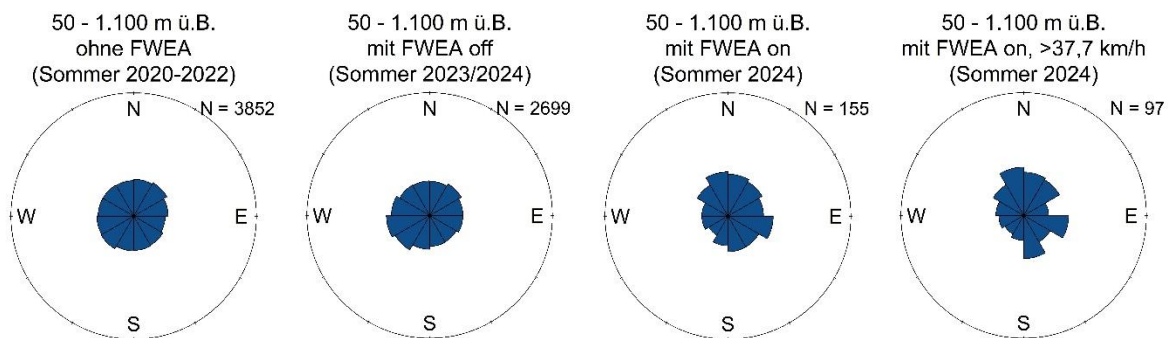


Abb. 27: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen von Fledermäusen im Sommer (16.05. bis 31.07.). Während Phase 1: ohne FWEA (ganz links, 2020-2022), Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (zweite von links, 2024), Phase 2: mit FWEA drehend (zweite von rechts, 2024) und Phase 2: mit FWEA schnell drehend (>37,7 km/h, ganz rechts, 2024). N=Anzahl Echos.

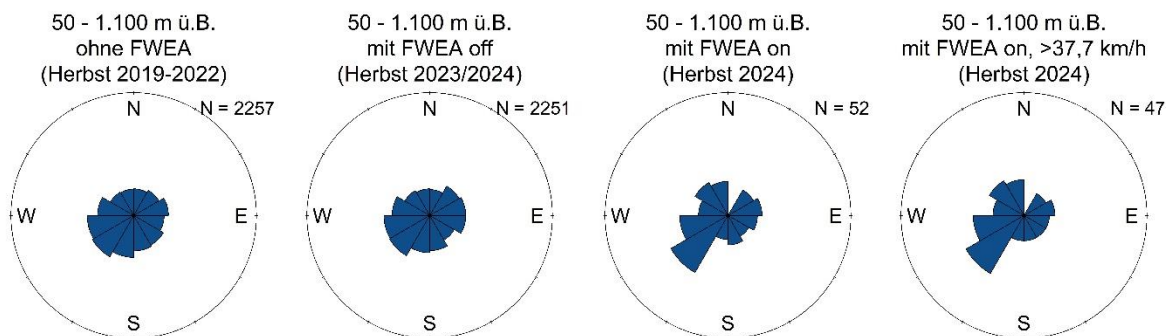


Abb. 28: Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen von Fledermäusen im Herbst (01.08. bis 31.10.). Während Phase 1: ohne FWEA (ganz links, 2019-2022), Phase 2: mit FWEA im Trudelmodus (zweite von links, 2024), Phase 2: mit FWEA drehend (zweite von rechts, 2024) und Phase 2: mit FWEA schnell drehend (>37,7 km/h, ganz rechts, 2024). N=Anzahl Echos.

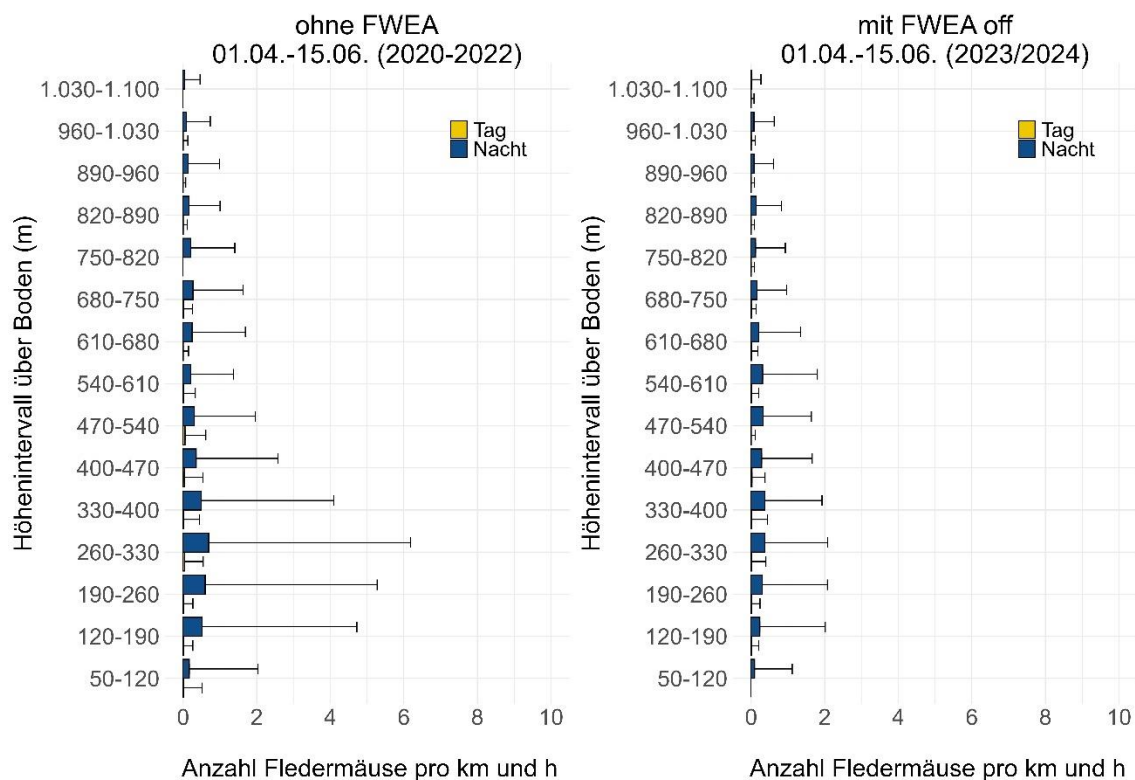


Abb. 29: Höhenverteilung der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Fledermäusen im Frühling (01.04. bis 15.05.). Während Phase 1: ohne FWEA (links, 2020-2022, N=47.475) und Phase 2: FWEA im Trudelmodus (2023/2024, N=31.650). Zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts waren für die Frühlingsperiode noch keine Daten vorhanden, die mit laufenden FWEA gesammelt werden konnten. N=stündliche Werte aufgeteilt nach Höhenintervall.

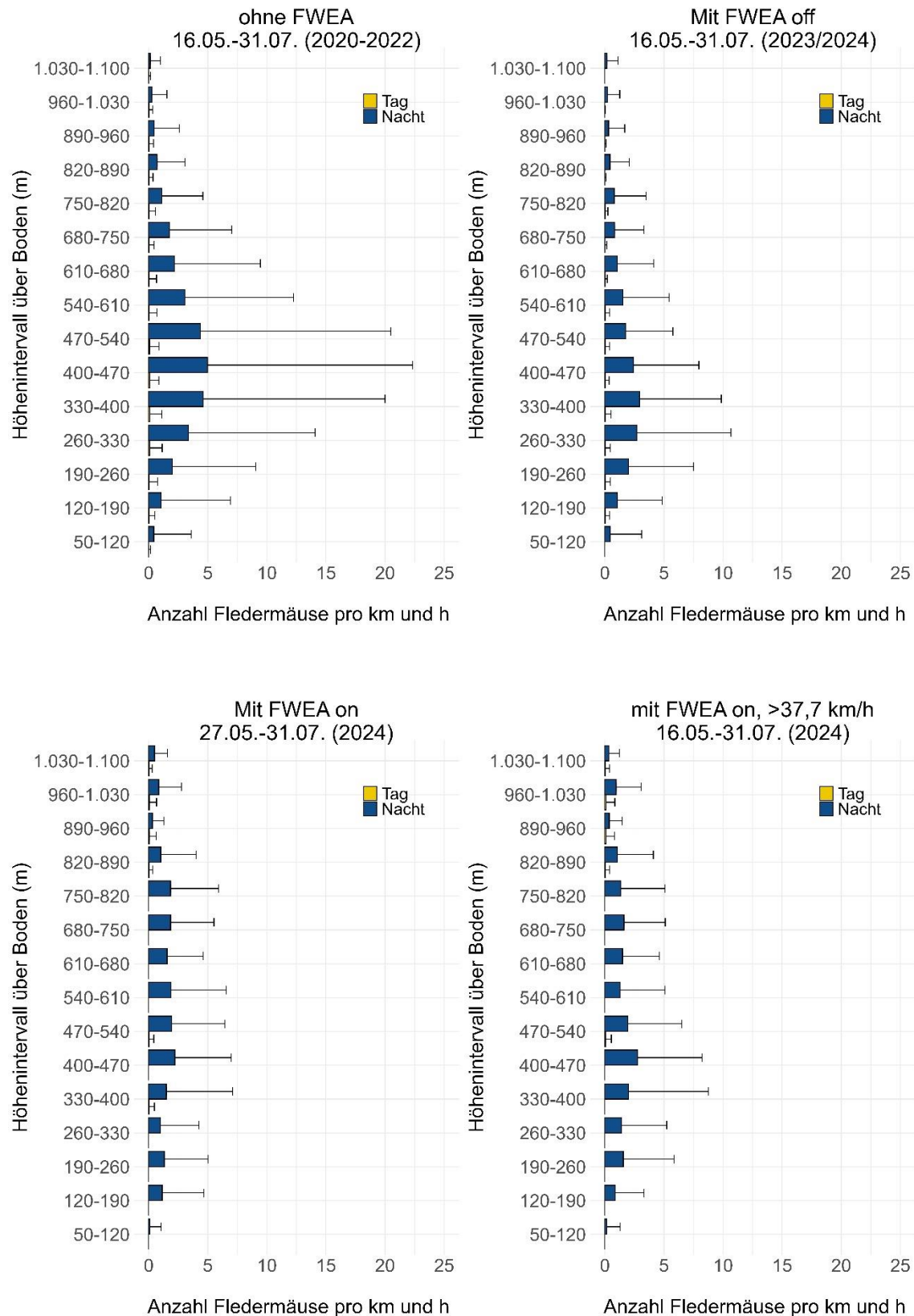


Abb. 30: Höhenverteilung der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Fledermäusen im Sommer (16.05. bis 31.07.). Während Phase 1: ohne FWEA (oben links, 2020-2022, N=82.755), Phase 2: FWEA im Trudelmodus (oben rechts, 2023/2024, N=48.150), Phase 2: FWEA drehend (unten links, 2024, N=2.580) und Phase 2: FWEA schnell drehend >37,7 km/h (unten rechts, 2024, N=1.740). N=stündliche Werte aufgeteilt nach Höhenintervall.

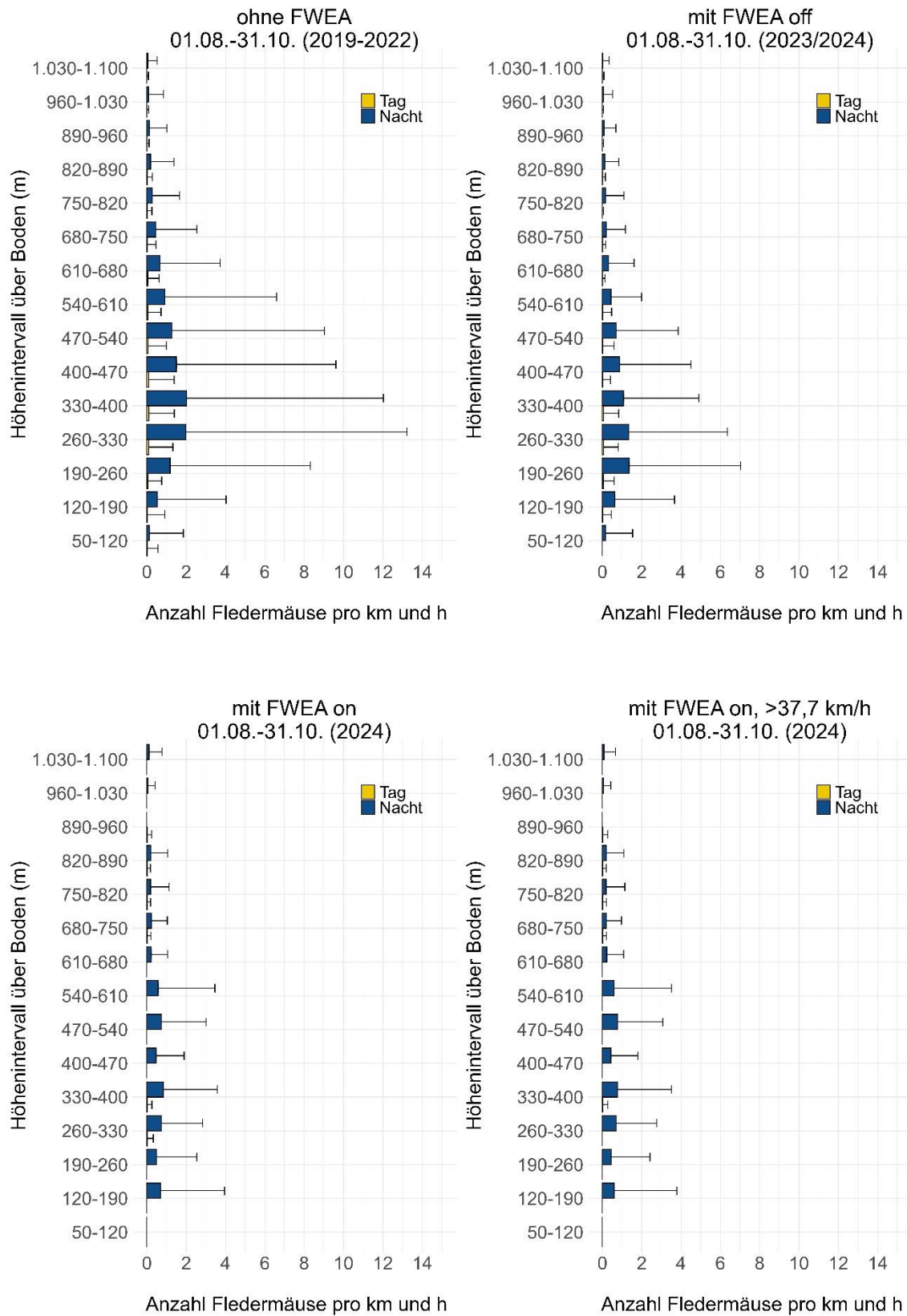


Abb. 31: Höhenverteilung der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Fledermäusen im Herbst (01.08. bis 31.10.). Während Phase 1: ohne FWEA (oben links, 2019-2022, N=115.710), Phase 2: FWEA im Trudelmodus (oben rechts, 2023/2024, N=59.445), Phase 2: FWEA drehend (unten links, 2024, N=6.075) und Phase 2: FWEA schnell drehend >37,7 km/h (unten rechts, 2024, N=5.640). N=stündliche Werte aufgeteilt nach Höhenintervall.

1.2.6 Diskussion Radardaten und Einfluss der FWEA

Das Ziel der Analysen der Radardaten im Rahmen von Phase 2.1 war es explorativ zu prüfen, ob es Hinweise gibt, dass die mittels Radar gemessene Flugaktivität fliegender Tiere von der Präsenz und/oder der Drehung der Rotoren der FWEA beeinflusst wird. Auf die Berechnung statistischer Modelle wurde zur Zeit der Erstellung des vorliegenden Berichts verzichtet, da das Aufwand-Nutzen-Verhältnis als unverhältnismäßig eingeschätzt worden ist. Aus Phase 1 ist bekannt, dass die Berechnung der Modelle für Radardaten sehr zeitaufwendig ist. Zudem ist aufgrund der dünnen Datengrundlage mit drehenden FWEA nicht davon auszugehen, dass daraus gesicherte Ergebnisse resultieren würden. Die im Folgenden diskutierten Ergebnisse sind lediglich als Hinweise auf mögliche Effekte zu betrachten, denen im weiteren Verlauf des Projekts Aufmerksamkeit geschenkt werden könnte. Eine Verdichtung der Datengrundlage ist unumgänglich, bevor eine tiefgründige Analyse und Interpretation der Daten vorgenommen werden kann. Insbesondere ist auch ein Einbezug der meteorologischen Parameter notwendig. Zudem gilt es zu berücksichtigen, dass die Datengrundlage mit drehenden FWEA erst auf Daten eines Jahres beruhen. Da die Flugaktivität jährlichen Schwankungen unterliegt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass es sich bei den Effekten lediglich um Jahreseffekte handelt.

Betreffend Vogelzug gibt es Hinweise, dass vor allem tagsüber die mittlere Flugaktivität des Flugtyps „Singvogel“ von der Präsenz und der Drehung der Rotoren der FWEA beeinflusst wird. Auch die Zugrichtung am Tag und die nächtliche Artenzusammensetzung innerhalb des Flugtyps „Singvogel“ (siehe Verteilung Flügelschlagfrequenzen) scheint von der Präsenz der FWEA und den drehenden FWEA beeinflusst zu werden. So war die Flugaktivität der tagziehenden Singvogel-Flugtypen im Vergleich zu Phase 1 (ohne FWEA) tiefer, wenn die FWEA im Trudelmodus präsent waren (Frühling und Herbst) und wenn die FWEA gedreht haben (bis jetzt nur eine Herbstsaison). Weiter zogen die tagziehenden Singvogel-Flugtypen im Vergleich mit Phase 1 im Herbst tagsüber südlicher, wenn die FWEA gedreht haben. Die Häufigkeit der Vogelarten mit einer Flügelschlagfrequenz von ca. 10 Hz war in der Nacht im Vergleich zu Phase 1 tiefer. Die Effekte erwecken den Verdacht, dass die Singvogel-Flugtypen das Testfeld vor allem tagsüber umfliegen. Die Höhenverteilungen zeigen, dass die Vögel tagsüber tiefer ziehen als in der Nacht. Daher könnte sich die Präsenz und Drehung der FWEA auf tagziehende Kleinvögel stärker auswirken als auf den Nachtzug.

Bei den Insekten basieren alle Vergleichsdaten von Phase 2.1 lediglich auf einem Jahr, da das Jahr 2023 aufgrund des Sensitivitätsverlustes des Radargerätes von der Analyse ausgeschlossen worden ist. Darum kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Hinweise auf Effekte lediglich auf einem Jahreseffekt beruhen und nichts mit den FWEA zu tun haben. So waren im Vergleich mit Phase 1 mit den FWEA im Trudelmodus wie auch mit drehenden FWEA teilweise im Mittel deutlich mehr Insekten pro km und h unterwegs, insbesondere in der Nacht. Zudem waren im Herbst die Flugrichtungen der Insekten mit drehenden FWEA stärker westlich ausgerichtet als ohne FWEA oder mit den FWEA im Trudelmodus. Eine Verdichtung der Datengrundlage ist unumgänglich, bevor eine tiefgründige Analyse und Interpretation der Daten vorgenommen werden kann.

Bei den Fledermäusen gibt es ebenfalls Hinweise, dass die FWEA einen Einfluss haben könnten. Mit den FWEA im Trudelmodus wie auch mit drehenden FWEA war die mittlere Flugaktivität der Fledermäuse über alle Höhenintervalle betrachtet etwas tiefer als in Phase 1 (ohne FWEA). Darüber hinaus ist anhand der Höhenverteilungen ersichtlich, dass sich die Flugaktivität mit den FWEA im Trudelmodus im Vergleich mit Phase 1 (ohne FWEA) weiter nach unten zu verschieben scheint. Mit den FWEA im Trudelmodus trat die höchste Flugaktivität in tiefer

liegenden Höhenintervallen auf als in Phase 1 (ohne FWEA). Für eine Beurteilung des Musters der Höhenverteilung mit drehenden FWEA ist die Datengrundlage noch zu klein. Die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 3 und 5 zeigen, dass zwischen der Flugaktivität der Fledermäuse und der Insektenaktivität ein positiver Zusammenhang besteht. Möglicherweise hat sich mit der Präsenz der FWEA die räumliche Verteilung der Insekten verschoben, was eine Verschiebung der räumlichen Verteilung der Fledermausaktivität bewirkt haben könnte.

1.2.7 Ausblick Radaruntersuchung Phase 2.2

In Phase 2.2 werden die Radarmessungen zur Verdichtung der Datengrundlage fortgesetzt. Allerdings soll der Fokus der Auswertungen aufgrund finanzieller Restriktionen auf die Auswertung des Vogelzugs gelegt werden. Die Auswertung der Insekten- und Fledermausdaten wird nur noch bei Bedarf und punktuell vorgenommen.

Die detaillierte Untersuchung des Einflusses der Präsenz und des Betriebszustandes der FWEA auf den Vogelzug soll in Abhängigkeit der meteorologischen Parameter erfolgen, da die räumliche und zeitliche Verteilung der ziehenden Vögel an einem Standort stark von den meteorologischen Verhältnissen beeinflusst wird.

Bis anhin lag die Flugaktivität in Form von stündlichen Werten vor. Für die Zukunft wird angestrebt, dass die Flugaktivität zeitlich spezifisch pro Zeitfenster berechnet wird, für welche ein bestimmter Betriebszustand der FWEA vorliegt. So könnte vermieden werden, dass pro Stunde entschieden werden muss, welcher Betriebszustand für eine bestimmte Stunde gilt, wenn die Dauer eines Betriebszustandes kürzer als eine Stunde war.

1.3 Individuelle Flugbewegungen (GPS und LRF)

1.3.1 Ziele und Fragestellungen

Hauptziel der Erfassungen der individuellen Flugbewegungen in Phase 2 ist die Erfassung der individuellen Flugbewegungen im Gebiet des Testfelds nach der Errichtung der FWEA und vergleichende Analysen des Flugverhaltens von Rotmilanen bezogen auf Phase 1 (vor der Errichtung).

Im vorliegenden Bericht wurden insbesondere folgende Fragestellungen untersucht:

- Gibt es Hinweise, dass das Flugverhalten der Rotmilane von der Präsenz und/oder der Drehung der Rotoren der FWEA beeinflusst wird?
- Gibt es Hinweise, dass sich die Windverhältnisse auf das Flugverhalten der Rotmilane bezüglich der FWEA auswirken?

1.3.2 Individuelle Flugbewegungen und Datengrundlage

Daten zu individuellen Flugbewegungen werden seit Beginn des Projekts mittels GPS-besenderten Rotmilanen und mittels Laser-Range-Finder (LRF) erhoben (vgl. Musiol et al. 2023). Um Hinweise zu erhalten, ob die Präsenz und/oder die Drehung der FWEA kombiniert mit den Windverhältnissen in irgendeiner Art und Weise einen Effekt auf das Flugverhalten der Rotmilane hat, wurde eine Analyse des Flugverhaltens in Abhängigkeit der unterschiedlichen Phasen des vorliegenden Projekts durchgeführt. Dazu wurden die einzelnen Ortungspunkte der mittels GPS- und LRF erfassten Flugwege mit den Betriebsdaten der FWEA und den Meteorologischen Daten verschnitten. Im Vergleich zur Analyse der Radardaten (Kap. 1.2.2) wurden für die Analyse der individuellen Flugbewegungen lediglich drei Kategorien von Phasen respektive

Betriebszuständen verwendet. Der Betriebszustand „mit FWEA on, schnell drehend“ wurde aufgrund der geringen Datengrundlage verworfen.

Zur Zeit der Erstellung des vorliegenden Berichts standen für die Analysen des Flugverhaltens der Rotmilane aus dem Umkreis von 2.000 m um das Testfeld herum folgende Anzahlen von Flugwegen zur Verfügung (Tab. 17):

- Phase 1, ohne FWEA: 8.072
- Phase 2, mit FWEA off (im Trudelmodus): 1.712
- Phase 2, mit FWEA drehend: 93

Tab. 17: Datengrundlage der individuellen Flugbewegungen pro Phase in Abhängigkeit der Methode, des Individuums und der Jahre. Angegeben ist der Zeitraum, aus welchem die Flugbewegungen stammen und deren Anzahl (N) im Umkreis von 2.000 m um das Testfeld herum auf dem Plateau der Schwäbischen Alb.

Methode	Individuum	Phase 1: ohne FWEA				Phase 2: mit FWEA off		Phase 2: mit FWEA on
		2019 (N)	2020 (N)	2021 (N)	2022 (N)	2023 (N)	2024 (N)	2024 (N)
GPS	180810 ("Franzl")	23.05.- 28.09. (766)	28.03.- 01.08. (869)	21.02.- 21.06. (194)	23.03.- 13.11. (919)	11.03.- 06.11. (652)	14.02.- 02.11. (302)	25.05.- 02.11. (18)
GPS	180909 ("Donzi")	06.06.- 01.11. (668)	20.02.- 09.11. (2.909)	0	0	0	0	
GPS	180913 ("Lise")	0	0	07.07.- 15.10. (157)	0	0	0	
GPS	191777 ("Lotta")	0	0	02.07.- 20.10. (493)	0	0	0	
GPS	191773 ("Robbie")	0	0	0	25.06.- 29.06. (2)	28.05.- 06.08. (20)	02.04.- 01.10. (135)	25.05.- 01.10. (14)
GPS	234146 ("Milva")	0	0	0	0	0	23.05.- 11.10. (268)	26.05.- 11.10. (4)
LRF	Diverse	25.03.- 22.10. (486)	20.04.- 31.08. (354)	23.03.- 28.06. (161)	04.10.- 18.10. (25)	26.06.- 24.10. (203)	14.03.- 24.05. (201)	25.05.- 15.10. (57)

1.3.3 Parameter des Flugverhaltens und Verschneidung

Als Parameter des Flugverhaltens wurden die Flughöhen, die Fluggeschwindigkeiten und die minimalen radialen Annäherungsdistanzen der Rotmilane bezüglich der Nabe der FWEA verwendet.

Die Flughöhen und die Fluggeschwindigkeiten resultieren aus den einzelnen GPS- und LRF-Ortungen. Dafür wurden die GPS- und LRF-Flugwege entsprechend der Methode aus Phase 1 verarbeitet und standardisiert (GPS: 1 Wert pro 5-min Zeitintervall, LRF: 1 Wert pro 1-min Zeitintervall). Zur Verschneidung mit den Betriebsdaten der FWEA und den Meteo-Daten wurde für jede Ortung anhand des Zeitstempels bestimmt, in welchem Betriebszustand sich die FWEA zu diesem Zeitpunkt befanden und wie die meteorologischen Verhältnisse waren. Sobald zu einem gewissen Zeitpunkt mindestens eine der beiden FWEA gedreht hat, wurde eine Ortung der Phase 2: mit FWEA on zugeteilt.

Zur Bestimmung der minimalen radialen Annäherungsdistanz wurden diejenigen Flugwege ausgewählt, die im Durchschnitt eine zeitliche Auflösung von höchstens 30 s aufwiesen. Mittels QGIS wurden die Koordinaten entlang der Verbindungslinien zwischen den einzelnen Ortungen im Abstand von 1 m interpoliert. Weiter wurde im dreidimensionalen Raum für jede Koordinate der Abstand zur Nabe der FWEA Nord und der FWEA Süd bestimmt. Die Koordinate mit dem geringsten Abstand innerhalb eines Flugwegs definiert somit den Punkt mit der minimalen radialen Annäherungsdistanz. Ausgeschlossen wurden diejenigen Flugwege, bei welchen die erste oder die letzte Ortung der minimalen radialen Annäherungsdistanz entsprach (Puffer ± 10 m). In diesen Fällen konnte keine minimale radiale Annäherungsdistanz bestimmt werden, da die Flugwege entweder nur die Annäherungs- oder nur die Entfernungsphase enthielten. Im ersten Fall (nur Annäherungsphase) ist davon auszugehen, dass sich ein Rotmilan nach Abschluss der LRF-Erfassung noch näher angenähert hat und im zweiten Fall (nur Entfernungsphase), dass ein Rotmilan vor Beginn der LRF-Erfassung näher war. Zur Verschneidung mit den Betriebsdaten der FWEA und den Meteo-Daten wurde für jede minimale radiale Annäherungsdistanz anhand ihres Zeitstempels bestimmt, in welchem Betriebszustand sich die entsprechende FWEA zu diesem Zeitpunkt befand und wie die meteorologischen Verhältnisse waren.

1.3.4 Statistische Analyse Flugverhalten Rotmilane

Von ziehenden Schwarzmilanen ist bekannt, dass Effekte von Windparks auf das Flugverhalten der Schwarzmilane bis zu einem Umkreis von 700 bis 850 m auftreten (Santos et al. 2021). Für die statistische Analyse, ob es Hinweise gibt, dass das Flugverhalten der Rotmilane von der Präsenz und/oder der Drehung der Rotoren der FWEA in Abhängigkeit des Windes beeinflusst wird, wurden daher lediglich die Daten aus dem Umkreis von 700 m um das Testfeld herum verwendet. Ein weiterer Grund für die Auswahl der Daten besteht darin, dass die meisten Datenpunkte innerhalb dieses Umkreises liegen. Eine Auswertung in Abhängigkeit der Distanz kann im weiteren Verlauf des Projekts angegangen werden (siehe Kap. 1.3.7).

Die statistischen Analysen wurden mit der Software R (Version 4.4.2, R Core Team 2024) vorgenommen. Dabei wurden generalisierte lineare gemischte Modelle GLMM mit Bayes'schen Methoden angewendet, wie sie in der Software „Stan“ (Carpenter et al. 2017) implementiert sind. Auf „Stan“ wurde über das R-Paket „brms“ (Bürkner 2017) zugegriffen. In allen Modellen wurden die kontinuierlichen Prädiktorvariablen auf einen Mittelwert von Null zentriert und auf eine Standardabweichung von eins skaliert. Zur Anpassung des Modells wurden vier Markov-Ketten mit einer Länge von jeweils 4000 verwendet. Die zweite Hälfte der Ketten wurde dazu verwendet, um die posterioren Verteilungen der Modellparameter zu beschreiben. Die Konvergenz der Ketten wurde mit Hilfe der im R-Paket „shinystan“ (Gabry und Veen 2022) implementierten Standarddiagnose und die Modellanpassung mithilfe der grafischen

posterioren prädiktiven Modellprüfung bewertet. Zudem wurde die zeitliche Autokorrelation in den Residuen überprüft.

Für jeden Verhaltensparameter (abhängige Variablen: Flughöhe, Fluggeschwindigkeit und minimale radiale Annäherungsdistanz, Tab. 18) wurde separat ein lineares gemischte Effekte Modell auf der Grundlage einer Normalverteilung berechnet. Als erklärende Variablen flossen in die Modelle jeweils die Phase (Faktor mit drei Ebenen: „ohne FWEA“, „mit FWEA off (im Trudelmodus)“, „mit FWEA on (drehend)“), die Windgeschwindigkeit (kontinuierlich, als einfacher und quadratischer Effekt), die Standardabweichung der Windgeschwindigkeit (kontinuierlich, als einfacher und quadratischer Effekt) sowie die Interaktion der Phase mit den Effekten der Windgeschwindigkeit und der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit ein. Aus Phase 1 ist bekannt, dass die gemessene Flughöhe und Fluggeschwindigkeit auch von der Messmethode beeinflusst werden (Aschwanden et al. 2024). Daher wurde in den Modellen als erklärende Variable zusätzlich die Messmethode (Faktor mit zwei Ebenen: GPS, LRF) einbezogen. Weiter wurden das Datum und nur betreffend Flughöhe/Fluggeschwindigkeit die Track-ID als zufällige Effekte berücksichtigt.

Tab. 18: Datengrundlagen (N), die für die Berechnung der statistischen Modelle verwendet worden sind (horizontaler Umkreis von 700 m um das Testfeld herum). N Flughöhe und N Fluggeschwindigkeit = Anzahl Ortungen aus standardisierten Daten, N minimale radiale Annäherungsdistanz = Anzahl Flugwege.

Phase	Flughöhe	Fluggeschwindigkeit	Minimale radiale Annäherungsdistanz
Ohne FWEA	6.172	6.150	2.279
Mit FWEA off (im Trudelmodus)	2.263	2.136	1.027
Mit FWEA on (drehend)	272	259	98

1.3.5 Ergebnisse individuelle Flugbewegungen

Mit den FWEA im Trudelmodus (Phase 2: mit FWEA off) war die Flughöhe im Umkreis von 700 m um das Testfeld herum insgesamt (Abb. 32a) und auch in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit (Abb. 32c) höher als in Phase 1 (ohne FWEA). Für Phase 2 mit FWEA drehend (mit FWEA on) lässt sich aufgrund der breiten Glaubwürdigkeitsintervalle (Abb. 32a und c), welche aus der dünnen Datengrundlage resultieren, noch keine Aussage treffen.

Weiter bestätigen sich Effekte, die bereits in Phase 1 festgestellt worden sind. So liegt die Flughöhe von mittels LRF gemessenen Flugwegen höher als von mittels GPS erfassten Flugwegen (Abb. 32b) und die Flughöhe sinkt mit zunehmender Windgeschwindigkeit (Abb. 32c).

Die Flughöhe wird von der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit (Böigkeit) beeinflusst (Abb. 32d). Der Verlauf der Effekte ist für Phase 2 aufgrund der dünnen Datengrundlage aber noch nicht aussagekräftig. Für Phase 1 kann gesagt werden, dass die Flughöhe bis zu einer gewissen Standardabweichung zu- und dann mit zunehmend grösserer Standardabweichung wieder abnimmt.

Die Fluggeschwindigkeit der Rotmilane scheint weder von der Phase noch von der Messmethode abhängig zu sein (Abb. 33a und b). Auch im Zusammenhang mit der

Windgeschwindigkeit oder der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit sind (noch) keine klaren Effekte ersichtlich (Abb. 33c und d), da die Datengrundlage bei höheren Windgeschwindigkeiten und grösseren Standardabweichungen der Windgeschwindigkeit dünn ist.

Mit den FWEA im Trudelmodus (Phase 2: mit FWEA off) war die minimale radiale Annäherungsdistanz im Umkreis von 700 m um das Testfeld herum insgesamt (Abb. 34a) und auch in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit (Abb. 34c) höher als in Phase 1 (ohne FWEA). Für Phase 2 mit FWEA drehend (mit FWEA on) lässt sich aufgrund der breiten Glaubwürdigkeitsintervalle (Abb. 34a und c), welche aus der dünnen Datengrundlage resultieren, noch keine Aussage treffen.

In Phase 1 (ohne FWEA) hatte die Windgeschwindigkeit erwartungsgemäß kaum einen Effekt auf die minimale radiale Annäherungsdistanz (Abb. 34c). Mit den FWEA im Trudelmodus nahm die minimale radiale Annäherungsdistanz ab einer gewissen Windgeschwindigkeit zu. Der Verlauf des Effektes mit drehenden FWEA ist aufgrund der dünnen Datengrundlage noch nicht aussagekräftig (Glaubwürdigkeitsintervall umfasst alle möglichen Richtungen des Verlaufs).

Beim Einfluss der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit auf die minimale radiale Annäherungsdistanz kann einzig gesagt werden, dass die minimale radiale Annäherungsdistanz mit zunehmender Standardabweichung des Windes abnimmt (Abb. 34d). Ohne FWEA ist nicht zu erwarten, dass die Standardabweichung des Windes einen Effekt auf die minimale radiale Annäherungsdistanz aufweist. So umfasst das Glaubwürdigkeitsintervall auch die Möglichkeit, dass der Effekt geradlinig verlaufen könnte, so dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass kein Effekt auftrat. Der Verlauf des Effektes mit drehenden FWEA ist aufgrund der dünnen Datengrundlage noch nicht aussagekräftig (Glaubwürdigkeitsintervall umfasst alle möglichen Richtungen des Verlaufs).

Die Messmethode hatte auf die minimale radiale Annäherungsdistanz nur geringfügig einen Einfluss (Abb. 34b). So lagen die minimalen radialen Annäherungsdistanzen der Flugwege, die mit LRF erfasst worden sind, leicht näher als die minimalen radialen Annäherungsdistanzen der Flugwege, die mit GPS erfasst worden sind.

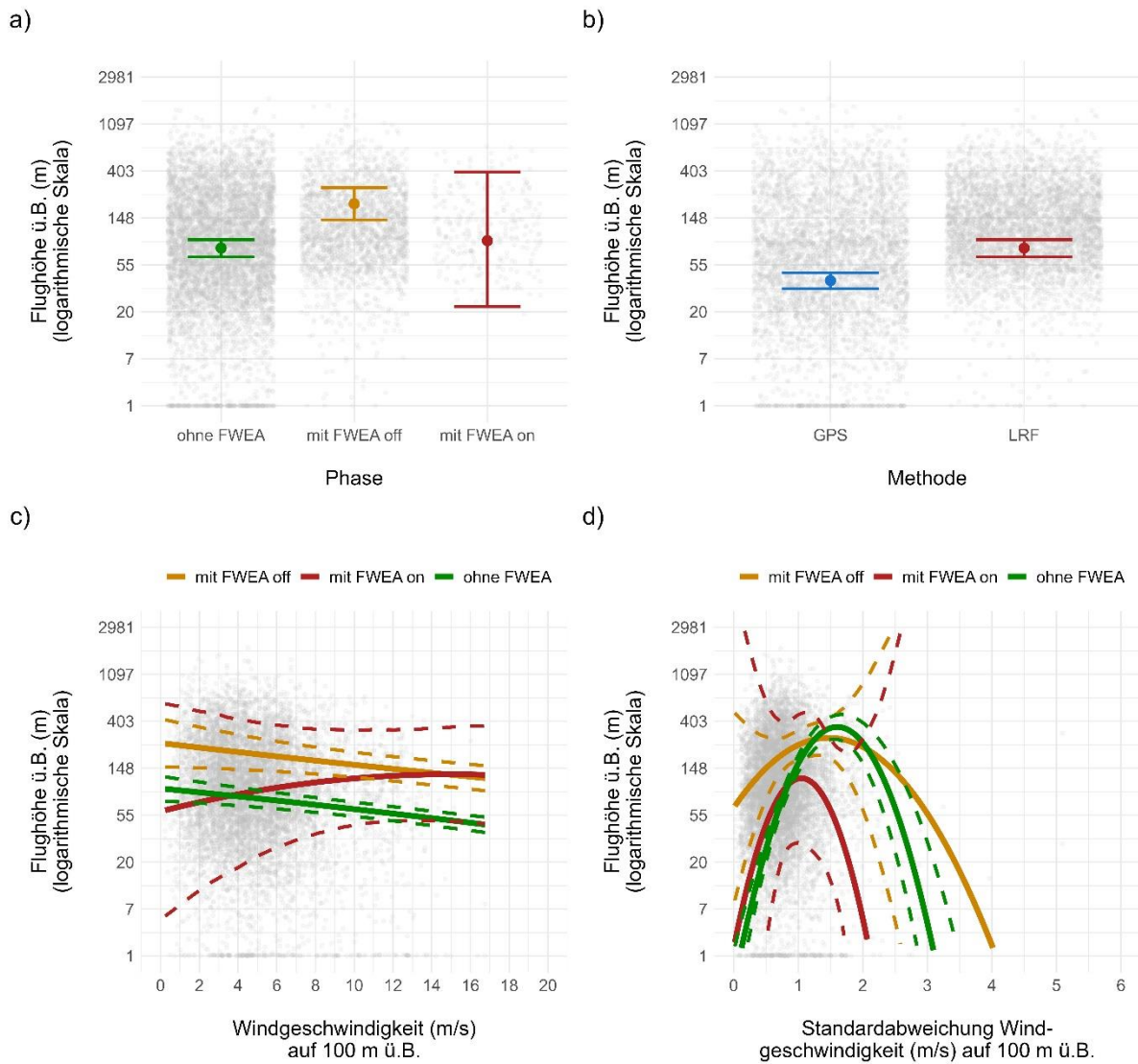


Abb. 32: Einfluss der Phase (a), der Methode (b), der Windgeschwindigkeit (c) und der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit (d) auf die Flughöhe ü.B. der Rotmilane. Dargestellt sind jeweils die den Modellschätzungen zugrundeliegende Daten (graue Punkte) und die Modellschätzungen (Punkte bei a und b oder durchgezogene Linien bei c und d) zusammen mit den oberen und unteren Grenzen der Glaubwürdigkeitsintervalle (T-Linien bei a und b oder gestrichelte Linien bei c und d). N=Anzahl Ortungen (standardisierte Daten), ohne FWEA: N=6.172, mit FWEA off im Trudelmodus: N=2.263, mit FWEA drehend: N=272, Methode GPS: N=4.259, Methode LRF: N=4.448. Aufgrund der teilweise dünnen Datengrundlage (weit ausladende Glaubwürdigkeitsintervalle) kann der Verlauf der Effekte noch nicht als gesichert betrachtet werden.

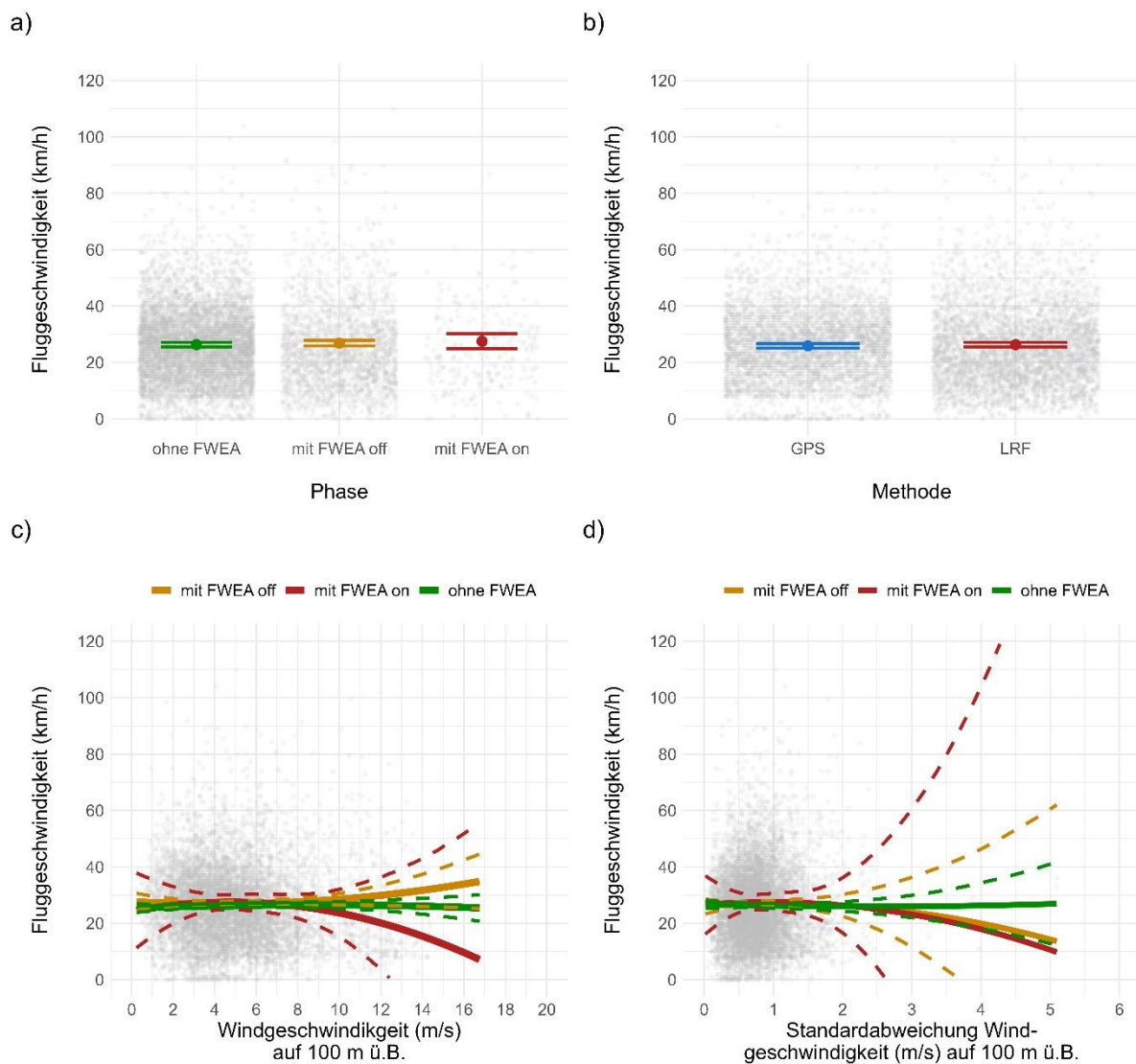


Abb. 33: Einfluss der Phase (a), der Methode (b), der Windgeschwindigkeit (c) und der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit (d) auf die Fluggeschwindigkeit der Rotmilane. Dargestellt sind jeweils die den Modellschätzungen zugrundeliegenden Daten (graue Punkte) und die Modellschätzungen (Punkte bei a und b oder durchgezogene Linien bei c und d) zusammen mit den oberen und unteren Grenzen der Glaubwürdigkeitsintervalle (T-Linien bei a und b oder gestrichelte Linien bei c und d). N=Anzahl Ortungen (standardisierte Daten), ohne FWEA: N=6.150, mit FWEA off im Trudelmodus: N=2.136, mit FWEA drehend: N=259, Methode GPS: N=4.299, Methode LRF: N=4.246. Aufgrund der teilweise dünnen Datengrundlage (weit ausladende Glaubwürdigkeitsintervalle) kann der Verlauf der Effekte noch nicht als gesichert betrachtet werden.

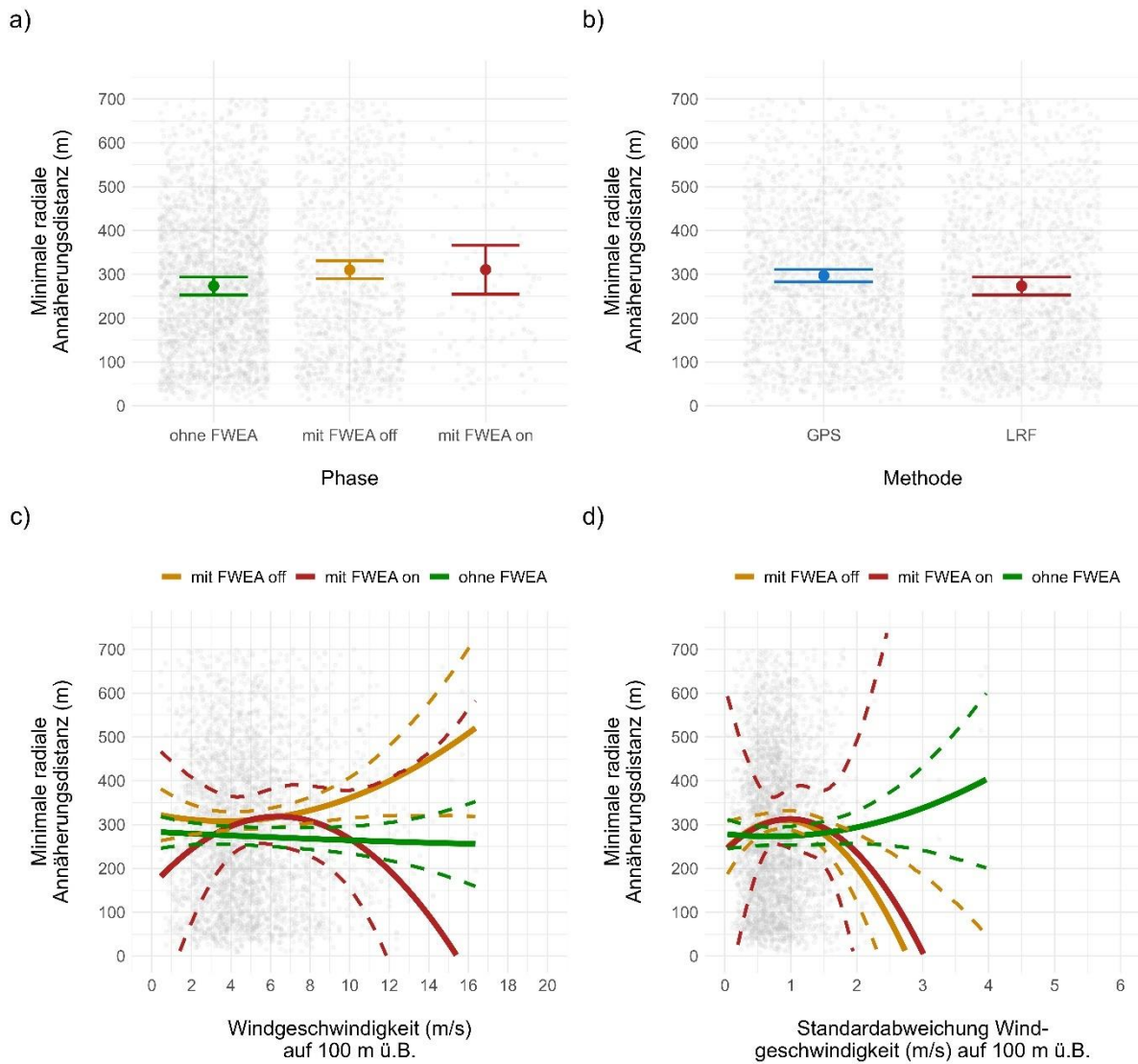


Abb. 34: Einfluss der Phase (a), der Methode (b), der Windgeschwindigkeit (c) und der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit (d) auf die minimale radiale Annäherungsdistanz der Rotmilane bezüglich der Nabe der FWEA. Dargestellt sind jeweils die den Modellschätzungen zugrundeliegende Daten (graue Punkte) und die Modellschätzungen (Punkte bei a und b oder durchgezogene Linien bei c und d) zusammen mit den oberen und unteren Grenzen der Glaubwürdigkeitsintervalle (T-Linien bei a und b oder gestrichelte Linien bei c und d). N=Anzahl Flugwege, ohne FWEA: N=2.279, mit FWEA off im Trudelmodus: N=1.027, mit FWEA drehend: N=98, Methode GPS: N=1.747, Methode LRF: N=1.657. Aufgrund der teilweise dünnen Datengrundlage (weit ausladende Glaubwürdigkeitsintervalle) kann der Verlauf der Effekte noch nicht als gesichert betrachtet werden.

1.3.6 Diskussion individuelle Flugbewegungen

Im Fokus des vorliegenden Berichts lag die Fragestellung, ob es Hinweise darauf gibt, dass das Flugverhalten der Rotmilane von der Präsenz und/oder der Drehung der Rotoren der FWEA beeinflusst wird und ob es Hinweise darauf gibt, dass sich die Windverhältnisse auf das Flugverhalten der Rotmilane bezüglich der FWEA auswirken.

Generell lässt sich sagen, dass sich zum Einfluss der Drehung der Rotoren der FWEA noch keine Aussagen treffen lassen, da die Datengrundlage momentan noch zu dünn ist. Dünn ist die Datengrundlage oft auch bei höheren Windgeschwindigkeiten und größeren Standardabweichungen des Windes (Böigkeit). Aufgrund dieser Datengrundlage sind bei der statistischen Modellierung teilweise sehr breite und divergent verlaufende Glaubwürdigkeitsintervalle entstanden. Innerhalb der oberen und unteren Grenzen der Glaubwürdigkeitsintervalle kann ein Effekt grundsätzlich beliebig verlaufen. Bei scherenförmig auseinanderdriftenden Glaubwürdigkeitsintervallen könnten die Effekte somit sowohl positiv, neutral oder auch negativ verlaufen. In solchen Fällen ist die statistische Unsicherheit daher besonders groß. Im weiteren Verlauf werden lediglich diejenigen Effekte diskutiert, die zurzeit einigermaßen aussagekräftig sind.

Bis anhin ist uns keine Studie bekannt, die den Effekt der bloßen Präsenz von WEA auf das Verhalten von Vögeln untersucht hat. Im Normalfall ist die Drehgeschwindigkeit der Rotoren von WEA an die Windgeschwindigkeit gekoppelt. Bei Feststellung eines Effekts kann daher jeweils nicht unterschieden werden, ob ein Effekt durch die Drehgeschwindigkeit der Rotoren oder der Windgeschwindigkeit verursacht wird. Mit der vorliegenden Studie ist es möglich, den Effekt der bloßen Präsenz der FWEA auf das Flugverhalten der Rotmilane in Abhängigkeit der Windverhältnisse zu untersuchen.

Mit Präsenz der FWEA im Trudelmodus waren sowohl die Flughöhe wie auch die minimale radiale Annäherungsdistanz im Vergleich zu Phase 1 (ohne FWEA) grösser. Zudem wirkte sich die Windgeschwindigkeit und die Standardabweichung der Windgeschwindigkeit (Böigkeit) auf die minimale radiale Annäherungsdistanz im Vergleich zur Phase 1 (ohne FWEA) anders aus. Während für Phase 1 (ohne FWEA) erwartungsgemäß kaum Effekte auftraten, nahm die minimale radiale Annäherungsdistanz mit zunehmender Windgeschwindigkeit tendenziell zu und mit zunehmender Standardabweichung der Windgeschwindigkeit (Böigkeit) ab.

Bis jetzt sind uns keine direkt vergleichbaren Studien bekannt. Gémard et al. 2025 werteten die Annäherungsdistanzen gepoolt über mehrere Windparks in Frankreich und über verschiedene Vogelarten aus, die mit automatischen Vogeldetektionssystemen erfasst worden sind und untersuchten die Annäherungsdistanz in Abhängigkeit unterschiedlicher Variablen, darunter auch die Windgeschwindigkeit und die Rotorgeschwindigkeit. Sie stellten fest, dass die Vögel mit zunehmender Rotorgeschwindigkeit mehr Abstand hielten. Gleichzeitig nahm der Abstand bis zu einer gewissen Windgeschwindigkeit ab (5-10 m/s) und dann wieder zu. Sie erklärten den Effekt damit, dass die WEA bei einer gegebenen Windgeschwindigkeit nicht immer gleich schnell gedreht haben, da die WEA zwischendurch aus unterschiedlichen Gründen abgestellt waren. Es wurde jedoch keine separate Analyse der Daten vorgenommen. In unserem Fall, mit den FWEA im Trudelmodus, nahm der Abstand ab einer Windgeschwindigkeit von rund 6 m/s mit zunehmender Windgeschwindigkeit tendenziell zu. Die Böigkeit des Windes wurde von Gémard et al. 2025 nicht berücksichtigt.

Im Review von Marques et al. 2014 zur Thematik von Vogelkollisionen an WEA wird im Zusammenhang mit starkem Wind der negative Einfluss auf die Kontrolle der Flugmanövrierfähigkeit

der Vögel erwähnt. Es ist plausibel anzunehmen, dass auch die Böigkeit des Windes die Kontrolle der Manövrierfähigkeit reduziert. Möglicherweise halten die Rotmilane bei starkem Wind zu den FWEA im Trudelmodus mehr Abstand, damit sie vom Wind nicht zu nahe an die FWEA herangetragen werden. Mit böigem Wind dürfte die Kontrolle der Distanz zu den FWEA schwieriger sein als bei ruhigem Wind, so dass sie mit böigem Wind näher an die im Trudelmodus befindlichen FWEA herangetragen werden als bei ruhigem Wind. Auf eine Deutung der Ergebnisse mit drehenden FWEA wird verzichtet, da die Effekte aufgrund der dünnen Datengrundlage noch nicht interpretiert werden dürfen.

1.3.7 Ausblick individuelle Flugbewegungen Phase 2.2

Ziel von Phase 2.2 (2025/2026) wird vor allem die Verdichtung der Datengrundlage mit operationellen FWEA sein und die systematische Durchführung des Experiments zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Betriebszustände der FWEA auf das Flugverhalten der Rotmilane. Dabei soll auch eine Drosselung der maximalen Rotorgeschwindigkeit vorgenommen werden.

Wanner (2017) stellte fest, dass die Effekte einer WEA auf die Annäherungsdistanz von verschiedenen Greifvogelarten abnahm, je mehr weiter entfernte Datenpunkte (aus einem größeren Umkreis) einbezogen worden sind. Wenn im vorliegenden Projekt mehr Daten zur Verfügung stehen wird deshalb geprüft, ob die Entfernung zwischen FWEA und Datenpunkten als Variable in die Analysen mit einbezogen werden kann, da Effekt der FWEA auf das Flugverhalten der Rotmilane nur innerhalb eines gewissen Umkreises zu erwarten sind. Es wäre interessant herauszufinden, bis zu welcher Entfernung Auswirkungen auf das Flugverhalten bestehen.

Bei weiteren Analysen sollen zudem mehr meteorologische Parameter einfließen. Insbesondere der Einbezug der Sichtweite wäre hinsichtlich der Kollisionsproblematik von Rotmilanen von großer Wichtigkeit. Da in den bisherigen Daten zur Sichtweite große Datenlücken auftreten muss jedoch zuerst geprüft werden, ob alternative Datengrundlagen genutzt werden können (z.B. vom Deutschen Wetterdienst, ERA5-Reanalysis Daten).

1.4 Test Detektionssysteme

Im Verlauf von Phase 2.1 sind gemäß den Kriterien des Kompetenzzentrums für Naturschutz und Energiewende (KNE) zwei automatische Vogeldetektionssysteme getestet worden. Im ersten Test wurde der vom ZSW entwickelte BirdRecorder und im zweiten Test das von Bio-seco entwickelte BPS Long-Range System untersucht (Abb. 35). Bei beiden Systemen handelt es sich um kamerabasierte Detektionssysteme. Die Ergebnisse der Tests liegen in separaten Berichten vor (Aschwanden und Helm 2024a; Aschwanden und Helm 2024b).



Abb. 35: Vogeldetektionssystem BirdRecorder (links; Quelle: J. Aschwanden) und BPS Long-Range von Bioseco; Quelle: Bioseco.

2 Fledermäuse

Bruntje Lüdtke und Horst Schauer-Weißhahn

Ziel der fledermausbasierten Naturschutzbegleitforschung am Windenergie-testfeld auf der Schwäbischen Alb ist es, zu einem besseren Verständnis über das Fledermausvorkommen und -verhalten an WEA zu gelangen. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Erhebungen sollen die Prognosesicherheit der Fledermausaktivität und damit die bestehenden Vermeidungsmaßnahmen verbessern. Dabei werden bewährte und neuartige Technologien eingesetzt, die es ermöglichen, ökologische Daten sowie Umweltparameter und technische Betriebsdaten in Zusammenhang zu setzen. Neue Ansätze bei Vermeidungsmaßnahmen, wie z.B. die Berücksichtigung der aktuellen Fledermausaktivität zur Abschaltung der Anlagen, sollen im Testfeld überprüft werden.

Entscheidend für eine Optimierung von Vermeidungsmaßnahmen ist eine solide Datenbasis, die die Fledermausaktivität umfassend, dauerhaft und in verschiedenen Höhen erfasst. Hierzu eignen sich insbesondere erprobte akustische Verfahren, welche zusätzlich eine Art-/Artgruppenbestimmung der aufgenommenen Fledermäuse erlauben. Um den Einfluss von WEA auf das Verhalten und die Aktivität von Fledermäusen beurteilen zu können, sind allerdings nicht nur akustische Daten von den WEA selbst nötig, sondern auch Kenntnisse über Verhaltens- und Aktivitätsmuster der Fledermäuse in einem weitgehend unbeeinflussten Umfeld. Ermöglicht wird dies über stratifizierte akustische Dauererfassungen an den Messmasten im Forschungstestfeld. Zusätzlich werden auch die Aktivität und das Vorkommen der Fledermäuse im Raum um das Testfeld mittels akustischer Methoden untersucht. Die eingesetzte Kombination aus einer detaillierten Erfassung in verschiedenen Höhen innerhalb des Testfelds (WEA und Messmasten) und einer flächigen Erfassung in der näheren Umgebung des Testfelds ermöglichen eine Einschätzung der Fledermausaktivität im untersuchten Raum und deren Abhängigkeit von der Anwesenheit der WEA. Dabei können auch artspezifische Rückschlüsse auf das Verhalten und das zeitliche Auftreten gezogen werden.

Im Forschungsprojekt fanden zwischen 2018 und 2022 Vorher-Untersuchungen (Phase 1 des Projekts) in dem in Planung befindlichen Windenergie-testfeld statt. Dazu wurden Daten an den bereits errichteten Windmessmasten und in der näheren Umgebung des Testfelds erhoben. In dieser Zeit befanden sich noch keine WEA auf dem Testfeld, sodass die gewonnenen Daten einen weitgehend unbeeinflussten Zustand widerspiegeln. Die Errichtung der Forschungs-WEA (FWEA) erfolgte im Verlauf des Jahres 2023 und somit startete Phase 2 des Projekts. Der reguläre Betrieb der zwei Anlagen startete im Sommer 2024. Die aus dem Jahr 2023 gewonnenen Daten beinhalten somit das möglicherweise veränderte Verhalten der Fledermäuse gegenüber den neuen Strukturen im Testfeld, je nach Windverhältnissen mit trudelnden Rotoren, ab Sommer 2024 auch im offiziellen Betrieb.

Die Aktivität von Fledermäusen an WEA ist stark von Witterungsparametern abhängig. Für eine Verbesserung der Vermeidungsmaßnahmen zur Reduktion des Kollisionsrisikos an WEA ist ein besseres Verständnis des Auftretens von Fledermäusen in Abhängigkeit von Witterungsparametern (z.B. Temperatur, Niederschlag, verschiedene Windverhältnisse) notwendig. Während der Projektlaufzeit wurden und werden daher Witterungs- und Umweltparameter erfasst und in Abhängigkeit der ökologischen Daten analysiert. Die Vorher-Erfassungen erlauben die Korrelation der Witterungs- und Aktivitätsdaten bereits im unbeeinflussten Zustand, so dass mögliche, durch die WEA induzierte Effekte besser identifiziert werden können. Aus den bisherigen Erkenntnissen wurden experimentelle Ansätze zur Untersuchung der

Wirkzusammenhänge konzeptionell erarbeitet, die mit WEA in Betrieb getestet werden sollen.

2.1 Akustische Erfassung von Fledermäusen (AP 3.1)

2.1.1 Methodische Grundlagen

2.1.1.1 Technik

Für die Erfassung der Fledermausrufe in den verschiedenen Höhen des Messmasts wurde das BATmode S+ System (bat bioacoustictechnology GmbH, Winkelhaid) eingesetzt. Das Batmode S+ System nimmt Rufsequenzen von Fledermäusen auf und speichert sie digital mit hoher Qualität (300 kHz, 16 bit) auf der Festplatte des Systemrechners ab und sichert diese extern auf einem USB Flash Drive. Durch eine Aufnahmesteuerung können Störgeräusche zu einem großen Teil ausgeschlossen werden. Die Einstellung der Aufnahmeparameter des BATmode S+ Systems, das auf dem Avisoft-System (Avisoft Bioacoustics, Glienicke) aufbaut, erfolgte nach den Vorgaben des Forschungsvorhabens von Behr et al. (2016). Der Trigger Threshold wurde auf 37 dB SPL eingestellt. Beim BATmode S+ System wird der Posttrigger über die Hold Zeit von 1 s gesteuert, was dazu führt, dass ganze Rufreihen z.B. des Abendseglers in einer Aufnahme aufgezeichnet werden.

Das BATmode S+ System besteht aus einem Windows®-Rechner, einem UltraSoundGate (USG), bei dem es sich um einen A/D-Wandler handelt und einer Mikrofoneinheit, in die neben dem Mikrofon ein Ultraschallgeber eingebaut ist. Die Steuerung des Aufnahmegeräts erfolgt über die Batcontrol Software (bat bioacoustictechnology GmbH, Winkelhaid), auf die über WLAN oder über das Internet zugegriffen werden kann. Dies ermöglicht eine Fernüberwachung, über die das System auch gesteuert werden kann. Über eine tägliche Status-SMS bzw. Email werden Informationen über den Zustand des Systems, die Anzahl der Aufnahmen der letzten Nacht, der vorhandenen Speicherkapazität und weitere Informationen übermittelt. Der in die Mikrofoneinheit eingebaute Signalgeber erzeugt einmal am Tag außerhalb der Aufnahmezeit ein standardisiertes Signal, mit dem die Mikrofonempfindlichkeit gemessen wird. Auch dieser Messwert wird über die Statusmeldung weitergegeben. Die Wartung und Kalibrierung der Mikrofone erfolgt nach jeder Messsaison durch den Hersteller bat bioacoustictechnology GmbH.

Für die Erfassungen in der Umgebung um das Testfeld wurden Batcorder der Firma ecoObs GmbH mit der zusätzlichen Erweiterung für eine wettergeschützte und energetisch autarke Erfassung im Freiland („Waldbox“) verwendet. Der Batcorder nimmt Rufsequenzen von Fledermäusen auf und speichert sie digital mit hoher Qualität (500 kHz, 16 bit) auf einer austauschbaren SDHC-Karte ab. Durch eine Aufnahmesteuerung können Störgeräusche teilweise ausgeschlossen werden. Die Einstellung der Aufnahmeparameter der Batcorder erfolgte nach den Vorgaben des Forschungsvorhabens (Brinkmann et al. 2011). Dabei wurde die Empfindlichkeit auf -36 dB und die Posttrigger-Zeit auf 400 ms eingestellt. Die übrigen Parameter entsprachen der Standardeinstellung des Herstellers (vgl. Batcorder 3 Bedienungsanleitung V3.00, März 2013). Die Mikrofone wurden vor dem Einsatz vom Hersteller nach einem Standardverfahren kalibriert. Die Waldbox-Erweiterung beinhaltet ein Steuermodul, einen 12 V Bleigel-Akkumulator, ein Solarpanel und ein Scheibenmikrofon. Das Steuermodul regelt nicht nur die Stromversorgung, sondern versendet täglich eine Statusmeldung (SMS) zur Überwachung der Erfassung mit Angaben zur Anzahl der Aufnahmen (von vorhergehender Nacht und gesamt), zum verbleibenden Speicherplatz auf der SDHC-Karte und möglichen Meldungen

zu Problemen mit der Stromversorgung. Ein in die Mikrofonscheibe eingebauter Signalgeber, der ebenfalls durch das Modul gesteuert wird, erzeugt beim abendlichen Einschalten und morgendlichen Abschalten des Batcorders ein standardisiertes Signal, mit dem die Mikrofonempfindlichkeit gemessen wird. Auch diese Messwerte werden über die Statusmeldung weitergegeben. Als zusätzliche Information wird die Nacht-Tiefsttemperatur übermittelt.

2.1.1.2 Auswertung akustischer Daten

Die Auswertung der Daten des BatMode-Systems, das auf einem Avisoft UltraSoundGate basiert, erfolgte mit dem Programm BATscreen PRO (Version 2.0.1, 15. Januar 2019) von bioacoustictechnology GmbH. Dabei wurde die Artbestimmung gänzlich manuell durchgeführt, da bestehende automatisierte Auswertelgorithmen für die Gondelerfassung konzipiert wurden und einige Arten und Artengruppen, die im hiesigen Projekt in Bodennähe aufgezeichnet wurden, nicht berücksichtigen. Beim Batcorder der Firma ecoObs, Nürnberg, handelt es sich um eine automatische akustische Erfassungseinheit für die Aufnahme von Ultraschalllauten. Die Rufsequenzen, die mittels der Batcorder in den Waldboxen aufgezeichnet wurden, wurden mit der Software bcAdmin v3.5.6, bcAnalyze2 v1.0 sowie batIdent v1.51 analysiert. Die automatische Identifikation der Software muss im Weiteren auf ihre Plausibilität hin überprüft werden. Dafür wurden alle Rufsequenzen manuell überprüft und die automatische Bestimmung unter Verwendung der aktuellsten Bestimmungsliteratur validiert (Russ 2012; Marckmann 2020). Die Bestimmung erfolgt bei der Gattung *Pipistrellus* und der Mopsfledermaus in der Regel auf Artniveau. Auch Rufe des Abendseglers können eindeutig zugeordnet werden, sofern die Hauptfrequenz unter 20 kHz liegt. Zum Teil werden die Rufsequenzen jedoch nur einer Gruppe ähnlich rufender Arten zugeordnet. Dies ist bei der Gruppe „Nyctaloid“ der Fall, da es oftmals nicht möglich ist, akustisch zwischen den ähnlich rufenden Arten Kleinabendsegler, Abendsegler, Breitflügelfledermaus, Nordfledermaus und Zweifarbfledermaus zu unterscheiden (Tab. 19). Ähnlich verfahren wird, wenn Rufe der Gattung *Pipistrellus* und ähnlich rufender Arten (z.B. Langflügelfledermaus, Alpenfledermaus) nicht eindeutig bestimmt werden können; diese Rufe werden dann der Übergruppe „Pipistrelloid“ zugerechnet. Auch Arten der Gattung *Myotis* und *Plecotus* lassen sich aufgrund ihrer sehr ähnlichen Rufcharakteristika oft nicht auf Artebene aufschlüsseln (Tab. 19).

Tab. 19: Bestimmungskategorien für die Zuordnung der Aufnahmen der akustischen Erfassungen zu bestimmten Arten bzw. Artengruppen.

Kategorie	Erläuterung
Art	Abendsegler (<i>Nyctalus noctula</i> , N.noct), Hauptfrequenz <20 kHz Rauhautfledermaus (<i>Pipistrellus nathusii</i> , P.nath), Hauptfrequenz 35-40 kHz Zwergfledermaus (<i>Pipistrellus pipistrellus</i> , P.pipi), Hauptfrequenz 43-50 kHz Mückenfledermaus (<i>Pipistrellus pygmaeus</i> , P.pygm), Hauptfrequenz 53-60 kHz Mopsfledermaus (<i>Barbastella barbastellus</i> , B.barb), typischer Rufverlauf
Nyctaloid	beinhaltet Rufsequenzen von Breitflügel- (<i>Eptesicus serotinus</i>), Nordfledermaus (<i>E. nils-sonii</i>), Kleinabendsegler (<i>Nyctalus leisleri</i>), Abendsegler (<i>N. noctula</i>) und Zweifarbfledermaus (<i>Vespertilio murinus</i>)
<i>Myotis</i> sp.	beinhaltet Rufsequenzen der Arten aus der Gattung <i>Myotis</i>

Kategorie	Erläuterung
<i>Plecotus</i> sp.	beinhaltet Rufsequenzen der Arten aus der Gattung <i>Plecotus</i>
Pipistrelloid	beinhaltet nicht eindeutig zu bestimmende Aufnahmen der Gattung <i>Pipistrellus</i> und weiterer ähnlich rufender Arten (z.B. Alpenfledermaus, Langflügelfledermaus)

Zur grafischen Veranschaulichung der räumlichen Verteilung der Fledermäuse im Windenergie-testfeld und der Phänologie (über das Jahr und die Nacht) wurde vorläufig die Anzahl der Aufnahmen pro Nacht herangezogen. Für die Korrelationen mit meteorologischen Parametern wurde als Aktivitätsmaß die An- bzw. Abwesenheit der jeweiligen Fledermausart innerhalb von 10-min-Intervallen angewendet.

2.1.1.3 Meteorologische Daten

Für die Modellierungen wurden jedem 10-min-Intervall mit Fledermausaktivität die entsprechenden Witterungsbedingungen, die ebenfalls in 10-min-Intervallen vorliegen, zugeordnet. Für die Messungen am Mast wurden jeweils die Witterungsdaten des räumlich nächstgelegenen bzw. verfügbaren Messpunkts verwendet (Tab. 20). Aufgrund fehlerhafter Messwerte des Niederschlagsensors wurden alternativ Messwerte der nahegelegenen DWD-Messstation 4887 – Stötten, die 1,9 km östlich des Windtestfelds auf dem Plateau der Kuchalb liegt, verwendet.

Tab. 20: Zuordnung der Messpunkte für die Erfassung der Witterungsparameter zu den akustischen Fledermauserfassungen in den verschiedenen Höhen an den Messmasten und FWEA sowie in der Umgebung. Abkürzungen Erfassungs-Strukturen Akustik und Meteo-Daten: BC = Batcorder; DWD = Deutscher Wetterdienst; FWEA = Forschungs-Windenergieanlage; MMNE = Messmast Nordost; MMNW = Messmast Nordwest; RWTN = Research Wind Turbine North = FWEA Nord; RWTS = Research Wind Turbine South = FWEA Süd; WMM = Windmessmast; NE = Nordost; NW = Nordwest; SE = Südost; SW = Südwest; Zahlen nach einem Unterstrich geben die Erfassungshöhe wieder

Struktur	Höhe bzw. Standort	Bezeichnung Mikrofon	Messpunkt Windgeschwindigkeit [m/s]	Messpunkt Windrichtung [°]	Messpunkt Temperatur [°C]	Messpunkt Niederschlag [mm]
Batcorder 1 bis 4	Waldrand	BC 1 – BC 4	MMNW_11	MMNW_35	MMNW_03	DWD-Station
Batcorder 5 (bis 8)	Offenland	BC 5 (– BC 8)	MMNE_11	MMNE_36	MMNE_03	DWD-Station
FWEA Nord	10m	RWTN_10	MMNE_11	MMNE_36	MMNE_03	DWD-Station
FWEA Nord	35m	RWTN_35	MMNE_47	MMNE_36	MMNE_46	DWD-Station
FWEA Nord	70m	RWTN_70	MMNE_60	MMNE_60	MMNE_73	DWD-Station
FWEA Nord	75m	RWTN_75	MMNE_98	MMNE_87	MMNE_97	DWD-Station
FWEA Süd	10m	RWTS_10	MMNE_11	MMNE_36	MMNE_03	DWD-Station

Struktur	Höhe bzw. Stand- ort	Bezeichnung Mikrofon	Messpunkt Windge- schwindigkeit [m/s]	Messpunkt Windrichtung [°]	Messpunkt Temperatur [°C]	Messpunkt Niederschlag [mm]
FWEA Süd	35m	RWTS_35	MMNE_47	MMNE_36	MMNE_46	DWD-Station
FWEA Süd	70m	RWTS_70	MMNE_60	MMNE_60	MMNE_73	DWD-Station
FWEA Süd	75m	RWTS_75	MMNE_98	MMNE_87	MMNE_97	DWD-Station
Messmast Nordost	10m	WMM_NE_10	MMNE_11	MMNE_36	MMNE_03	DWD-Station
Messmast Nordost	35m	WMM_NE_35	MMNE_47	MMNE_36	MMNE_46	DWD-Station
Messmast Nordost	65m	WMM_NE_65	MMNE_60	MMNE_60	MMNE_73	DWD-Station
Messmast Nordost	95m	WMM_NE_95	MMNE_98	MMNE_87	MMNE_97	DWD-Station
Messmast Nordwest	10m	WMM_NW_10	MMNW_11	MMNW_35	MMNW_03	DWD-Station
Messmast Nordwest	35m	WMM_NW_35	MMNW_47	MMNW_35	MMNW_46	DWD-Station
Messmast Nordwest	65m	WMM_NW_65	MMNW_59	MMNW_59	MMNW_73	DWD-Station
Messmast Nordwest	95m	WMM_NW_95	MMNW_98	MMNW_87	MMNW_97	DWD-Station
Messmast Südost	10m	WMM_SE_10	MMNE_11	MMNE_36	MMNE_03	DWD-Station
Messmast Südost	35m	WMM_SE_35	MMNE_47	MMNE_36	MMNE_46	DWD-Station
Messmast Südost	65m	WMM_SE_65	MMNE_60	MMNE_60	MMNE_73	DWD-Station
Messmast Südost	95m	WMM_SE_95	MMNE_98	MMNE_87	MMNE_97	DWD-Station
Messmast Südwest	10m	WMM_SW_10	MMNW_11	MMNW_35	MMNW_03	DWD-Station
Messmast Südwest	35m	WMM_SW_35	MMNW_47	MMNW_35	MMNW_46	DWD-Station
Messmast Südwest	65m	WMM_SW_65	MMNW_59	MMNW_59	MMNW_73	DWD-Station
Messmast Südwest	95m	WMM_SW_95	MMNW_98	MMNW_87	MMNW_97	DWD-Station

2.1.2 Überblick über die Fledermaus-Erfassungen der Phase 2.1 an den Messmasten und FWEA

2.1.2.1 2023

Die Montage der vier BATmode S+ - Systeme an Messmast Nordwest und Nordost erfolgte am 24.05.2023 durch das ZSW, wobei die Mikrofone auf den Höhen 10 m, 35 m, 65 m und 95 m angebracht und nach Westen ausgerichtet wurden. Der Abbau der Systeme erfolgte am 15.10.2023 durch das ZSW. Erst beim Abbau der Mikrofon-Systeme wurde ein schwerwiegender Software-Fehler entdeckt, der unbemerkt zu einem Totalausfall der Geräte am Messmast Nordost geführt hatte. Für das Erfassungsjahr 2023 liegen dementsprechend nur akustische Daten der vier Mikrofone von Messmast Nordwest zur Auswertung vor. Dort waren die Mikrofone für insgesamt 144 Nächte bis zum 15. Oktober installiert und ohne Ausfälle aktiv.

Zusätzlich zu den in Phase 1 installierten Geräten an den beiden nördlichen Messmasten, sollten die in Phase 1 bereits beschafften Geräte an den beiden südlichen Messmasten mit der Inbetriebnahme des Testfelds in den gleichen Höhen installiert werden. Aufgrund von Verzögerungen bei der technischen Ausstattung dieser Messmasten wurde 2023 auf deren Installation verzichtet. Auch für die beiden FWEA wurden die Erfassungsgeräte im Vorbereitungsvorhaben zu Phase 2 beschafft, deren Installation erfolgte aber ebenfalls erst 2024.

Tab. 21: Anzahl Aufnahmen mit Fledermausrufen am Messmast Nordwest im Jahr 2023.

Art/Gattung	10 m	35 m	65 m	95 m	Gesamt	Anteil (%)
Mopsfledermaus (B.barb)	52	0	0	0	52	0,13
<i>Myotis</i> -Gruppe	1.224	43	1	0	1.268	3,12
Abendsegler (N.noct)	2.050	2.268	2.285	1.718	8.321	20,46
Nyctaloid-Gruppe	5.865	6.306	4.233	1.358	17.762	43,68
Rauhautfledermaus (P.nath)	157	88	45	39	329	0,81
Zwergfledermaus (P.pipi)	8.323	2.377	1.182	707	12.589	30,96
Mückenfledermaus (P.pygm)	25	2	2	0	29	0,07
Pipistrelloid-Gruppe	93	57	34	40	224	0,55
<i>Plecotus</i> -Gruppe	83	8	0	0	91	0,22
Gesamt	17.872	11.149	7.782	3.862	40.665	

An Messmast Nordwest wurden während der Sommererfassung 2023 insgesamt 40.665 Aufnahmen mit Fledermausrufen identifiziert und eindeutig einer Art oder Artengruppe zugeordnet (Tab. 21). Die Daten waren im Jahr 2023 ähnlich verteilt wie in den Vorjahren, in denen alternierend die Zwergfledermaus (*Pipistrellus pipistrellus*) bzw. die Artengruppe Nyctaloid am

häufigsten aufgezeichnet wurde. Die Anzahl der Zwergfledermaus-Rufaufnahmen belief sich im Erfassungszeitraum 2023 auf insgesamt 12.589 Rufe (30,96 %), die der Artengruppe Nyctaloid auf 17.762 (43,68 %). In der Artengruppe Nyctaloid können sich Aufnahmen des Kleinabendseglers (*Nyctalus leisleri*), Abendseglers (*N. noctula*), Breitflügel-Fledermaus (*Eptesicus serotinus*), Nordfledermaus (*E. nilssonii*) und Zweifarb-Fledermaus (*Vespertilio murinus*) verbergen. Der Abendsegler folgt wie in den Jahren zuvor als dritthäufigste Art mit 8.321 Aufnahmen (20,46 %) an Messmast Nordwest. Auch 2023 konnte mit 1.268 Aufnahmen (3,12 %) die Gattung *Myotis* am vierthäufigsten festgestellt werden. In dieser Gattung können sich die Arten Wasserfledermaus (*Myotis daubentonii*), Brandt-Fledermaus (*M. brandtii*), Bartfledermaus (*M. mystacinus*), Nymphenfledermaus (*M. alcathoe*), Wimperfledermaus (*M. emarginatus*), Fransenfledermaus (*M. nattereri*), Bechsteinfledermaus (*M. bechsteinii*) und Mausohr (*M. myotis*) verbergen. Auf diese folgt die Rauhautfledermaus (*P. nathusii*) mit noch 329 Rufen (0,81 %), gefolgt von der Pipistrelloid-Gruppe, deren Rufe aus der Gattung *Pipistrellus* stammen, aber nicht eindeutig bestimmt werden konnten (224 Aufnahmen, 0,55 %). Die Gattung *Plecotus*, die die sehr leise rufenden Arten Braunes (*Plecotus auritus*) und Graues Langohr (*Pl. austriacus*) beinhaltet, wurde mit 91 Rufen (0,22 %) aufgezeichnet, gefolgt von der Mopsfledermaus (*Barbastella barbastellus*) (52 Rufe, 0,13 %). Vereinzelt stammten zudem auch von der Mückenfledermaus (*P. pygmaeus*) (29 Aufnahmen, 0,07 %).

Im Jahr 2023 nahm die Fledermausaktivität mit zunehmender Höhe an Messmast Nordwest wie in den Vorjahren deutlich ab (Tab. 21, Abb. 36, Musiol et al. 2023). Dies ist besonders eindrücklich für die Zwergfledermaus zu beobachten, deren Aktivität von 10 m auf 35 m um 72 % abnahm. Für die Artengruppe Nyctaloid wurden die meisten Rufe auf einer Höhe von 35 m aufgezeichnet und auch in 65 m wurden noch verhältnismäßig viele Rufe detektiert. Erst auf 95 m Höhe zeigte sich eine deutliche Abnahme der Aufnahmezahlen für die Artengruppe Nyctaloid. Diese Höhenverteilung wurde auch im Vorjahr an Messmast Nordwest beobachtet. Der Abendsegler, der auch in der Artengruppe Nyctaloid enthalten sein kann, zeigte eine noch deutlich stärkere Verschiebung hin zu größeren Höhen. So wurden für diese Art auf 65 m Höhe die meisten Rufe aufgezeichnet und erst in 95 m Höhe fielen die Aufnahmezahlen knapp unter das Niveau von 10 m. Wie bei der Artengruppe Nyctaloid zeigte sich dieses Verteilungsmuster für den Abendsegler auch schon in den Vorjahren (Musiol et al. 2023). Bei beiden Arten/Artengruppen handelt es sich um migrierende Arten. Die gesteigerte Anzahl an Aufnahmen in größeren Höhen lässt sich sehr wahrscheinlich auf Zugereignisse im Herbst zurückführen. Dies veranschaulichen auch die Grafiken in Abb. 37, die einen Einblick in die Phänologie des Abendseglers geben. Für diese Art, eine Fledermaus, die mit hohem Schalldruck ortet und deren Rufe daher bis zu 100 m detektierbar sind, ist allerdings zu bedenken, dass einzelne Individuen zeitgleich auf mehreren Mikrofonen erfasst worden sein können. Einige Arten und Artengruppen wurden 2023 wie in den Vorjahren fast ausschließlich in Bodennähe aufgezeichnet. Hierzu zählen die Mopsfledermaus, die Mückenfledermaus, die *Myotis*-Gruppe und die *Plecotus*-Gruppe.

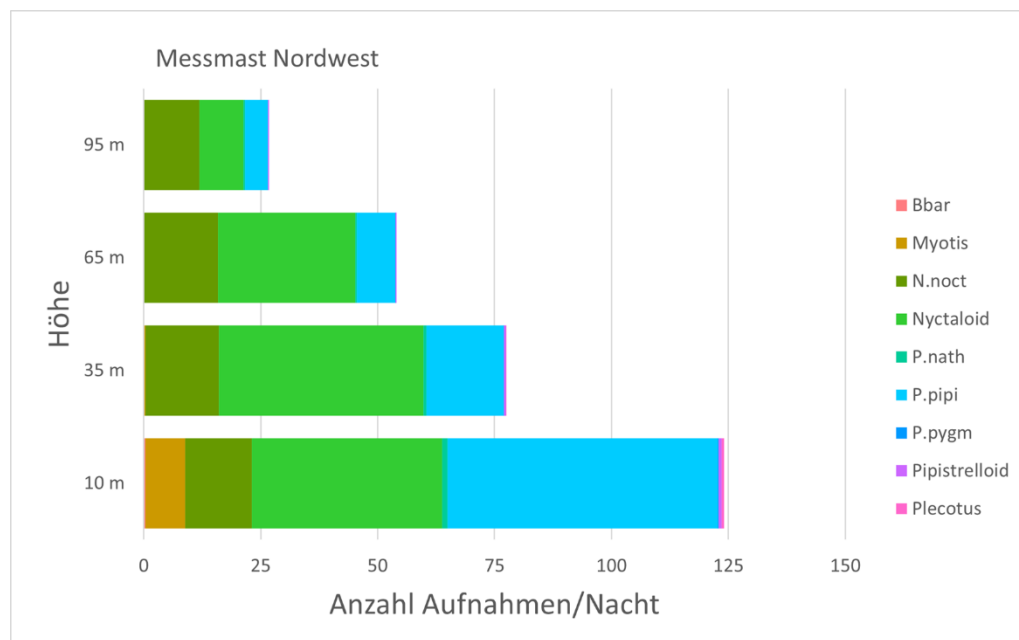


Abb. 36: Verteilung der Anzahl der Aufnahmen pro Messnacht der verschiedenen Arten(-gruppen) in den verschiedenen Messhöhen an Messmast Nordwest im Jahr 2023. Es ist zu berücksichtigen, dass die Anzahl der Aufnahmen keinen exakten quantitativen Vergleich der Aktivität zwischen den Artengruppen ermöglicht. B.barb = Mopsfledermaus, N.noct = Abendsegler, P.nath = Rauhautfledermaus, P.pipi = Zwergfledermaus, P.pygm = Mückenfledermaus

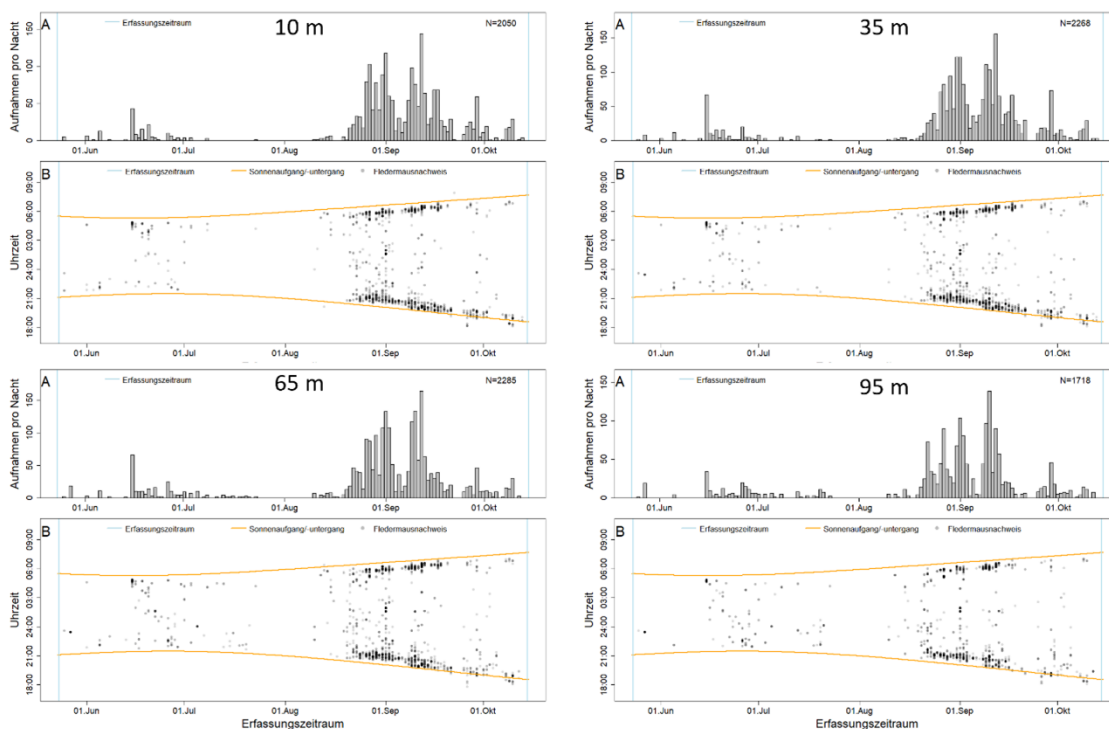


Abb. 37: Übersicht der Abendsegleraktivität an Messmast Nordwest im Jahr 2023. In A ist die Anzahl der Aufnahmen pro Nacht über den gesamten Erfassungszeitraum aufgetragen (graue Balken). In B ist die nächtliche Aktivität über den Erfassungszeitraum aufgetragen. Die orangen Linien zeigen zudem die Sonnenaufgangs- und Sonnenuntergangszeiten. Beginn und Ende des Erfassungszeitraums sind jeweils durch blaue Linien gekennzeichnet.

Die Aktivitätsverteilung über die Monate zeigt den typischen phänologischen Verlauf, der hierzulande von Fledermäusen bekannt ist. So stieg die Aktivität vom Frühjahr über den Sommer hin an und fiel im Herbst wieder ab (Abb. 38). Die höchste Fledermausaktivität wurde 2023 in allen Höhen im September registriert. Dies korrespondiert weitestgehend auch mit den Verteilungsmustern aus den Vorjahren, wobei in manchen Jahren die Aktivität in den Sommermonaten Juni und Juli höher war. Für die hohe Aktivität im September kann auch ein besonders intensiver Zug der migrierenden Arten verantwortlich sein, der dann vor allem an den Mikrofonen in 65 m und 95 m Höhe registriert wird (vgl. Abb. 37 und Abb. 39).

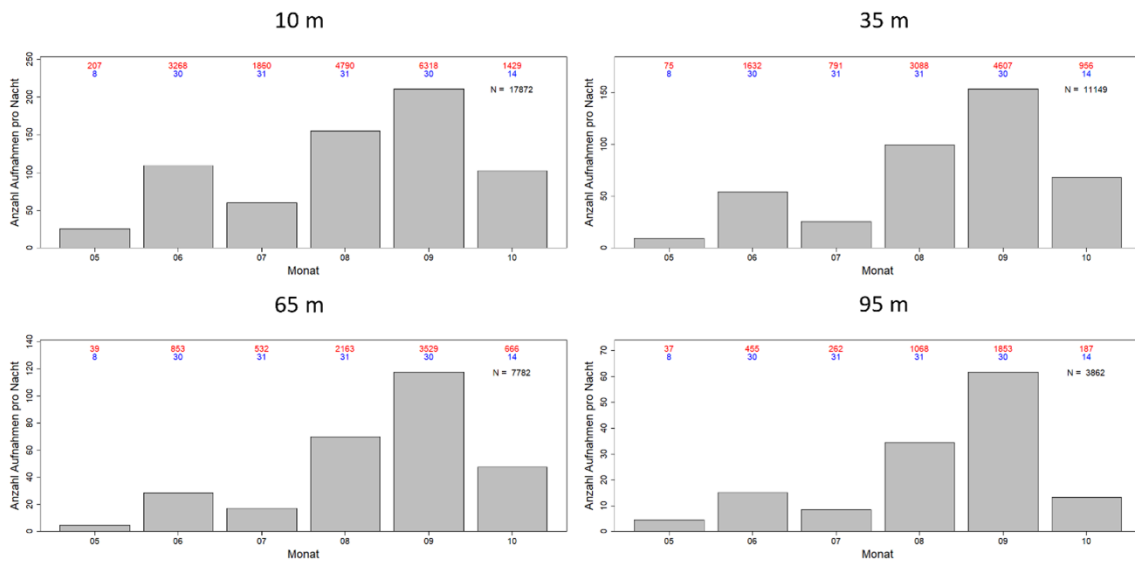


Abb. 38: Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an Messmast Nordwest im Jahr 2023.

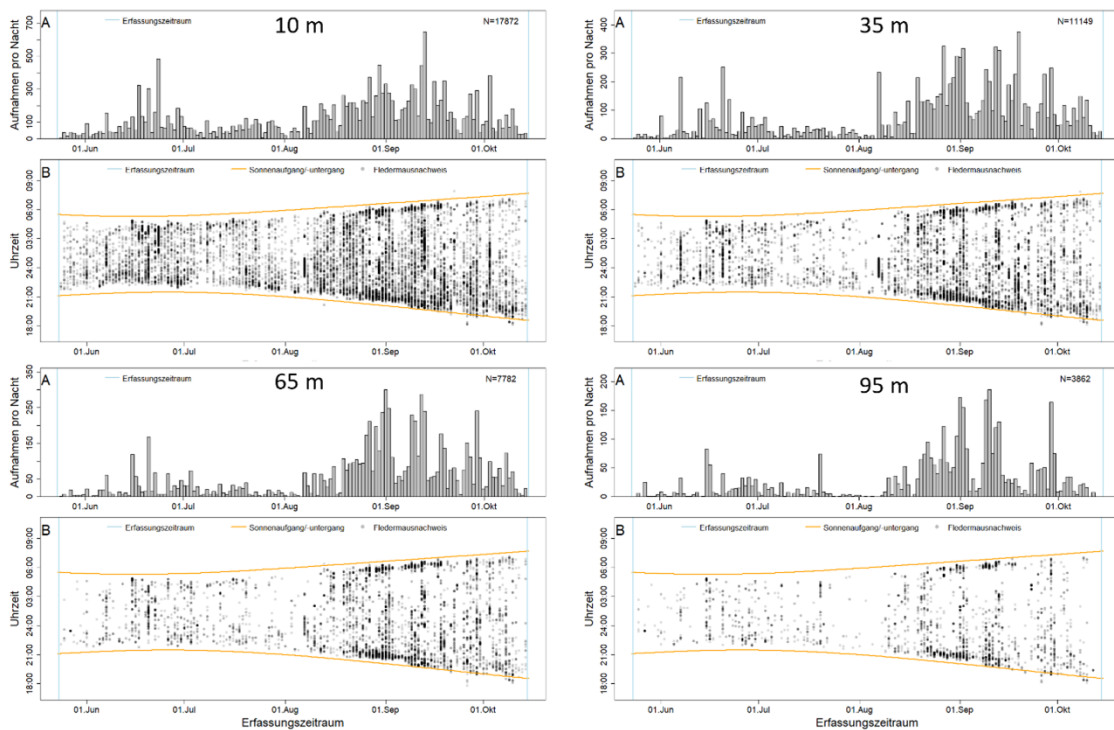


Abb. 39: Übersicht der Gesamtaktivität an Messmast Nordwest im Jahr 2023.

2.1.2.2 2024

Im Jahr 2024 wurden alle vier Messmasten sowie die beiden Forschungs-WEA mit jeweils vier Mikrofonen (BATmode S+ - Systeme) bestückt. Aufgrund vorgegebener technischer Abläufe am Testfeld und bei der Inbetriebnahme der FWEA erfolgte die Installation der akustischen Erfassungsgeräte nicht zeitgleich, sondern je nach Witterung, technischer Vorgaben und

Auslastung des ZSW ab Mai 2024. So konnten z.B. die Mikrofone, die auf dem Gondeldach platziert werden und den Luftraum darüber abdecken, erst im September 2024 installiert werden. Tab. 22 gibt einen Überblick über die Installationszeitpunkte und technischen Ausfälle aller im Jahr 2024 aktiven Mikrofone. Der Abbau der Systeme erfolgte am 31.10.2024 durch das ZSW. Bedingt durch unvorhersehbare, technische Komplikationen an manchen Mikrofonen war deren Aufnahmebereitschaft bzw. die Aufnahmequalität im Jahr 2024 teilweise eingeschränkt. Zwar konnten die meisten Fehler über den Fernzugriff identifiziert und schnellstmöglich durch das ZSW behoben werden, an den Mikrofonen an Messmast Nordwest führte allerdings vermutlich ein elektromagnetisches Signal zu Daueraufnahmen mit Störgeräuschen. Hierdurch entstand ab dem 29.07.2024 bis zum Ende der Erfassungen ein Datenverlust für das Mikrofon auf 95 m Höhe.

Tab. 22: Bezeichnungen der Mikrofone sowie Übersicht über die Installations- und Ausfallzeiten aller 2024 eingesetzten Mikrofone (BATmode S+ - Systeme) an den verschiedenen Messmasten und Forschungs-WEA. Abkürzungen Erfassungs-Strukturen Akustik: FWEA = Forschungs-Windenergieanlage; RWTN = Research Wind Turbine North = FWEA Nord; RWTS = Research Wind Turbine South = FWEA Süd; WMM = Windmessmast; NE = Nordost; NW = Nordwest; SE = Südost; SW = Südwest; Zahlen nach einem Unterstrich geben die Erfassungshöhe wieder

Struktur	Höhe	Bezeichnung Mikrofon	Installationsdatum	Beginn Ausfall	Ende Ausfall
FWEA Nord	10m	RWTN_10	03.05.2024	26.10.2024	31.10.2024
FWEA Nord	35m	RWTN_35	03.05.2024	26.10.2024	31.10.2024
FWEA Nord	70m	RWTN_70 (unterhalb Gondel)	25.04.2024	27.04.2024 25.10.2024	03.05.2024 29.10.2024
FWEA Nord	75m	RWTN_75 (oberhalb Gondel)	24.09.2024	-	-
FWEA Süd	10m	RWTS_10	27.05.2024	-	-
FWEA Süd	35m	RWTS_35	27.05.2024	-	-
FWEA Süd	70m	RWTS_70 (unterhalb Gondel)	03.05.2024	27.10.2024	31.10.2024
FWEA Süd	75m	RWTS_75 (oberhalb Gondel)	24.09.2024	25.10.2024	31.10.2024
Messmast Nordost	10m	WMM_NE_10	11.04.2024	16.04.2024 18.04.2024 20.06.2024	17.04.2024 25.04.2024 30.60.2024
Messmast Nordost	35m	WMM_NE_35	11.04.2024	16.04.2024 20.06.2024	25.04.2024 30.60.2024
Messmast Nordost	65m	WMM_NE_65	11.04.2024	16.04.2024 20.06.2024	25.04.2024 30.60.2024
Messmast Nordost	95m	WMM_NE_95	11.04.2024	16.04.2024 20.06.2024	25.04.2024 30.60.2024

Struktur	Höhe	Bezeichnung Mikrofon	Installationsda- tum	Beginn Ausfall	Ende Ausfall
Messmast Nordwest	10m	WMM_NW_10	11.04.2024	16.04.2024	25.04.2024
Messmast Nordwest	35m	WMM_NW_35	11.04.2024	16.04.2024	25.04.2024
Messmast Nordwest	65m	WMM_NW_65	11.04.2024	16.04.2024	25.04.2024
Messmast Nordwest	95m	WMM_NW_95	11.04.2024	16.04.2024 27.06.2024 19.07.2024 26.07.2024 29.07.2024	25.04.2024 17.07.2024 23.07.2024 27.07.2024 31.10.2024
Messmast Süd- ost	10m	WMM_SE_10	27.06.2024	27.06.2024 31.07.2024	10.07.2024 05.08.2024
Messmast Süd- ost	35m	WMM_SE_35	27.06.2024	31.07.2024	05.08.2024
Messmast Süd- ost	65m	WMM_SE_65	27.06.2024	31.07.2024	05.08.2024
Messmast Süd- ost	95m	WMM_SE_95	27.06.2024	31.07.2024	05.08.2024
Messmast Süd- west	10m	WMM_SW_10	27.06.2024	31.07.2024 14.08.2024	05.08.2024 21.08.2024
Messmast Süd- west	35m	WMM_SW_35	27.06.2024	31.07.2024 14.08.2024	05.08.2024 21.08.2024
Messmast Süd- west	65m	WMM_SW_65	27.06.2024	27.06.2024 13.07.2024 17.07.2024 24.07.2024 31.07.2024 14.08.2024	28.06.2024 14.07.2024 23.07.2024 26.07.2024 05.08.2024 21.08.2024
Messmast Süd- west	95m	WMM_SW_95	27.06.2024	31.07.2024 14.08.2024	05.08.2024 21.08.2024

Insgesamt wurden 2024 an allen untersuchten Strukturen (24 Mikrofone) 246.464 Aufnahmen mit Fledermausrufen aufgezeichnet und eindeutig einer Art oder Artengruppe zugeordnet (Tab. 23).

Im Windtestfeld waren die Daten im Jahr 2024 ähnlich verteilt wie in den Vorjahren, in denen alternierend die Zwergfledermaus bzw. die Artengruppe Nyctaloid am häufigsten aufgezeichnet wurde (vgl. Kapitel 2.1.2.1 und Musiol et al. 2023). Die Anzahl der Zwergfledermaus-Rufaufnahmen belief sich im Erfassungszeitraum 2024 über alle 24 Mikrofone auf insgesamt 85.998 Rufe (34,89 %), die der Artengruppe Nyctaloid auf 94.451 (38,32 %; siehe Tab. 23). In der Artengruppe Nyctaloid können sich Aufnahmen des Kleinabendseglers, Abendseglers, Breitflügel-Fledermaus, Nordfledermaus und Zweifarbfledermaus verbergen. Der Abendsegler folgt wie in den Jahren zuvor als dritthäufigste Art mit 55.494 Aufnahmen (22,52 %). 2024

wurden die Rauhautfledermaus und die Gattung *Myotis* ähnlich häufig aufgezeichnet, wobei die Rauhautfledermaus mit insgesamt 4.794 Rufaufnahmen (1,95 %) geringfügig häufiger erfasst wurde als die Gattung *Myotis* mit 4.573 Aufnahmen (1,89 %). Alle weiteren Arten und Artengruppen machen wie in den Vorjahren nur einen Bruchteil der erfassten Fledermausrufe aus. Die Pipistrelloid-Gruppe, deren Rufe aus der Gattung *Pipistrellus* stammen, aber nicht eindeutig bestimmt werden konnten, wurde an allen Mikrofonen in 552 Aufnahmen registriert (0,22 %) und damit etwas weniger häufig als noch 2023. Die Mopsfledermaus wurde mit 301 Rufen (0,12 %) aufgezeichnet, gefolgt von der Gattung *Plecotus* (179 Rufe, 0,07 %). Vereinzelte Aufnahmen stammten zudem auch von der Mückenfledermaus (122 Aufnahmen, 0,05 %).

Im Erfassungsjahr 2024 wurden erstmalig alle sechs Strukturen (vier Messmasten und zwei FWEA) beprobt. Dabei wurde das gesamte, über die Projektjahre im Testfeld nachgewiesene Arten(gruppen)-Spektrum auch an jeder einzelnen der 2024 untersuchten Strukturen erfasst (Tab. 23, Abb. 40). Die bereits in den Vorjahren registrierte Aktivitätsabnahme von West nach Ost wurde 2024 ebenfalls festgestellt. Mit durchschnittlich 369 Aufnahmen pro Nacht war die Gesamtaktivität an Messmast Südwest am höchsten (Abb. 40, Abb. 41). Im Westen war und ist die Fledermausaktivität aufgrund der Waldstrukturen und den Vorteilen, die diese für Fledermäuse mitbringen (geeignetes Jagdhabitat, potenzielles Quartiergebiet) höher als im landwirtschaftlich genutzten Offenland. Bemerkenswert ist allerdings, dass der zweithöchste Wert nicht an Messmast Nordwest erzielt wurde (durchschnittlich 337 Aufnahmen pro Nacht), der ebenfalls nahe am Wald lokalisiert ist (etwa 70 m entfernt), sondern mit 346 Aufnahmen pro Nacht an FWEA Süd (Abb. 40, Abb. 41). FWEA Süd befindet sich rund 130 m weiter östlich als Messmast Südwest und somit 255 m vom Waldrand entfernt. Da aus den Vorjahren keine Vergleichswerte vorliegen, kann im Moment nicht beurteilt werden, ob diese Aktivitätsverteilung durch temporäre Besonderheiten wie der Bewirtschaftung der Felder im südlichen Teil des Testfelds hervorgerufen wurde, oder ob ein wiederkehrendes Aktivitätsmuster zugrunde liegt. Dies muss sich in den folgenden Projektjahren zeigen. Mit durchschnittlich 258 Fledermausaufnahmen pro Nacht wurde an FWEA Nord deutlich weniger Aktivität verzeichnet (Abb. 40, Abb. 41). In großem Abstand folgt Messmast Südost mit durchschnittlich 176 Aufnahmen pro Nacht sowie Messmast Nordost mit 111 Aufnahmen pro Nacht. Im Jahr 2024 konnte demnach ein Aktivitätsgefälle von Südwest nach Nordost verzeichnet werden (Abb. 40, Abb. 41).

Wie in den Vorjahren nahm die Fledermausaktivität auch 2024 mit zunehmender Höhe deutlich ab und dies an jeder der untersuchten Strukturen (Tab. 23 und Abb. 40, Abb. 41, vgl. Kapitel 2.1.2.1 und Musiol et al. 2023). Insbesondere für die Zwergfledermaus sowie in geringerer Intensität für die Rauhautfledermaus war dies zu beobachten. Beide Arten orientieren sich bei der Jagd und auf Transferflügen an Leitstrukturen wie Hecken oder Waldrändern (Limpens & Kapteyn 1991; Verboom & Huitema 1997; Dietz et al. 2007), weshalb die Nachweiswahrscheinlichkeit stark mit zunehmender Höhe abnimmt. Bereits ab 35 m Höhe werden beide Arten deutlich seltener nachgewiesen. Dieses Muster trat an allen Messmasten und FWEA auf. Sowohl die Artengruppe Nyctaloid als auch der Abendsegler wurden hingegen häufiger auf 35 m Höhe registriert. Auf 65 m Höhe (Messmasten) wurden für diese beiden Arten(-gruppen) immerhin noch ähnliche Aktivitätswerte gemessen wie auf 10 m Höhe. Eine Ausnahme bildet Messmast Südwest, hier wurden auf 65 m Höhe nochmals höhere Aufnahmezahlen der beiden Arten registriert. Dies traf auch auf die FWEA zu, an denen auf der vergleichbaren Höhe von 70 m (Gondelmikrofon nach unten gerichtet) ebenfalls mehr Aufnahmen pro Nacht aufgezeichnet wurden als auf 35 m Höhe. Ob hier eventuell eine Attraktionswirkung der FWEA

gegenüber der Artengruppe Nyctaloid und dem Abendsegler vorliegt, oder zufällige Effekte hierfür verantwortlich sind, muss in den folgenden Jahren durch zusätzliche Daten überprüft werden. Allgemein kann die Verschiebung der Aktivität dieser Arten(-gruppen) hin zu größeren Höhen mit der Ökologie zweier Vertreter erklärt werden. Denn sowohl beim Abendsegler als auch beim Kleinabendsegler, die beide in der Artengruppe Nyctaloid enthalten sind, handelt es sich um migrierende Arten (Braun & Häußler 2003; Häußler & Nagel 2003; Dietz et al. 2007; Hurme et al. 2024). Die gesteigerte Anzahl an Aufnahmen in größeren Höhen lässt sich sehr wahrscheinlich auf Zugereignisse im Herbst zurückführen. Wie in den Jahren zuvor wurden einige Arten und Artengruppen 2024 fast ausschließlich an den bodennah installierten Mikrofonen der Messstrukturen aufgezeichnet. Hierzu zählen die Mopsfledermaus, die Mückenfledermaus, die Gattung *Myotis* und die Gattung *Plecotus*.

Tab. 23: Übersicht über das Ergebnis der akustischen Erfassungen an sämtlichen Mikrofonen der Messmasten und FWEA im Jahr 2024. Abkürzungen Erfassungs-Strukturen Akustik: RWTN = Research Wind Turbine North = FWEA Nord; RWTS = Research Wind Turbine South = FWEA Süd; WMM = Windmessmast; NE = Nordost; NW = Nordwest; SE = Südost; SW = Südwest; Zahlen nach einem Unterstrich geben die Erfassungshöhe wieder

Mikrofon	<i>B.bar</i>	<i>Myotis</i>	<i>N.noct</i>	Nyctaloid	<i>P.nath</i>	<i>P.pipi</i>	<i>P.pygm</i>	Pipistrelloid	<i>Plecotus</i>	Gesamt
RWTN_10	29	639	3.135	4.063	487	9.988	22	91	31	18.485
RWTN_35	0	25	3.049	5.114	330	3.574	2	62	4	12.160
RWTN_70	0	0	4.877	5.896	143	1.136	2	20	2	12.076
RWTN_75	0	0	110	234	28	234	0	0	0	606
RWTS_10	26	604	2.575	4.634	555	18.146	9	89	42	26.680
RWTS_35	1	23	2.658	4.912	313	5.899	0	16	2	13.824
RWTS_70	0	1	4.234	6.040	125	1.617	6	17	7	12.047
RWTS_75	0	0	71	325	28	181	0	0	0	605
WMM_NE_10	28	695	1.505	1.613	316	6.376	17	37	18	10.605
WMM_NE_35	9	73	1.855	2.161	137	1.153	2	7	0	5.397
WMM_NE_65	0	0	1.059	1.138	66	446	2	0	0	2.711

Mikrofon	<i>B.bar</i>	<i>Myotis</i>	<i>N.noct</i>	<i>Nyctaloid</i>	<i>P.nath</i>	<i>P.pipi</i>	<i>P.pygm</i>	<i>Pipistrelloid</i>	<i>Plecotus</i>	Gesamt
WMM_NE_95	0	0	1.013	1.170	74	452	0	4	0	2.713
WMM_NW_10	116	1.254	4.344	9.997	436	11.741	24	56	28	27.996
WMM_NW_35	42	97	4.715	13.163	194	2.995	3	15	3	21.227
WMM_NW_65	0	3	4.926	9.573	119	1.223	4	17	0	15.865
WMM_NW_95	0	0	371	585	13	388	0	2	0	1.359
WMM_SE_10	16	232	1.293	1.583	296	4.421	6	19	10	7.876
WMM_SE_35	0	21	1.650	2.823	168	1.035	2	7	2	5.708
WMM_SE_65	0	0	1.533	1.672	75	466	1	3	1	3.751
WMM_SE_95	0	0	1.459	1.255	53	371	0	3	0	3.141
WMM_SW_10	34	893	2.294	4.340	513	10.385	15	59	25	18.558
WMM_SW_35	0	12	2.462	4.763	173	2.395	2	22	4	9.833
WMM_SW_65	0	1	2.543	5.008	87	771	2	4	0	8.416
WMM_SW_95	0	0	1.763	2.389	65	605	1	2	0	4.825
Gesamt	301	4.573	55.494	94.451	4.794	85.998	122	552	179	246.464

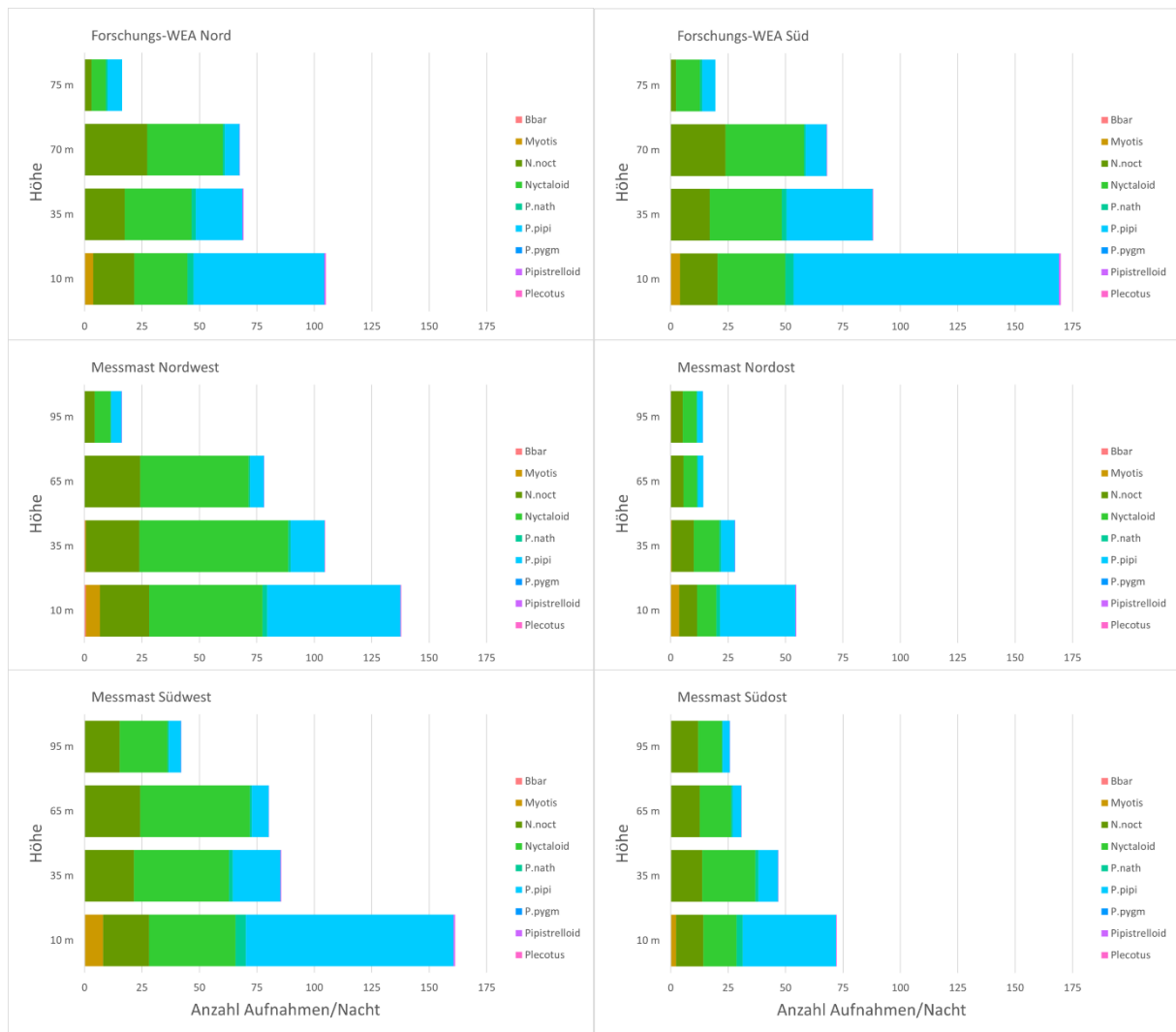


Abb. 40: Verteilung der Anzahl der Aufnahmen pro Messnacht der verschiedenen Arten(-gruppen) in den verschiedenen Messhöhen an den vier Messmasten sowie den Forschungs-WEA im Jahr 2024. Es ist zu berücksichtigen, dass die Anzahl der Aufnahmen keinen exakten quantitativen Vergleich der Aktivität zwischen den Artengruppen ermöglicht. B.barb = Mopsfledermaus, N.noct = Abendsegler, P.nath = Rauhautfledermaus, P.pipi = Zwergfledermaus, P.pygm = Mückenfledermaus



Abb. 41: Räumliche Darstellung für die Anzahl der Aufnahmen pro Messnacht der verschiedenen Arten(-gruppen) in den verschiedenen Messhöhen an den vier Messmasten sowie den Forschungs-WEA im Jahr 2024. Es ist zu berücksichtigen, dass die Anzahl der Aufnahmen keinen exakten quantitativen Vergleich der Aktivität zwischen den Artengruppen ermöglicht. Höhenverteilung nicht maßstäblich. B.barb = Mopsfledermaus, N.noct = Abendsegler, P.nath = Rauhautfledermaus, P.pipi = Zwergfledermaus, P.pygm = Mückenfledermaus

Wie in den Vorjahren (vgl. Kapitel 2.1.2.1 und Musiol et al. 2023) wurde 2024 im Testfeld der typische phänologische Verlauf der Fledermaus-Aktivität festgestellt. Bei der Betrachtung aller Aufnahmen mit Fledermausrufen pro Nacht, zusammengefasst für alle Strukturen (Messmasten und FWEA), alle Messhöhen und Arten(gruppen), steigt die Aktivität der Fledermäuse vom Frühjahr 2024 über den Sommer an, um im Spätsommer (ab Ende August bis Ende September) zu gipfeln und schließlich zügig abzunehmen (Abb. 42 und Abb. 43). Dieses Muster kann mit geringen Abweichungen ebenfalls an jeder der untersuchten Strukturen für sich beobachtet werden (Abb. 44 bis Abb. 55).

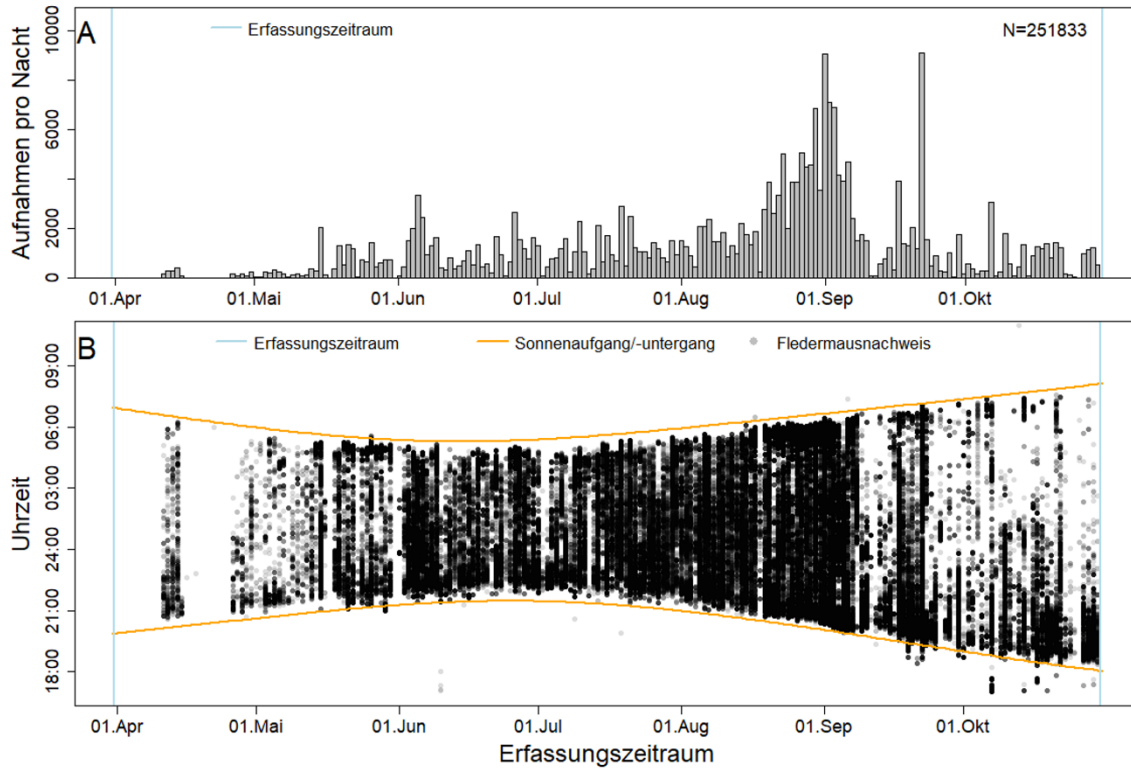


Abb. 42: Übersicht der Gesamtaktivität an allen Messmasten und FWEA im Jahr 2024. In A ist die Anzahl der Aufnahmen pro Nacht über den gesamten Erfassungszeitraum aufgetragen (graue Balken). In B ist die nächtliche Aktivität über den Erfassungszeitraum aufgetragen. Die orangenen Linien zeigen zudem die Sonnenaufgangs- und Sonnenuntergangszeiten. Beginn und Ende des Erfassungszeitraums sind jeweils durch blaue Linien gekennzeichnet. Im Sinne der Übersichtlichkeit werden Ausfallzeiten und verspätete Mikrofoninstallationszeiten nicht dargestellt.

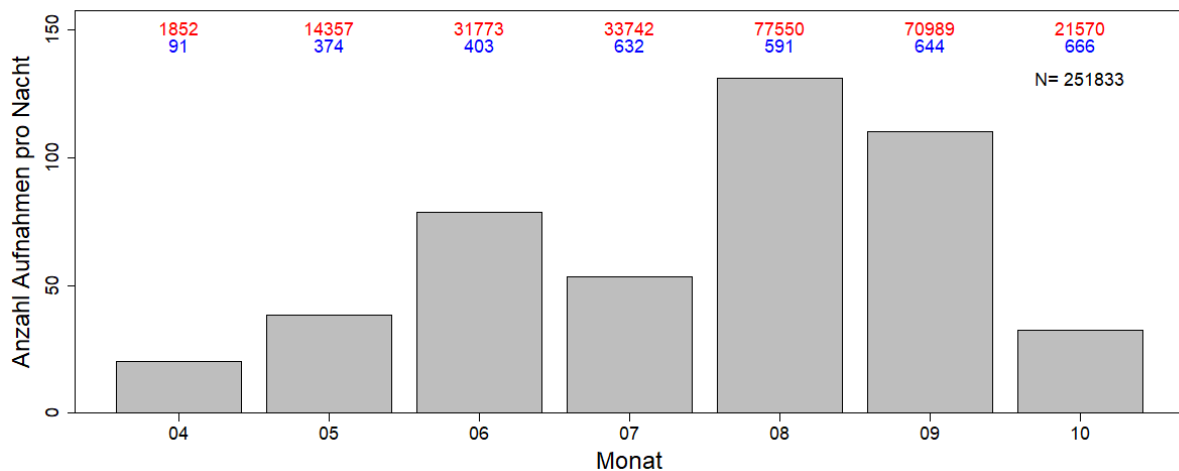


Abb. 43: Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an allen Messmasten und FWEA im Jahr 2024.

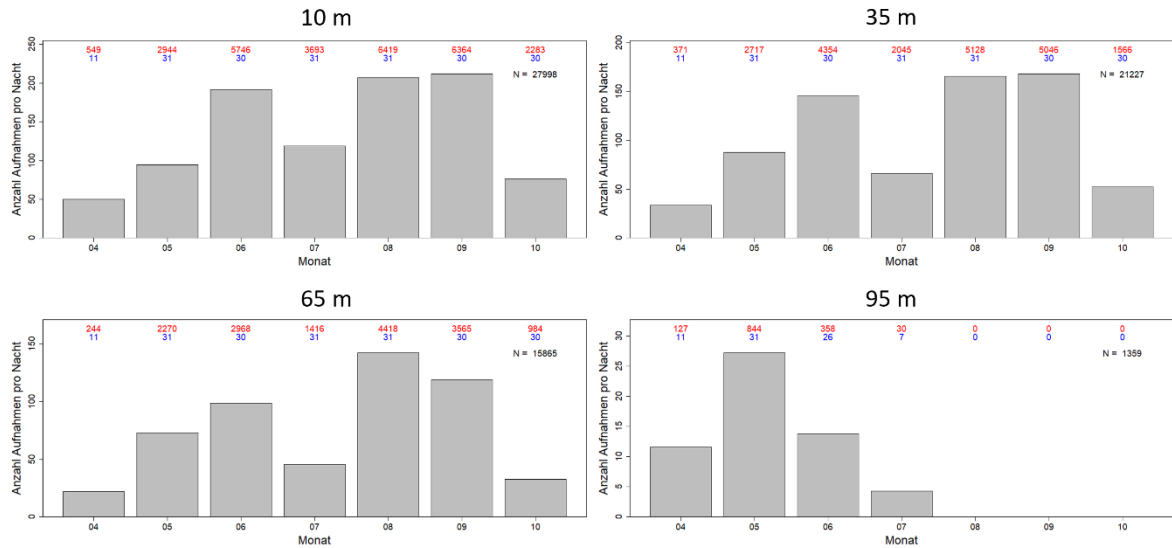


Abb. 44: Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an Messmast Nordwest im Jahr 2024.

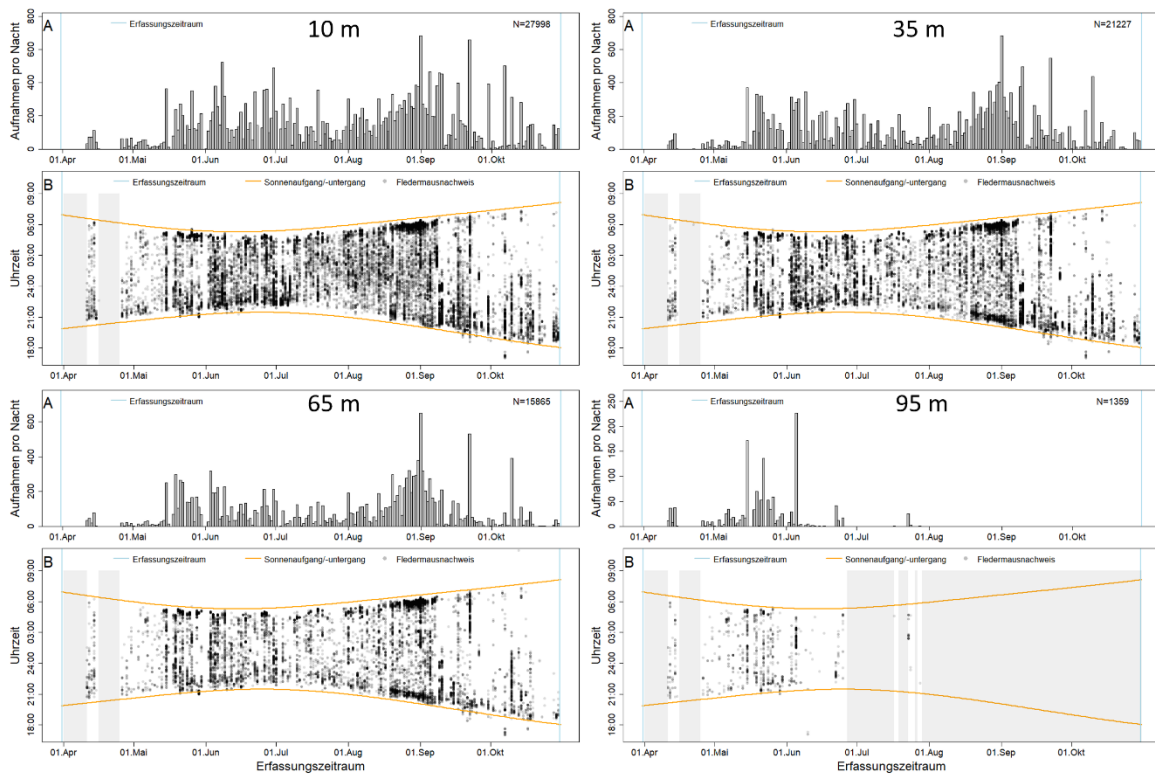


Abb. 45: Übersicht der Gesamtaktivität an Messmast Nordwest im Jahr 2024.

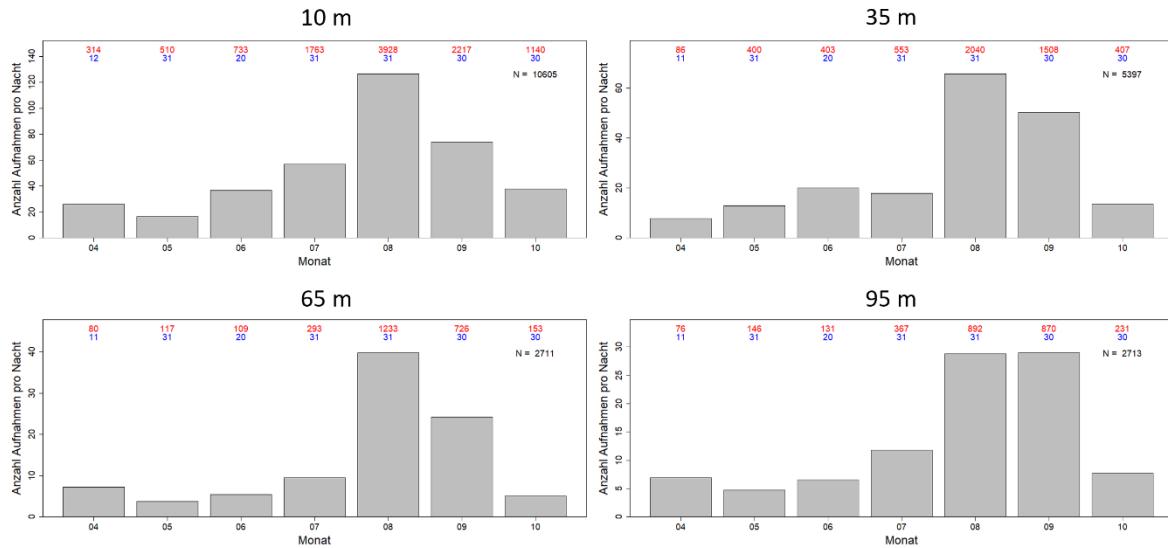


Abb. 46: Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an Messmast Nordost im Jahr 2024.

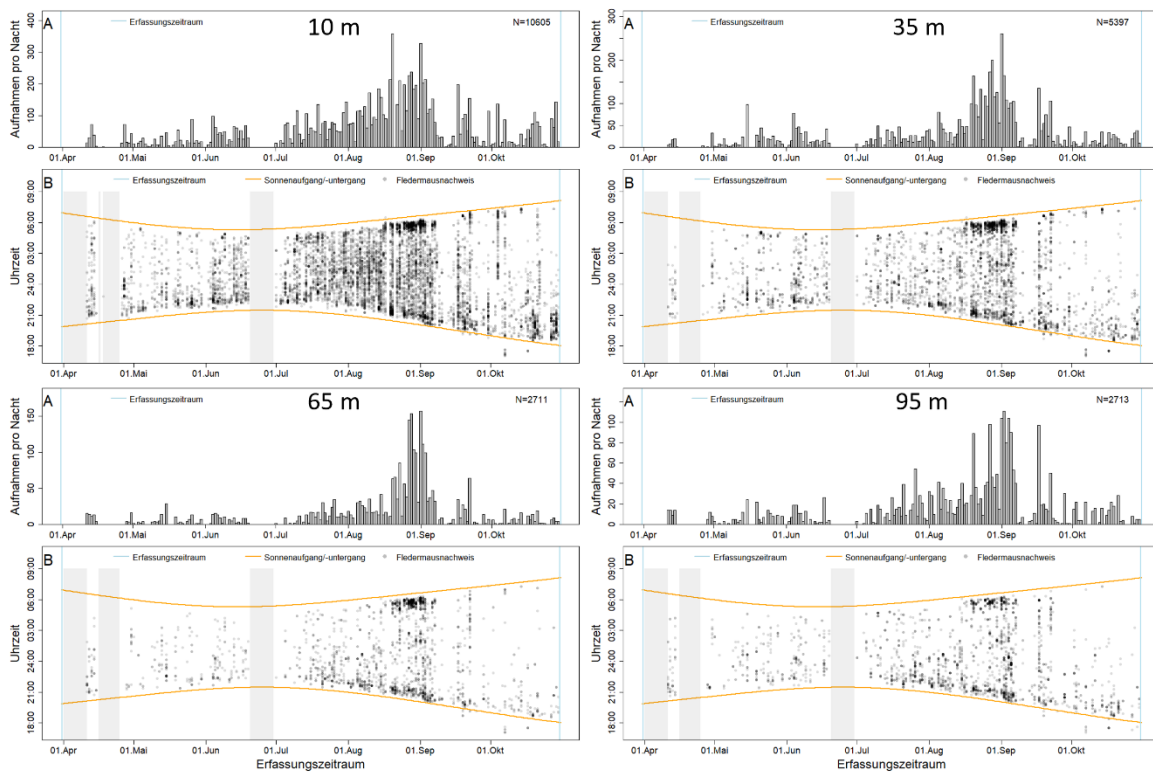


Abb. 47: Übersicht der Gesamtaktivität an Messmast Nordost im Jahr 2024.

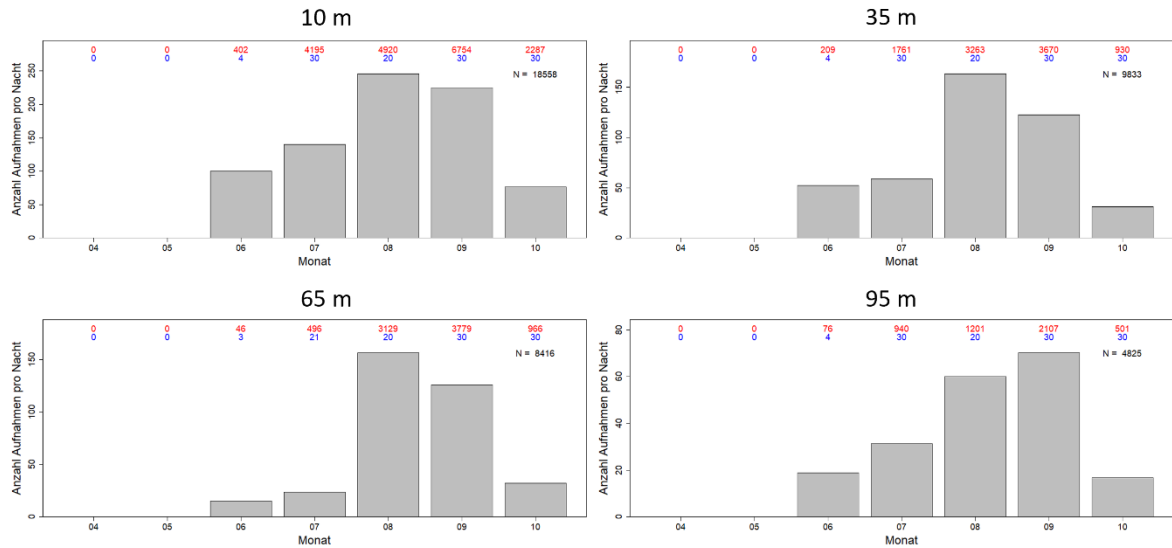


Abb. 48: Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an Messmast Südwest im Jahr 2024.

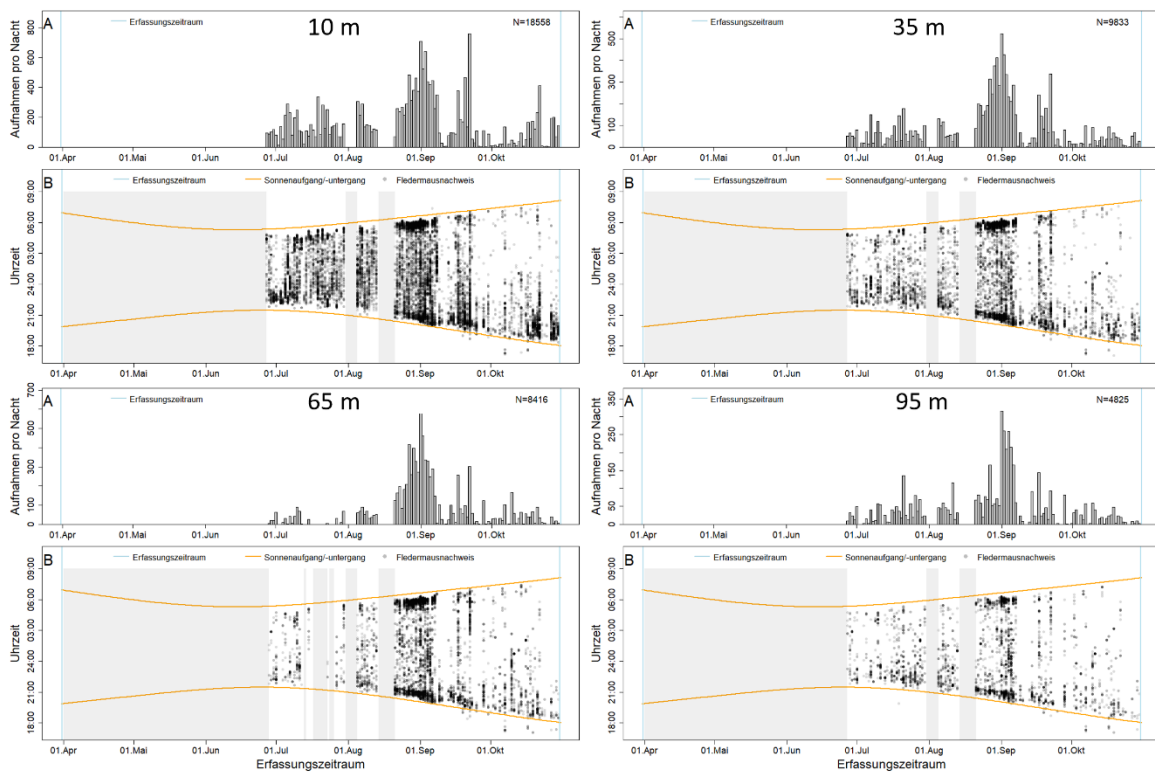


Abb. 49: Übersicht der Gesamtaktivität an Messmast Südwest im Jahr 2024.

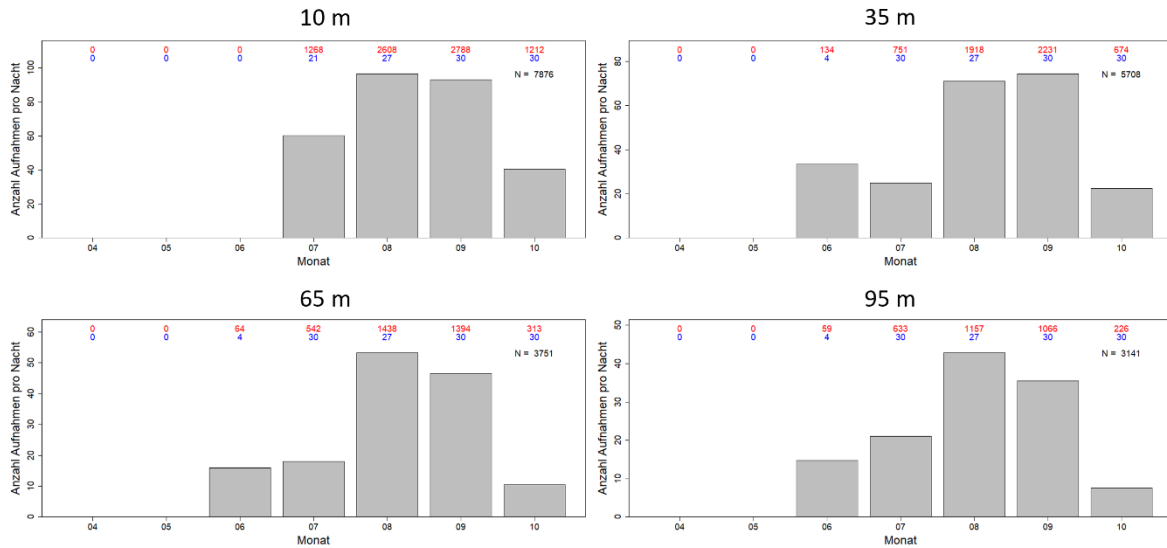


Abb. 50: Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an Messmast Südost im Jahr 2024.

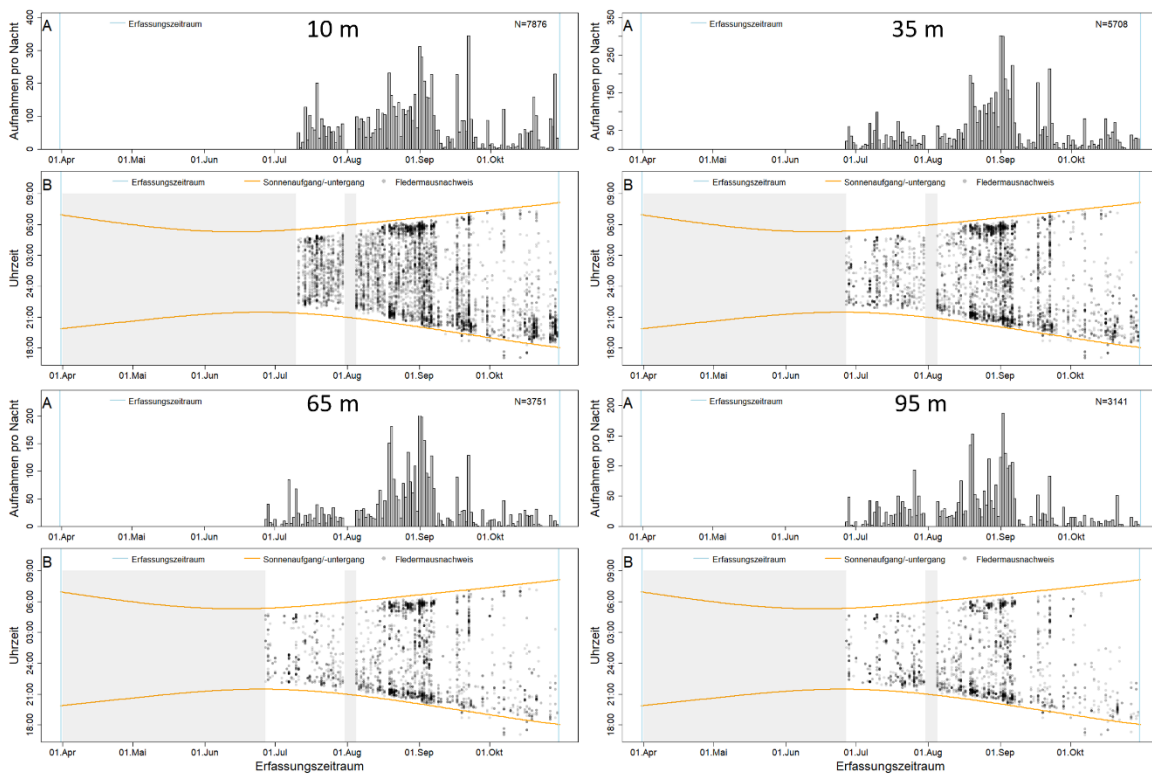


Abb. 51: Übersicht der Gesamtaktivität an Messmast Südost im Jahr 2024.

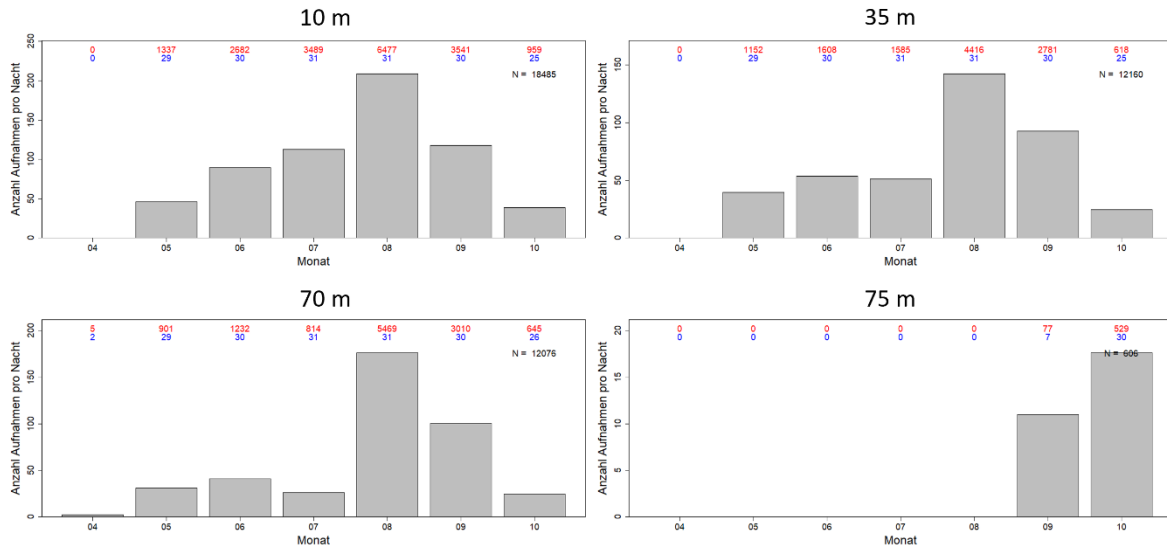


Abb. 52: Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an der FWEA Nord im Jahr 2024.

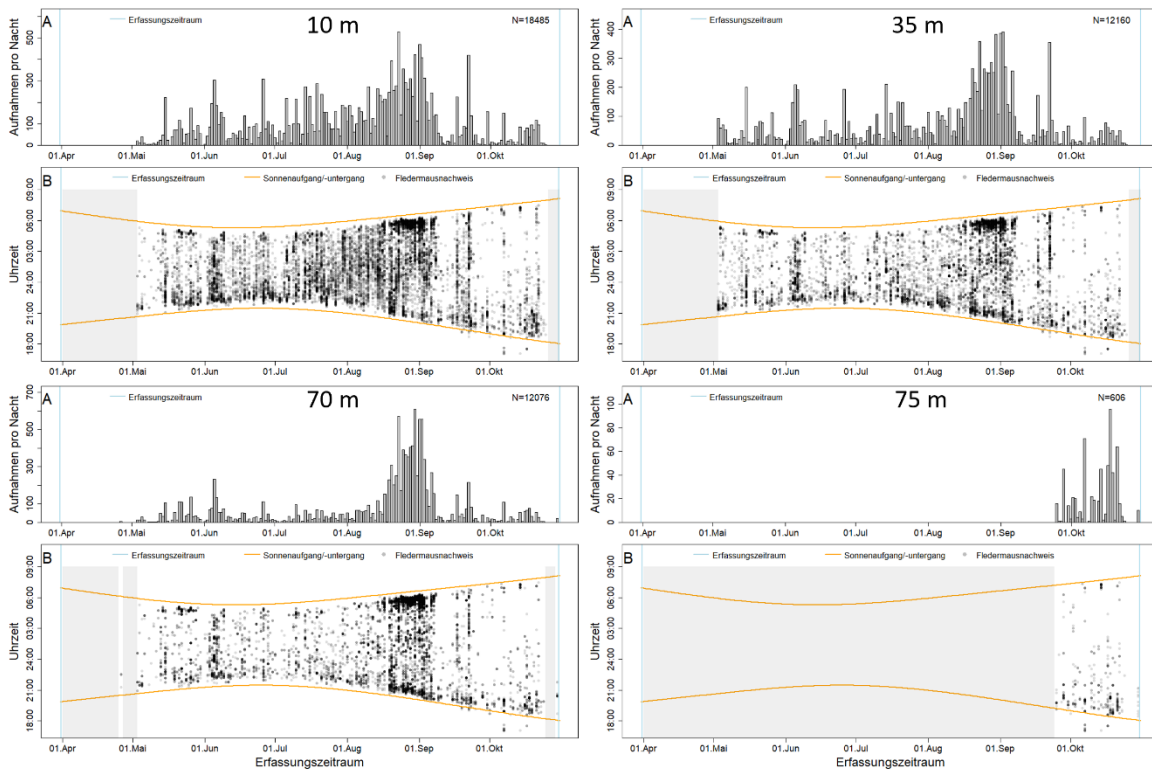


Abb. 53: Übersicht der Gesamtaktivität an der FWEA Nord im Jahr 2024.

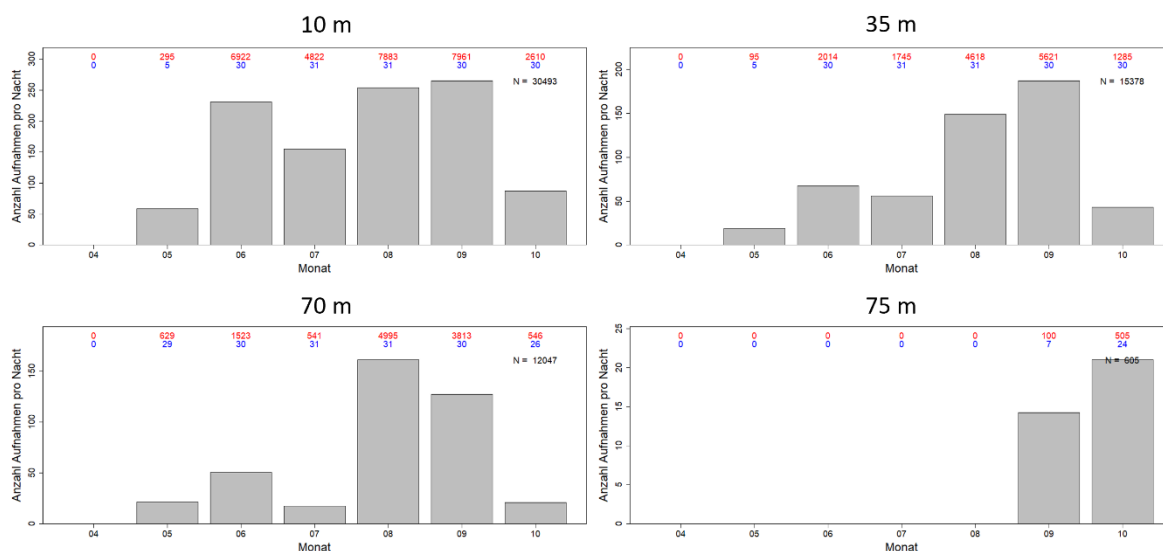


Abb. 54: Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an der FWEA Süd im Jahr 2024.

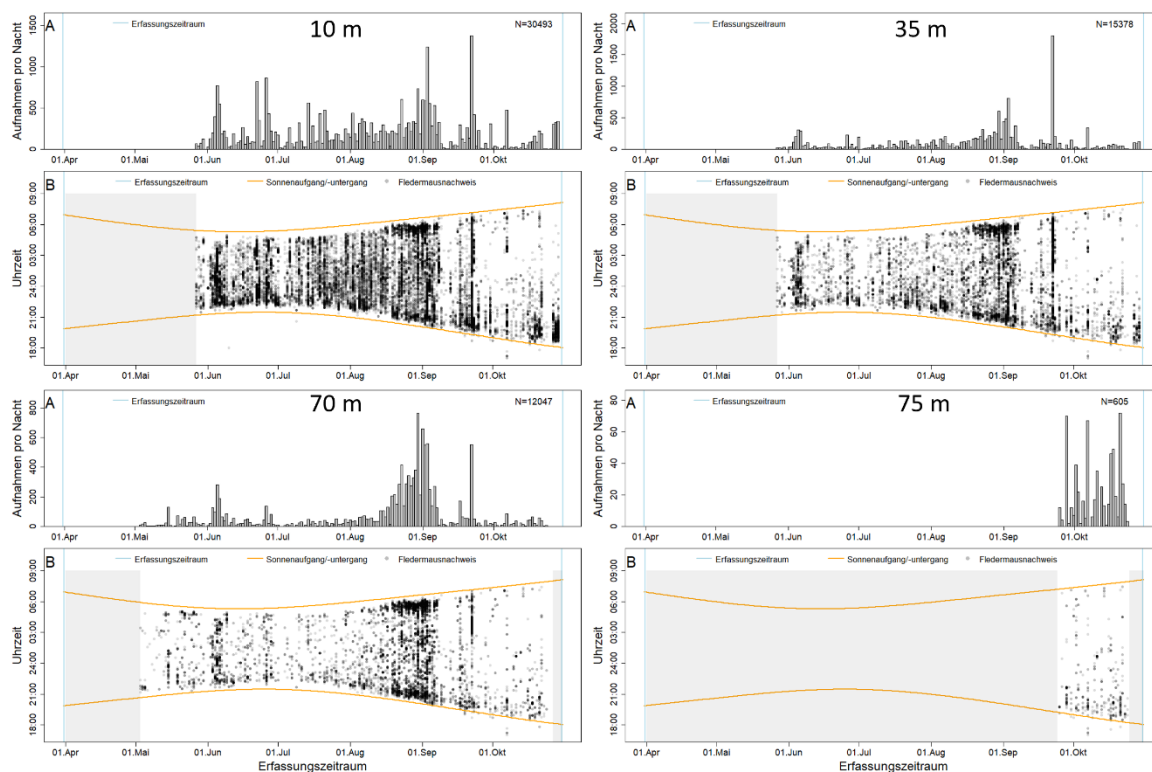


Abb. 55: Übersicht der Gesamtaktivität an der FWEA Süd im Jahr 2024.

Die hohe Aktivität im August und September lässt sich wie in den Vorjahren auf die Anwesenheit ziehender Abendsegler und der Artengruppe Nyctaloid zurückführen. In letztgenannter sind ebenfalls Rufe des Abendseglers sowie auch des Kleinabendseglers enthalten, die beide ein ausgeprägtes Zugverhalten aufweisen (Braun & Häußler 2003; Häußler & Nagel 2003; Dietz et al. 2007; Hurme et al. 2024). Typisch für diese ziehenden Arten(gruppen), aber insbesondere für den Abendsegler, ist der in Abb. 56 und Abb. 57 sichtbare zweigipfelige Aktivitätsverlauf über die Nacht. Ein Großteil der akustischen Aufnahmen, die Abendsegler und/oder die

Artengruppe Nyctaloid enthalten, wurden kurz nach Sonnenuntergang sowie kurz vor Sonnenaufgang aufgezeichnet. Betrachtet man die Höhenverteilung der beiden Arten(gruppen) fällt wie bereits 2023 auf, dass die Anzahl der Aufnahmen pro Nacht sowohl für den Abendsegler als auch für die Artengruppe Nyctaloid nicht stetig mit steigender Höhe abnehmen, wie dies im Gesamttrend der Fledermausaktivität der Fall ist. Stattdessen erreichen Abendsegler und die Artengruppe Nyctaloid die höchsten Werte der Aufnahmen pro Nacht auf 35 m und 65 m Höhe (Tab. 23, Abb. 40). Wie für das Jahr 2023 erläutert, ist dies mit dem Zuggeschehen, insbesondere im Herbst, zu erklären. Auch die Modellierungen in Kapitel 2.2.1.2 unterstreichen dies.

Neben der hohen Fledermausaktivität im Spätsommer und Herbst fällt eine vergleichsweise niedrige Aktivität im Juli 2024 auf, die nicht durch technische Defekte verursacht wurde (Abb. 43). Sowohl im Juni als auch im August wurden mehr Aufnahmen pro Nacht aufgezeichnet. Dieser Rückgang in der Fledermausaktivität am Testfeld wurde auch 2023 sowie den vorhergehenden Jahren an Messmast Nordwest festgestellt (Musiol et al. 2023). Bei den im Sommer am Testfeld aufgezeichneten Fledermäusen handelt es sich zum größten Teil um Tiere der lokal ansässigen Populationen. Im Jahreszyklus der Fledermäuse werden die meisten Jungtiere im Juni geboren (Dietz et al. 2007). Die Aufzucht der Jungen erfolgt hauptanteilig im Juli. Das bedeutet, dass die Weibchen während der Nacht regelmäßig in die Wochenstubenquartiere zurückkehren müssen, um ihre Jungen zu säugen. Dementsprechend verbringen sie weniger Zeit mit der Jagd bzw. verlagern ihre Jagdhabitats in die unmittelbare Nähe der Wochenstubenquartiere, die sich aufgrund fehlender Quartierstrukturen nur abseits des Testfelds befinden können. Hieraus resultiert möglicherweise die vergleichsweise geringere Aktivität während der Jungenaufzucht im Juli. Dieser Interpretationsansatz lässt sich anhand der erhobenen Daten nicht überprüfen und bleibt daher eine Vermutung.

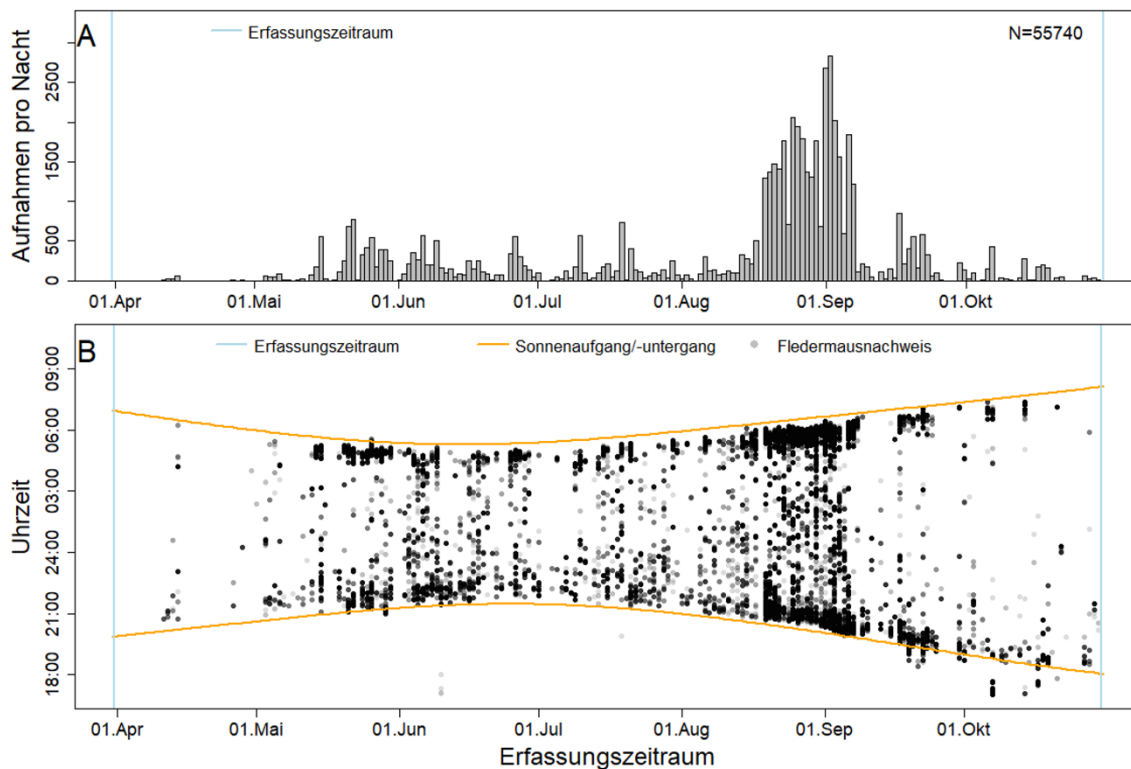


Abb. 56: Übersicht der Gesamtaktivität des Abendseglers an allen Messmasten und FWEA im Jahr 2024.

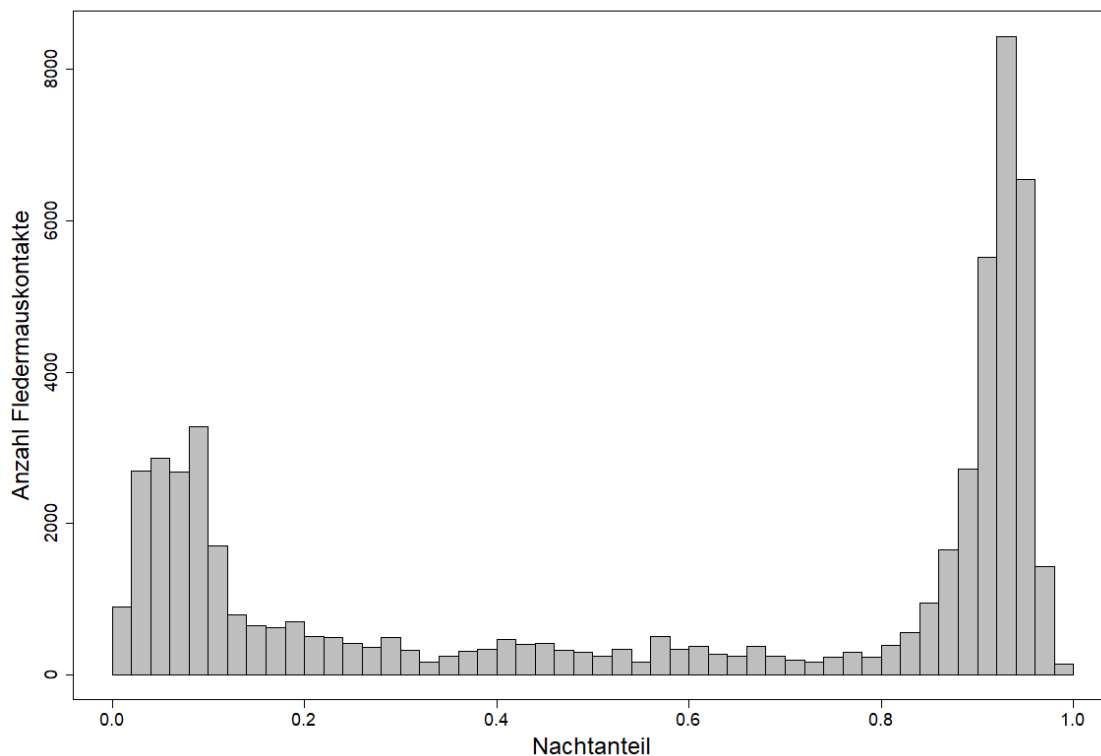


Abb. 57: Nächtliche Verteilung der Anzahl der Aufnahmen mit Abendseglern an allen Messstandorten im Jahr 2024.

2.1.3 Überblick über die Fledermaus-Erfassungen der Phase 2.1 im Umfeld

2.1.3.1 2023

Die Untersuchung der Fledermausaktivität im Umfeld um das Testfeld wurde in Phase 2 im Jahr 2023 weiter fortgeführt. Die Montage der fünf Batcorder erfolgte am 30.03.2023. Der Abbau der Systeme erfolgte am 14.11.2023. Durch die Messungen können Erkenntnisse zum Auftreten und Verhalten von Fledermäusen außerhalb des Testfelds gewonnen werden. In fünf Fällen (Waldrand und Stall im Offenland) wurden dafür dieselben Standorte beprobt wie in Phase 1 des Vorhabens. Die drei bislang an Strommasten installierten Batcorder konnten 2023 allerdings nicht wieder angebracht werden, da die Strommasten im Zuge der Testfeldrealisierung rückgebaut wurden. Da das Errichten von Masten für die Anbringung der Geräte auf den Ackerflächen nur schwierig mit dem landwirtschaftlichen Betrieb vereinbar war und die Fledermausaktivität auf dem freien Feld auch über die in Bodennähe installierten Mikrofone der östlichen Messmasten abgebildet werden kann, wurde auf diese drei Batcorder verzichtet. Die Auswertung der Daten aus dem Jahr 2023 und der Vergleich mit den Vorjahren ermöglicht eine Einschätzung bezüglich eines möglichen Meideverhaltens der Fledermäuse gegenüber den FWEA, wengleich 2023 noch kein regulärer Betrieb der Anlagen stattfand.

An den fünf Waldboxen im Umfeld um das Testfeld wurden im Jahr 2023 insgesamt 364.796 Aufnahmen von Fledermäusen aufgezeichnet (Tab. 24). Der mit Abstand größte Anteil der Aufnahmen stammte mit 82,86 % von der Zwergfledermaus (302.274 Aufnahmen). Am zweithäufigsten wurde die Nyctaloid-Gruppe mit 10,42 % (37.998 Aufnahmen) aufgezeichnet. Der Abendsegler erreichte einen Anteil von 3,04 % (11.081 Aufnahmen). Weitere 1,83 % der Aufnahmen (6.675) wurden der *Myotis*-Gruppe zugeordnet. Einen Anteil von unter 1 % an den Gesamtaufnahmen hatten die Rauhautfledermaus (0,82 %, 2.979 Aufnahmen), die Pipistrellid-Gruppe (0,56 %, 2.044 Aufnahmen), die Mopsfledermaus (0,34 %, 1.242 Aufnahmen), die Mückenfledermaus (0,09 %, 325 Aufnahmen) und die *Plecotus*-Gruppe (0,05 %, 178 Aufnahmen). Größtenteils ähneln diese Ergebnisse denen aus den bisher untersuchten Vorjahren 2019 bis 2022 (vgl. Musiol et al. 2023). Gleich geblieben sind vor allem der hohe Anteil der Zwergfledermaus und die geringen Anteile von Mops-, Rauhaut-, Mückenfledermaus und *Plecotus*-Gruppe. Jährliche Schwankungen in der Rangfolge sind für die Gattung *Myotis*, den Abendsegler und die Artengruppe Nyctaloid zu beobachten.

Tab. 24: Überblick über die Ergebnisse der akustischen Messungen an den 5 Messstationen (BC = Batcorder) in der Umgebung um das Testfeld im Jahr 2023.

Art/Gattung	BC 1	BC 2	BC 3	BC 4	BC 7	Gesamt	Anteil (%)
Mopsfledermaus (B.barb)	488	297	231	215	11	1.242	0,34
<i>Myotis</i> -Gruppe	712	1.816	1.659	2.227	261	6.675	1,83
Abendsegler (N.noct)	1.908	1.580	2.471	4.230	892	11.081	3,04
Nyctaloid-Gruppe	2.641	11.780	12.724	9.138	1.715	37.998	10,42
Rauhautfledermaus (P.nath)	499	627	682	968	203	2.979	0,82

Art/Gattung	BC 1	BC 2	BC 3	BC 4	BC 7	Gesamt	Anteil (%)
Zwergfledermaus (P.pipi)	23.081	72.425	88.289	100.229	18.250	302.274	82,86
Mückenfledermaus (P.pygm)	171	66	33	35	20	325	0,09
Pipistrelloid-Gruppe	17	276	307	1.013	431	2.044	0,56
Plecotus-Gruppe	50	30	19	25	54	178	0,05
Gesamt	29.567	88.897	106.415	118.080	21.837	364.796	

Auch im Jahr 2023 wurden an den Standorten in Waldnähe (BC1 bis BC4) deutlich mehr Aufnahmen aufgezeichnet als an dem Standort im Offenland (BC7; Abb. 58), ein belastbarer Vergleich mit den Vorjahren ist aufgrund der reduzierten Batcorder-Anzahl im Offenland nur eingeschränkt möglich. Besonders an Standort BC4 wurde eine hohe Aktivität aufgezeichnet. Wie in den Jahren 2019 bis 2022 wurde an Standort BC1, einem Heckenstandort in Waldrandnähe bereits eine viel geringere Aktivität festgestellt. Die Bevorzugung für die Waldrand- und Heckenstandorte war auch im Jahr 2023 bei allen aufgezeichneten Arten bzw. Artengruppen deutlich zu erkennen.

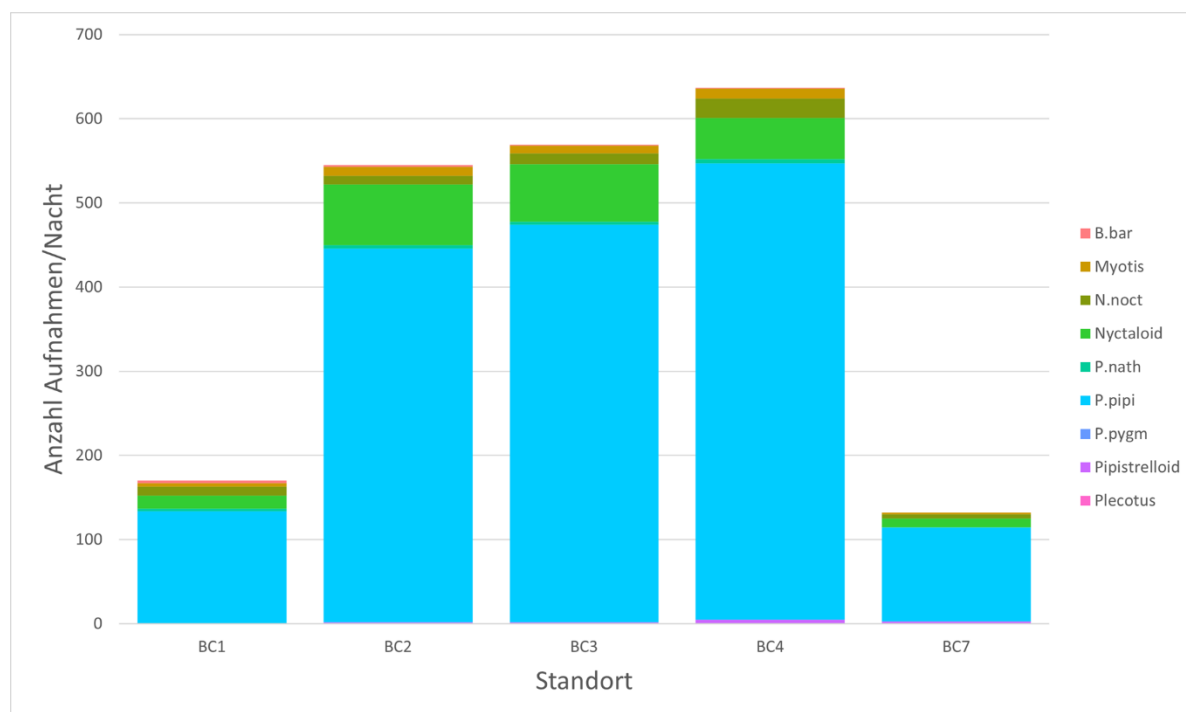


Abb. 58: Verteilung der Anzahl der Aufnahmen pro Messnacht der verschiedenen Arten(-gruppen) an den verschiedenen Standorten im Jahr 2023. BC = Batcorder = Waldbox; B.barb = Mopsfledermaus, N.noct = Abendsegler, P.nath = Rauhautfledermaus, P.pipi = Zwergfledermaus, P.pygm = Mückenfledermaus

Die Phänologie unterschied sich wie in den Vorjahren insbesondere zwischen dem Offenland- (BC 7) und den Waldstandorten (BC 1 bis BC 4) deutlich (Abb. 59 und Abb. 60, vgl. Musiol et al. 2023). An den Waldrandstandorten nahmen die Aufnahmen pro Nacht kontinuierlich über

die Sommermonate zu, wobei im Juni an allen Standorten ein Einbruch in der Anzahl der Aufnahmen zu verzeichnen war. Die Monate mit der höchsten Fledermausaktivität waren an den Waldrandstandorten der August (BC 2, BC 3 und BC 4) und der September (BC 1). Auf den ersten Blick wurden an BC 3 und BC 4 im Oktober die meisten Aufnahmen pro Nacht erzielt (vgl. Abb. 59 und Abb. 60). Allerdings liefen die Batcorder im Oktober dort jeweils nur zwei bzw. vier Nächte und die Vielzahl der Rufe ist vor allem auf einzelne, jagende Zwergfledermäuse zurückzuführen, die sich an den Mikrofonen aufhielten (siehe auch Abb. 61, *P.pipi*). Natürlich können solche Ereignisse, die in wenigen Nächten eine Vielzahl an Aufnahmen generieren, während den Erfassungen hin und wieder auftreten und dabei unentdeckt bleiben. Da in der Regel aber deutlich mehr Messnächte pro Monat abgedeckt sind, werden solche Ereignisse herausgemittelt und die Anzahl der Aufnahmen pro Nacht spiegelt die generelle Fledermausaktivität gut wider. An dem 2023 einzigen untersuchten Offenlandstandort erreichte die Fledermausaktivität bereits im Juli ihr Maximum und nahm anschließend in den Monaten August und September wieder deutlich ab (Abb. 59). Dieser BC 7 steht östlich des Testfelds in unmittelbarer Nähe eines Schweinestalls. In den Vorjahren ergaben sich für diesen Standort recht variable phänologische Verläufe der Fledermausaktivität mit zwei Peaks im Mai und August für das Jahr 2022 oder mit einem Peak im August für das Jahr 2021 (vgl. Musiol et al. 2023). Um das Aktivitätsmuster von 2023 für das Offenland zu verifizieren, wäre ein Abgleich mit den bodennahen Erfassungen an den beiden Messmasten Nordost und Südost hilfreich. Durch einen technischen Fehler an Messmast Nordost und der verzögerten Installation der Mikrofone an Messmast Südost liegen für das Jahr 2023 aber leider keine Daten für einen solchen Abgleich vor. Möglicherweise wird die dortige Fledermausaktivität durch die Insektenverfügbarkeit am Schweinestall bedingt, die wiederum durch die Bedingungen im Stall gesteuert werden könnte.

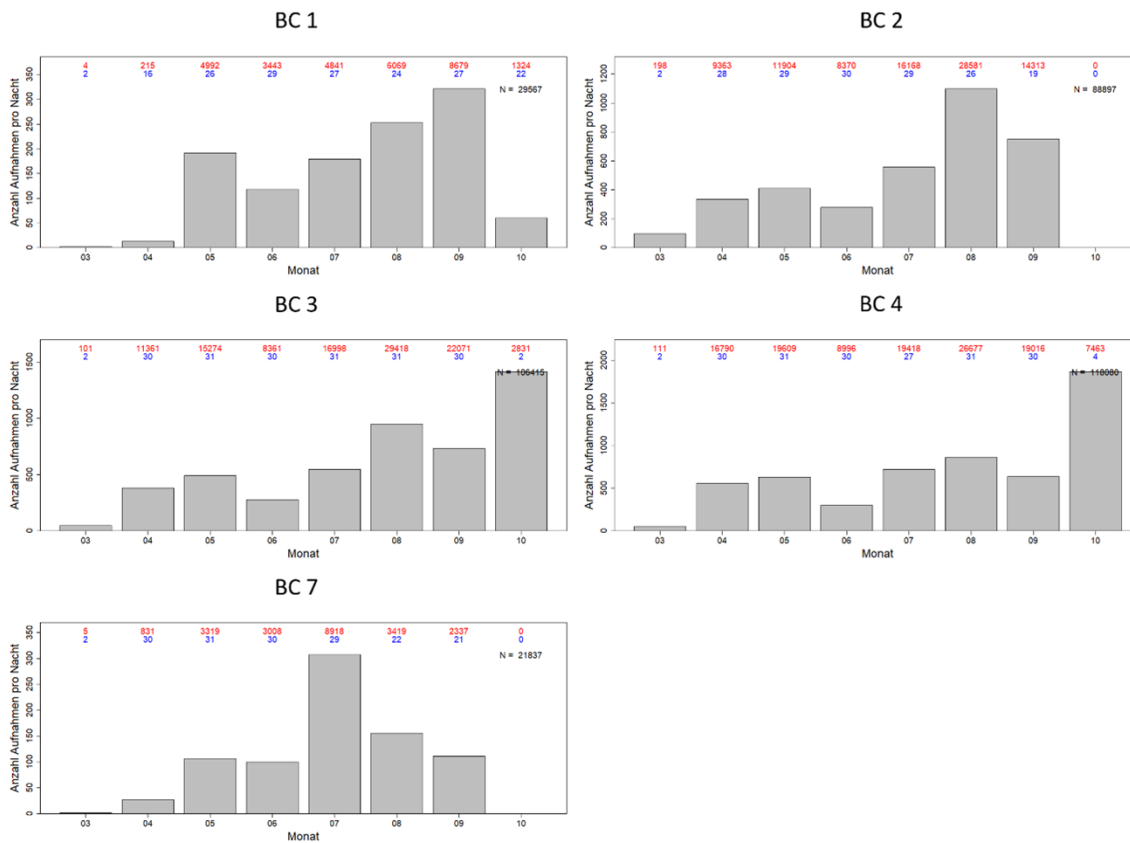


Abb. 59: Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an den Batcorder-Standorten im Jahr 2023.

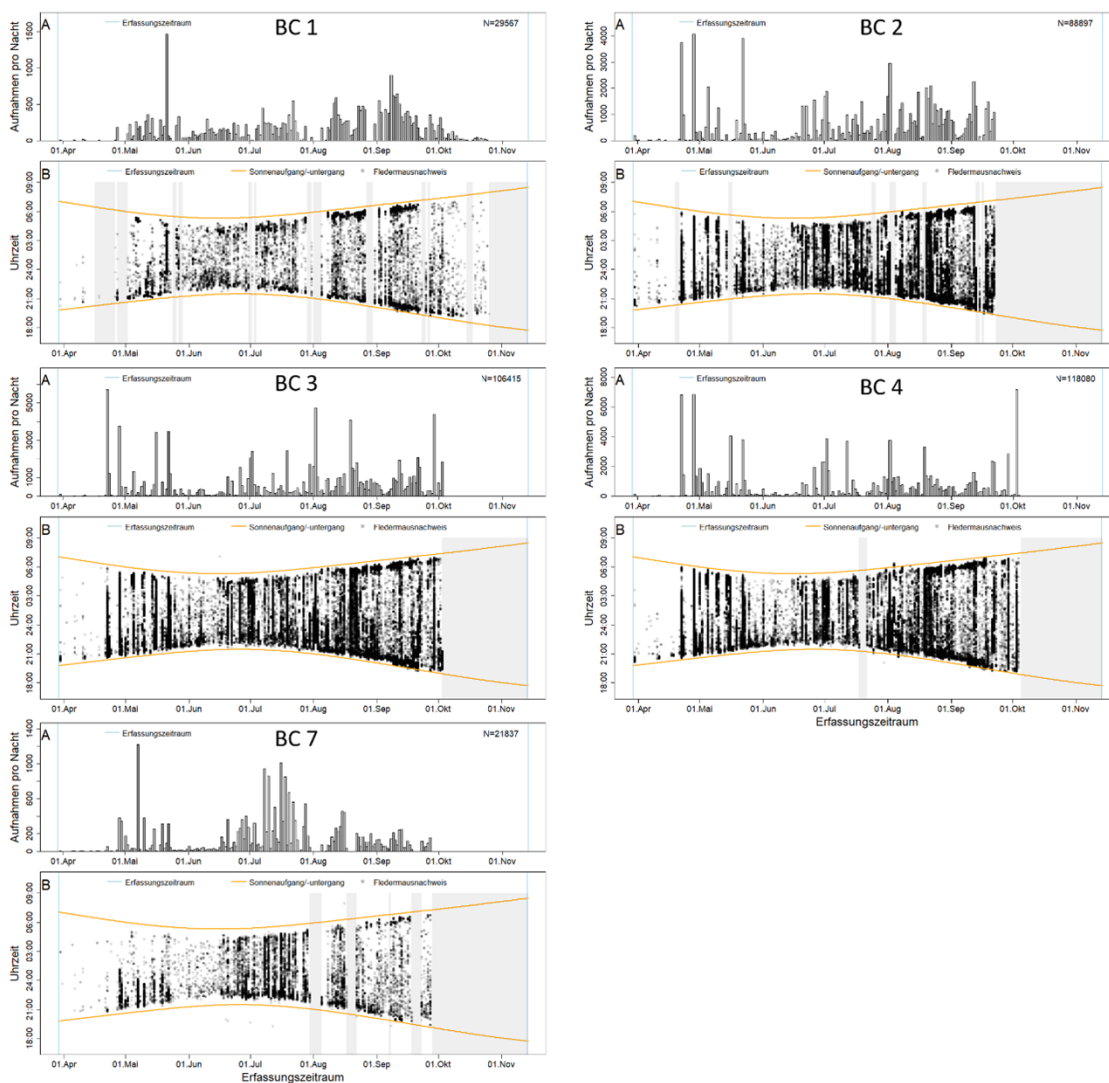


Abb. 60: Übersicht der Gesamtaktivität an den Waldbox-Standorten im Jahr 2023. In A ist die Anzahl der Aufnahmen pro Nacht über den gesamten Erfassungszeitraum aufgetragen (graue Balken, beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse in A zwischen den beiden Höhen). In B ist die nächtliche Aktivität über den Erfassungszeitraum aufgetragen. Die orangen Linien zeigen zudem die Sonnenaufgangs- und Sonnenuntergangszeiten. Beginn und Ende des Erfassungszeitraums sind jeweils durch blaue Linien gekennzeichnet.

Die Phänologie der einzelnen Arten wies wie an den Messmasten ebenfalls artspezifische Unterschiede auf (Abb. 61). Die Zwergfledermaus, die mit Abstand am häufigsten nachgewiesene Art rund um das Testfeld, war die gesamte Erfassungszeit über aktiv, wobei ein untypisches Aktivitätsminimum im Juni zu verzeichnen ist, das allerdings für alle Arten besteht und voraussichtlich durch widrige Witterungsbedingungen verursacht wurde (Abb. 61). Die Mückenfledermaus, die Mopsfledermaus sowie Vertreter der Gattung *Plecotus* und *Myotis* hielten sich insbesondere im Spätsommer und Herbst (Mitte Juli bis Ende September) im Umfeld des Testfelds auf (Abb. 61). Es ist denkbar, dass sich die Tiere auf ihren Jagdflügen nach dem Auflösen der Wochenstuben weiter von ihren Quartiergebietern (Waldbestände, Siedlungsbereiche) entfernen und sich häufiger am Testfeld aufhalten. Ein zweigipfeliges Aktivitätsverlauf wurde für die Rauhaufledermaus und den Abendsegler beobachtet (Abb. 61). Beide Arten gehören zu den ziehenden Fledermäusen, sodass die Rufaufnahmen um das Testfeld das Zugverhalten

beider Arten abbilden (Braun 2003; Braun & Häußler 2003; Häußler & Nagel 2003; Dietz et al. 2007; Hurme et al. 2024; Panzeri et al. 2024). Auch innerhalb der Artengruppe Nyctaloid konnte 2023 ein leicht zweigipfeliger Verlauf der Aktivität festgestellt werden (Abb. 61). Da sich innerhalb dieser Gruppe auch Rufaufnahmen des Abendseglers und des Kleinabendseglers befinden können, ist dieser Verlauf sehr wahrscheinlich dem Zugverhalten dieser Arten zuzuschreiben.

Verglichen mit den Vorjahren blieben 2023 die übergeordneten phänologischen Muster, wie das Zugverhalten der Rauhautfledermaus und des Abendseglers sowie die dauerhafte Anwesenheit der Zwergfledermaus erhalten (vgl. Musiol et al. 2023). Leichte Abweichungen sind aber vor allem für die Mopsfledermaus und die Gattung *Myotis* aufgetreten. Beide Arten bzw. Artengruppen waren 2021 und 2022 gleichmäßiger über den Erfassungszeitraum verteilt, was mit der Ökologie der Arten besser übereinstimmt als ein Aktivitätsmaximum im Herbst, wie es 2023 der Fall war. Eventuell wird das phänologische Muster hier besonders stark durch den im Juni 2023 verzeichneten Aktivitätseinbruch, der wahrscheinlich durch Witterungsverhältnisse bedingt wurde, verschleiert.

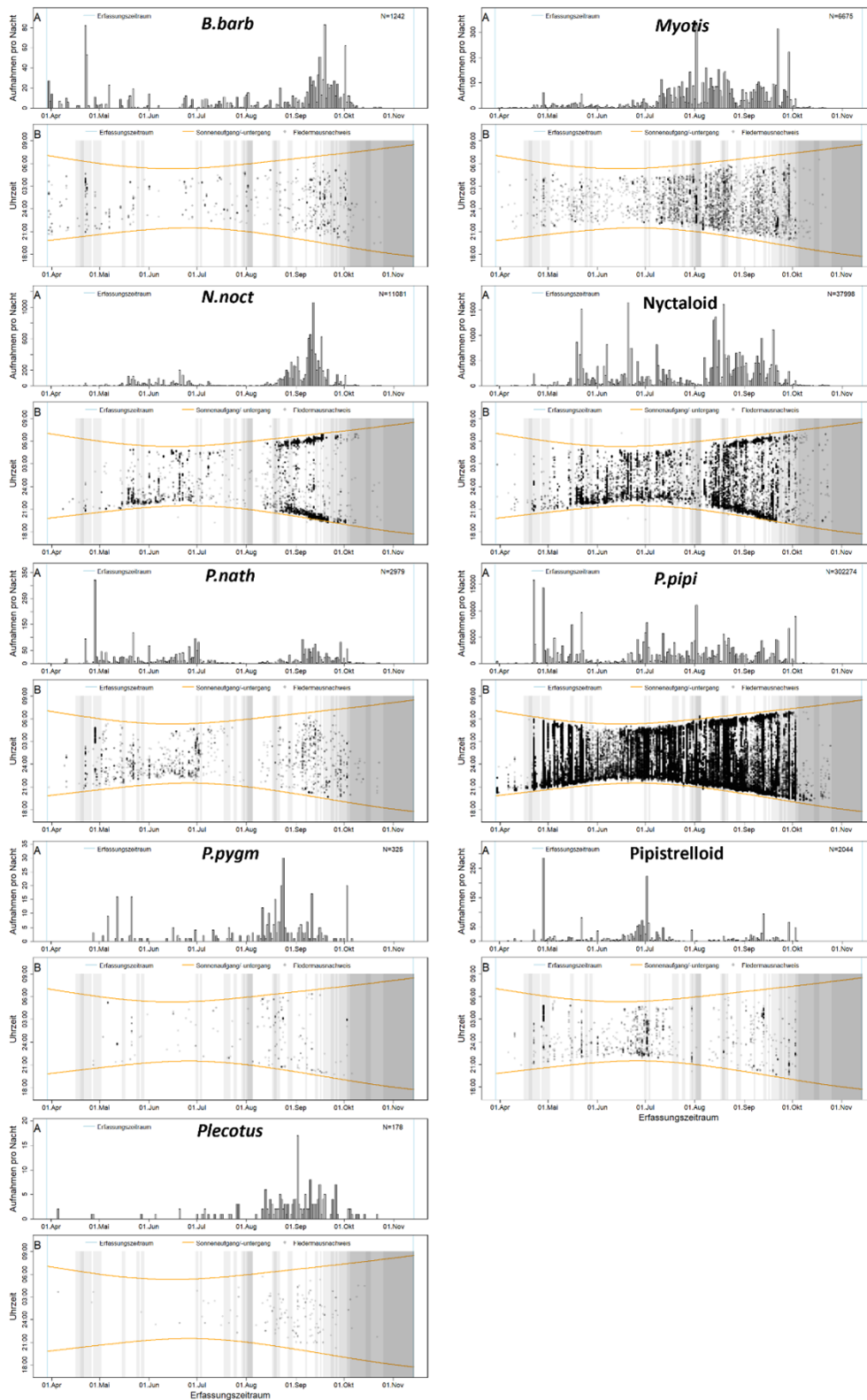


Abb. 61: Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen pro Messnacht an den verschiedenen Standorten aufgeteilt nach den Arten(-gruppen) im Jahr 2020. Zu beachten sind die unterschiedlichen Skalen der y-Achse. *B.barb* = Mopsfledermaus, *N.noct* = Abendsegler, *P.nath* = Rauhaufledermaus, *P.pipi* = Zwergfledermaus, *P.pygm* = Mückenfledermaus

2.1.3.2 2024

Wie im Jahr 2023 wurden auch 2024 die Umfelderfassungen mittels Batcorder fortgeführt, um die Auswirkungen der FWEA auf die Fledermausaktivität im und um das Testfeld untersuchen zu können. Die Batcorder wurden hierzu am 27.03.2024 an denselben fünf Standorten wie im Vorjahr platziert. Die zukünftige Auswertung der im Umfeld gesammelten akustischen Daten und der Vergleich mit den Vorjahren ermöglicht eine Einschätzung bezüglich eines möglichen Meideverhaltens der Fledermäuse gegenüber den FWEA. Durch die verzögerte Inbetriebnahme der FWEA, die erst sukzessive seit dem Frühjahr 2024 erfolgte, könnten im Jahr 2023 Attraktionseffekte (Struktur der FWEA) auf die Fledermäuse gewirkt haben und ein potenzielles Meideverhalten bezüglich der ab Sommer 2024 im Regelbetrieb laufenden FWEA hingegen erst ab diesem Zeitpunkt auftreten. Der Abbau der Batcorder erfolgte am 08.11.2023.

Aufgrund der 2024 insgesamt großen aufgelaufenen Datenmengen konnte die Auswertung der akustischen Rohdaten der Umfelderfassung nicht wie geplant bis zur statistischen Auswertung im Frühjahr 2025 vollendet werden. Dies hat zur Folge, dass an dieser Stelle noch keine Analysen der Fledermausaktivität im Umfeld des Testfelds gezeigt werden können. Eine vollständige Darstellung der Daten sowie die Berücksichtigung dieser in den Modellen zur Fledermausaktivität werden im nächsten Bericht enthalten sein.

2.2 Auswertung und Korrelation von Witterungs-, Umwelt- und Betriebsparametern mit der Fledermausaktivität (AP 3.2)

2.2.1 Meteorologische Zusammenhänge

2.2.1.1 Modellparameter

Für alle im Folgenden dargestellten Modellierungen wurde ein „generalized linear mixed effects regression model“, auch glmer genannt, verwendet. Wie in einem verallgemeinerten linearen gemischten Modell kann so überprüft werden, ob eine abhängige Variable von einem oder mehreren unabhängigen Faktoren beeinflusst wird. Neben festen Effekten („fixed effects“), die die erklärenden Variablen in dem Modell darstellen, können auch Zufallseffekte („random effects“) in das Modell integriert werden, deren Einfluss auf die abhängige Variable voraussichtlich uninteressant sind und daher im Modell gezielt ausgeklammert werden.

Ziel der Modellierung war es zum einen, solche Witterungsparameter (erklärende Variablen, fixed effects) herauszufiltern, die einen Effekt auf die Anwesenheitswahrscheinlichkeit der Fledermäuse (abhängige Variable) an den verschiedenen Messpunkten (verschiedene Höhen der verschiedenen Messmasten, FWEA bzw. an den verschiedenen Batcordern in der Umgebung; erklärende Variable, fixed effect) zeigten. Die Erfassungsnacht und das Erfassungsjahr wurden als Zufallseffekte eingesetzt. Für die Modelle der Batcorder wurde der Standort selbst als Zufallseffekt eingebaut und die Batcorder-Zuordnung zu Wald- bzw. Offenlandstandorten (BC 1 bis 4 werden dem Wald, BC 5 bis 8 dem Offenland zugeordnet) als fester Effekt berücksichtigt.

Die Anwesenheitswahrscheinlichkeit der Fledermäuse (abhängige Variable) wurde durch die binärisierte Darstellung (Präsenz vs. Absenz) der Fledermausrufe in 10-min-Intervallen abgebildet. Zur Unterstützung der Modellkonvergenz wurden alle numerischen Variablen z-transformiert. Um Autokorrelationen zu vermeiden, wurden die Datensätze für die Modelle der Zwergfledermaus und der Artengruppe Nyctaloid inklusive Abendsegler 20-fach ausgedünnt, für die Modelle der Raufhautfledermaus 5-fach bzw. 2-fach für das Mikrofon auf 70 m Höhe (Gondelmikrofon nach unten gerichtet). Neben verschiedenen Interaktionen wurden

teilweise auch quadratische Komponenten der Variablen verwendet, um einen guten Modell-Fit zu erreichen.

Die Daten der FWEA-Mikrofone mit einer Höhe von 75 m (Gondelmikrofon nach oben gerichtet) führten innerhalb der Modelle zur Nicht-Konvergenz. Dies liegt wahrscheinlich in der schlechten Verteilung der Daten bezüglich der Erfassungsjahre, der Saison und der relativen Nachtstunde begründet. Die Erfassungen starteten hier erst Ende September 2024, weshalb vergleichsweise wenige Daten für die beiden Messpunkte vorlagen. Auch ohne eine Ausdünnung der Daten konvergierte das Modell nicht, sodass die beiden Messpunkte nicht in das Modell integriert werden konnten. In zukünftigen Auswertungen können die Daten der Gondelmikrofone, die nach oben gerichtet sind, durch die verbesserte Datenlage integriert werden.

Für die in diesem Kapitel untersuchten Zusammenhänge wurden alle Daten der Messmasten und FWEA zusammen analysiert, gleiches gilt für die Daten der Umfeldmessungen (Batcorder). Die Modellierungen wurden durch und in Zusammenarbeit mit dem Büro oikostat GmbH unter Verwendung der R-Version 4.3.0 und den packages `arm` 1.13 (enthält package `lme4` mit `glmer`), `posterior` 1.5 und `scales` durchgeführt. Vereinfacht betrachtet folgten die Modelle in jeweils abgewandelter Form für die verschiedenen Fledermausarten und Erfassungsarten (Messmast/FWEA bzw. Batcorder) dem folgenden Design:

`glmer` (Anwesenheitswahrscheinlichkeit Fledermausart ~

Temperatur + Windgeschwindigkeit + Windunterstützung + Niederschlag + Saison +
relative Nachtstunde + Erfassungshöhe +
Interaktionen aus Temperatur:relative Nachtstunde + Windunterstützung:Windge-
schwindigkeit + Erfassungshöhe:Saison + Erfassungshöhe:relative Nachtstunde + Sai-
son:Windunterstützung +
(1 | Jahr) + (1 | Nacht) + (1 | Standort)

Bei der Windunterstützung handelt es sich um eine Darstellungsvariante der Windrichtung, die vor allem für die ziehenden Arten die besondere Ökologie der Fledermäuse berücksichtigt. Dabei wurde die SSW-Windkomponente für die erste Jahreshälfte als volle Windunterstützung, d.h. als Rückenwind definiert, in der zweiten Jahreshälfte die NNE-Windkomponente.

In den Modellen sind alle akustischen Daten von 2019 bis 2024 (Messmasten und FWEA) respektive 2023 (Batcorder) enthalten. Obwohl die Rohdaten Fledermausrufe aus neun Arten bzw. Artengruppen enthalten, wurde die Modellierung nur für die Zwergfledermaus, die Raufhautfledermaus und die Nyctaloid-Gruppe inklusive Abendsegler durchgeführt, da nur von diesen drei Arten/Artengruppen eine ausreichend große Datenmenge an allen Erfassungsstandorten und Höhen über die Erfassungsjahre hinweg erreicht wurde. Für andere Arten, z.B. die Gattung *Myotis*, ließen die Aufnahmezahlen keine belastbare Modellierung zu. Dies liegt auch in den Arten selbst und deren Verhaltensweisen begründet, denn Arten der Gattung *Myotis*, *Plecotus* oder auch die Mopsfledermaus fliegen stark strukturgebunden und wurden daher hauptsächlich an den bodennahen Mikrofonen aufgenommen. Da es sich bei den schlaggefährdeten Arten aber insbesondere um die Zwergfledermaus, die Raufhautfledermaus und Vertreter aus der Artengruppe Nyctaloid, wie etwa den Abendsegler, handelt (Dürr 2025), sind

im Wesentlichen die Modelle zu diesen Arten von besonderer Bedeutung und können neue Erkenntnisse zum Schutz dieser Arten liefern.

2.2.1.2 Fledermausaktivität an den Messmasten und FWEA

In die Modelle flossen die meteorologischen Parameter Temperatur, Windgeschwindigkeit, Windunterstützung (abgeleitet aus der Windrichtung) und Niederschlag als fixe, erklärende Variablen ein, da diese aus ökologischer Sicht sehr wahrscheinlich Einfluss auf die Anwesenheitswahrscheinlichkeit der Fledermäuse haben. Bereits für einzelne Jahre in früheren Auswertungen berücksichtigte Parameter wie die atmosphärische Stabilität wurden in das Modell nicht mehr integriert, da diese nicht für alle Untersuchungsjahre vorlagen und zudem stark mit anderen Variablen wie der Windgeschwindigkeit korrelierten. Im Prozess der Modellanpassung wurden diese Variablen ausgeschlossen.

Die Anwesenheitswahrscheinlichkeit der drei untersuchten Fledermausarten/-gruppen am Testfeld nimmt mit steigender Temperatur zu, wobei die Rohhautfledermaus ihre höchste Nachweiswahrscheinlichkeit generell zu tieferen Temperaturen aufweist als die beiden anderen Arten/Artengruppen (Abb. 62). Dies wird insbesondere zu Beginn der Nacht deutlich, wenn die Anwesenheitswahrscheinlichkeit von Rohhautfledermäusen bei geringen bis mittleren Temperaturen (10 bis 16°C) höher ausfällt als bei warmen Temperaturen (19°C; Abb. 62). Dieses Ergebnis deckt sich mit der allgemein bekannten Robustheit der Rohhautfledermaus gegenüber niedrigen Temperaturen (Dietz et al. 2007). Im voranschreitenden Nachtverlauf bevorzugen alle untersuchten Fledermausarten höhere Temperaturen. Dies zeigt sich in den Effektgrafiken mit einem zweiten Aktivitätsgipfel im letzten Drittel der Nacht, wenn Temperaturen über 13°C herrschen (Abb. 62). Bei kühleren Temperaturen bleibt ein zweiter Aktivitäts-Peak gegen Ende der Nacht aus. Dies hängt sehr wahrscheinlich auch mit der Verfügbarkeit von Beuteinsekten zusammen, die zu kälteren Bedingungen weniger aktiv sind (Musiol et al. 2023).

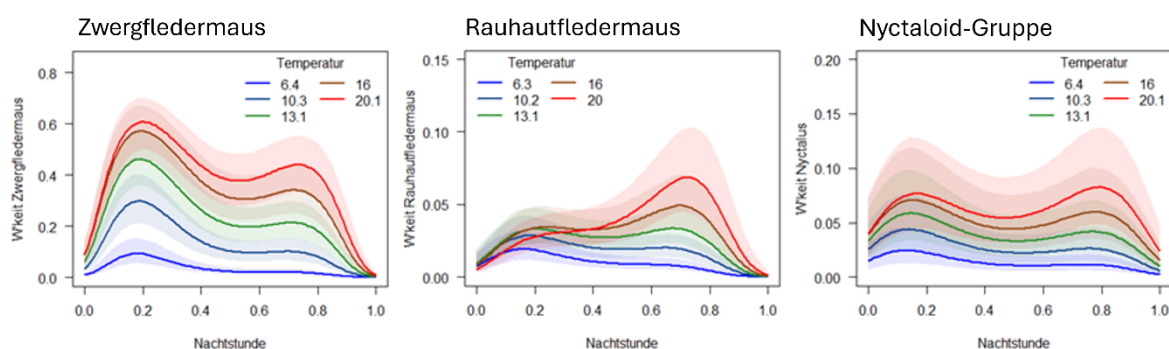


Abb. 62: Effektgrafiken zwischen der Temperatur und der relativen Nachtstunde für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Rohhautfledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts). Für die Temperatur wurden je die 10%, 30%, 50%, 70% und 90% Quantile dargestellt (mit 95%-Unsicherheitsintervall als transparent hinterlegter Bereich). Beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.

Schon bei geringen Niederschlagsmengen kleiner 0,5 mm pro Stunde nimmt die Anwesenheitswahrscheinlichkeit der untersuchten Fledermausarten/-gruppen ab (Abb. 63). Zwar sinkt diese auch bei etwas höheren Niederschlagsmengen größer 0,5 mm/h nicht auf null, dennoch sind zu regennassen Bedingungen weniger Fledermäuse aktiv. Die hier vorgestellten

Ergebnisse sind weniger eindeutig als noch in den vorjährigen Modellierungen, was voraussichtlich an den alternativ verwendeten Niederschlags-Daten des DWD liegt. Diese liegen für jede Stunde vor und nicht, wie die eigens am Windtestfeld erhobenen Werte, in 10-min-Intervallen. Daraus resultiert eine etwas ungenauere Abbildung der möglichen Zusammenhänge, die derzeit eine Übertragbarkeit auf andere Windparks und Situationen deutlich einschränkt.

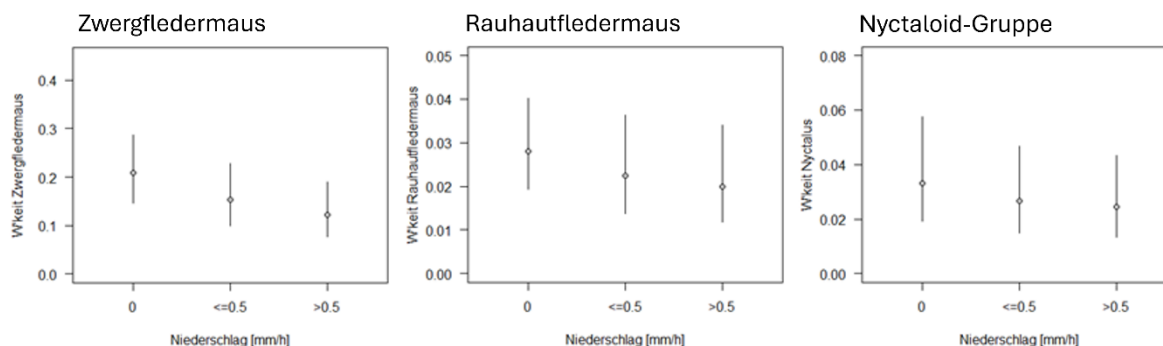


Abb. 63: Effektgrafiken des Niederschlags auf die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Rauhaufledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts). Die Niederschlagsmenge ist in mm/h angegeben. Beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.

Mit zunehmender Windgeschwindigkeit sinkt die Anwesenheitswahrscheinlichkeit der untersuchten Fledermäuse am Testfeld. Bei genauerer Betrachtung und in Interaktion mit der Windunterstützung zeigen die Modelle allerdings ein differenzierteres Bild. So nimmt die Anwesenheitswahrscheinlichkeit der Artengruppe Nyctaloid bei Gegenwind schneller ab als dies bei Rückenwind der Fall ist (Abb. 64, rechts). Für eine Windgeschwindigkeit von 6 m/s liegt die Aktivität der Artengruppe bei Rückenwind knapp doppelt so hoch verglichen mit Gegenwind. Für die Rauhaufledermaus zeigen die Modelle sogar eine Aktivitätszunahme mit steigender Windgeschwindigkeit, allerdings nur für Rückenwinde (Abb. 64, Mitte). Die Anwesenheitswahrscheinlichkeit der als windtolerant geltenden Rauhaufledermaus am Testfeld fällt bei Rückenwind-Bedingungen mit 5 bis 10 m/s sogar am höchsten aus (Abb. 64, Mitte). Ab Windgeschwindigkeiten von 12 m/s wurden Rauhaufledermäuse nur noch vereinzelt nachgewiesen. Der in der Grafik in Abb. 64, Mitte, dargestellte weitere Anstieg der Nachweiswahrscheinlichkeit bei höheren Windgeschwindigkeiten beruht alleine auf den Modellierungen und findet so nicht in der Realität statt.

Diese Beobachtungen lassen sich mit dem Zugverhalten der Rauhaufledermaus und des Abendseglers sowie des Kleinabendseglers, die beide in der Artengruppe Nyctaloid enthalten sind, begründen. Da es sich um ziehende Arten handelt, die im Frühjahr und Herbst Deutschland von Südwest nach Nordost bzw. in entgegengesetzte Richtung passieren und zu diesen Zeiten meteorologisch bedingt höhere Windgeschwindigkeiten erreicht werden als etwa in den Sommermonaten, fallen die Aktivitätszeiten der Rauhaufledermaus und in abgeschwächter Form für die Artengruppe Nyctaloid mit höheren Windgeschwindigkeiten zusammen. In den letzten Jahren zeigten Untersuchungen aber auch, dass die genannten Arten gezielt Bedingungen mit Rückenwind und höheren Windgeschwindigkeiten während der Migration nutzen (Dechmann et al. 2017; Lagerveld et al. 2023; Hurme et al. 2024; Panzeri et al. 2024; Hurme et al. 2025). Die Anwesenheitswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus nimmt im Gegensatz hierzu bei höheren Windgeschwindigkeiten, sowohl bei Rücken- als auch bei Gegenwind, ab. Dabei ist die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus unabhängig von der

Windgeschwindigkeit bei Rückenwind leicht erhöht, wobei die Unsicherheitsintervalle der modellierten Effekte stark überlappen. Von einem signifikanten Zusammenhang kann daher nicht ausgegangen werden. Dieses Ergebnis stimmt mit der Phänologie der Zwergfledermaus überein, die kein Zugverhalten aufweist und während der Aktivitätsphase der Fledermäuse ganzjährig lokal vertreten ist.

Am Windtestfeld lassen sich Vorhersagen zur Anwesenheit von ziehenden Arten wie der Rauhaufledermaus und in Teilen der Artengruppe Nyctaloid (insbesondere Abendsegler, Kleinabendsegler) durch die Integration des Werts Windunterstützung genauer abbilden als nur über die üblicherweise verwendeten Prädiktoren Windgeschwindigkeit und Temperatur. Die am Testfeld erzielten Erkenntnisse lassen die Vermutung zu, dass eine Implementierung der Windunterstützung in fledermausspezifische Abschaltalgorithmen zu einem effektiveren Schutz der ziehenden Arten an WEA bei gleichzeitiger Laufzeitmaximierung beitragen kann. Dies und auch der Zusammenhang mit der Flughöhe der Fledermäuse soll in den kommenden Erfassungsjahren weiter intensiv untersucht werden.

Der saisonale Zusammenhang zwischen der Aktivität und der Windunterstützung wird auch in Abb. 65 ersichtlich. Für alle untersuchten Arten/Artengruppen steigt bei Rückenwind die Nachweiswahrscheinlichkeit im Herbst an, besonders stark für die Artengruppe Nyctaloid und die Rauhaufledermaus. Rückenwinde werden von den ziehenden Arten voraussichtlich deshalb bevorzugt, weil die Tiere so während des Zuges Energie sparen können (Hurme et al. 2024; Hurme et al. 2025). Weshalb auch die Zwergfledermaus, eine nicht ziehende Art, im Herbst augenscheinlich Bedingungen mit Rückenwind bevorzugt (Abb. 65, links), lässt sich ökologisch nicht begründen.

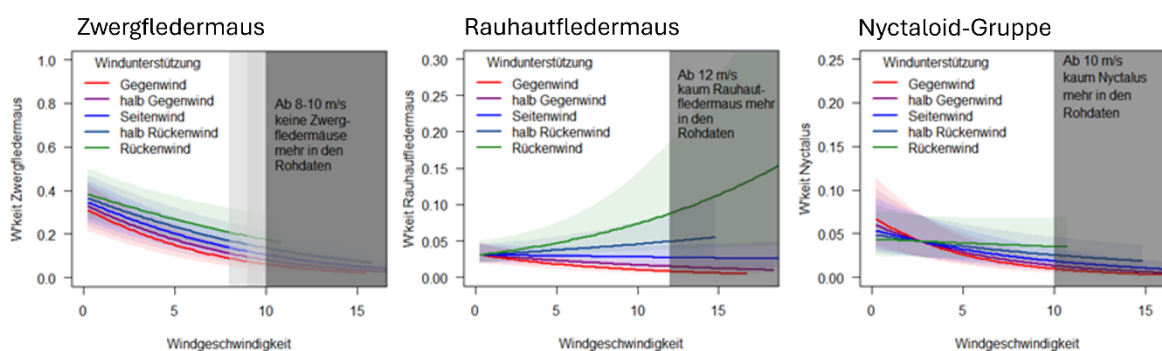


Abb. 64: Effektgrafiken zwischen der Windgeschwindigkeit und der Windunterstützung für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Rauhaufledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts). Transparent hinterlegt sind die 95%-Unsicherheitsintervalle für die verschiedenen Kategorien. Beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.

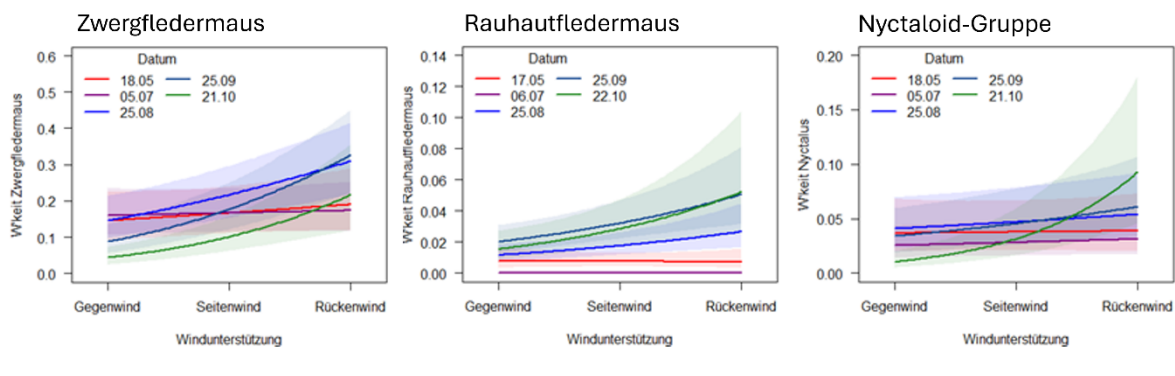


Abb. 65: Effektgrafiken zwischen der Saison und der Windunterstützung für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Artengruppe Nyctaloid (Mitte) und der Rauhauffledermaus (rechts). Transparent hinterlegt sind die 95%-Unsicherheitsintervalle für die verschiedenen Kategorien. Beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.

2.2.1.3 Fledermausaktivität in der Umgebung

Durch den Zugewinn an Daten konnten die Modellierungen der Umfelderkassungen nun auch für die Arten Zwergfledermaus und Rauhauffledermaus sowie die Artengruppe Nyctaloid durchgeführt werden. An den acht bzw. fünf verschiedenen Batcorder-Standorten ist die Zwergfledermaus mit Abstand die häufigste Fledermausart. Die Nachweiswahrscheinlichkeit aller Arten/Artengruppen war an den Batcorder-Standorten am Waldrand westlich des Testfelds (BC 1 bis BC 4) deutlich höher als an den Standorten im Offenland (siehe Abb. 66 und Kapitel 2.1.3). Dies kann durch die unterschiedlichen Geländestrukturen begründet werden. Für die meisten Fledermausarten stellen strukturreiche Habitats wie Wälder, Waldränder oder Hecken und Feldgehölze besser geeignete Jagdhabitats, Leitstrukturen und Quartiergebiet dar als strukturarme Offenlandflächen wie landwirtschaftlich genutzte Äcker.

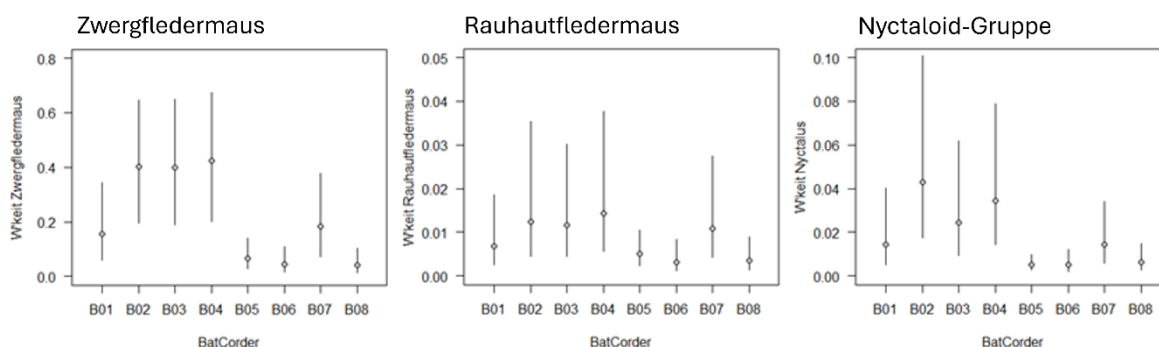


Abb. 66: Effektgrafiken der Batcorder-Standorte für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Rauhauffledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts). 95% Unsicherheitsintervalle als senkrechte Linien dargestellt. B01 bis B04 sind am Waldrand platziert, B05 bis B08 im Offenland. Beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.

Wie aus der Literatur und den Modellierungen an den Messmasten bereits bekannt, zeigen die Fledermäuse an den Batcorder-Standorten ebenfalls einen positiven Zusammenhang zwischen der Nachweiswahrscheinlichkeit und steigenden Temperaturen (Abb. 67; Brinkmann et al. (2011); Behr et al. (2016); Behr et al. (2018)). Bei Temperaturen von nur 4°C ist die Nachweiswahrscheinlichkeit sowohl für Zwergfledermäuse als auch für die Artengruppe Nyctaloid und die Rauhauffledermaus sehr gering. Bereits ab der nächsten Temperatur-Quantile, die in

diesem Fall bei 8,9°C liegt, ist eine deutliche Steigerung in der Nachweiswahrscheinlichkeit zu erkennen und dies über den gesamten Nachtverlauf hinweg. Für die Artengruppe Nyctaloid gilt dies allerdings nur für die erste Nachthälfte. In der zweiten Nachthälfte ist die Nachweiswahrscheinlichkeit dieser Artengruppe ähnlich gering wie bei 4°C. Generell bevorzugen die untersuchten Fledermäuse im voranschreitenden Nachtverlauf höhere Temperaturen. Dies zeigt sich in den Effektgrafiken mit einem zweiten Aktivitätsgipfel im letzten Drittel der Nacht, wenn Temperaturen über 12°C herrschen (Abb. 67). Bei kühleren Temperaturen bleibt ein zweiter Aktivitäts-Peak gegen Ende der Nacht aus. Dies hängt sehr wahrscheinlich auch mit der Verfügbarkeit von Beuteinsekten zusammen, die zu kälteren Bedingungen weniger aktiv sind (vgl. Kapitel 4.3.3 und Musiol et al. 2023).

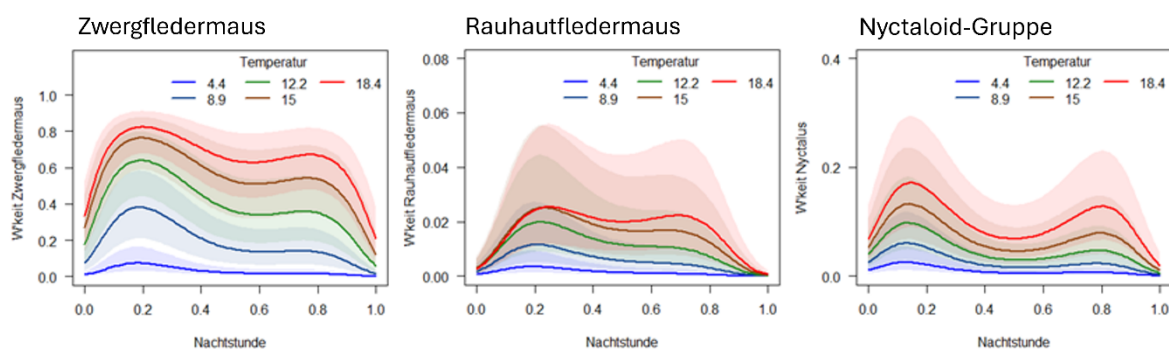


Abb. 67: Effektgrafiken zwischen der Temperatur und der relativen Nachtstunde für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Rauhauffledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts). Für die Temperatur wurden je die 10%, 30%, 50%, 70% und 90% Quantile dargestellt (mit 95%-Unsicherheitsintervall als transparent hinterlegter Bereich). Beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.

Ähnlich wie an den Messmasten nimmt auch an den Batcorder-Standorten in der Umgebung um das Testfeld die Nachweiswahrscheinlichkeit für die Zwergfledermaus, die Rauhauffledermaus und die Artengruppe Nyctaloid schon mit geringen Niederschlagsmengen ab (Abb. 68). Bei der Zwergfledermaus tritt eine deutliche Abnahme in der Nachweiswahrscheinlichkeit erst bei Niederschlagsmengen größer 0,5 mm/h ein. Die Art nutzt das gesamte Windtestfeld inklusive Umgebung zur Jagd, dennoch liegen die Aufenthaltsschwerpunkte der Zwergfledermaus am Waldrand. Es ist möglich, dass die Zwergfledermäuse bei geringen Niederschlagsmengen von kleiner 0,5 mm/h weiterhin und insbesondere am und im Wald aktiv sind, da dieser bei geringen Mengen an Niederschlag noch einen ausreichenden Schutz und ein bestehendes Insektenaufkommen bietet. Erst bei höheren Niederschlagsmengen nimmt die Aktivität der Zwergfledermäuse deutlicher ab, weil die Regenschutzfunktion des Waldes nicht mehr gewährleistet wird. Bei der Rauhauffledermaus und der Artengruppe Nyctaloid kann der Aktivitätsrückgang bei Niederschlag bereits bei geringeren Mengen beobachtet werden (Abb. 68, Mitte und rechts). Ob für dieses Muster das artspezifische Jagd- und/oder Zugverhalten verantwortlich ist, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Für die Modellierungen wurden die Niederschlags-Daten des DWD verwendet, die, anders als die Fledermausaktivität, nur in stündlichen Werten vorliegen. Möglicherweise treten Effekte in dem Modell aufgrund der geringeren Datenschärfe weniger hervor.

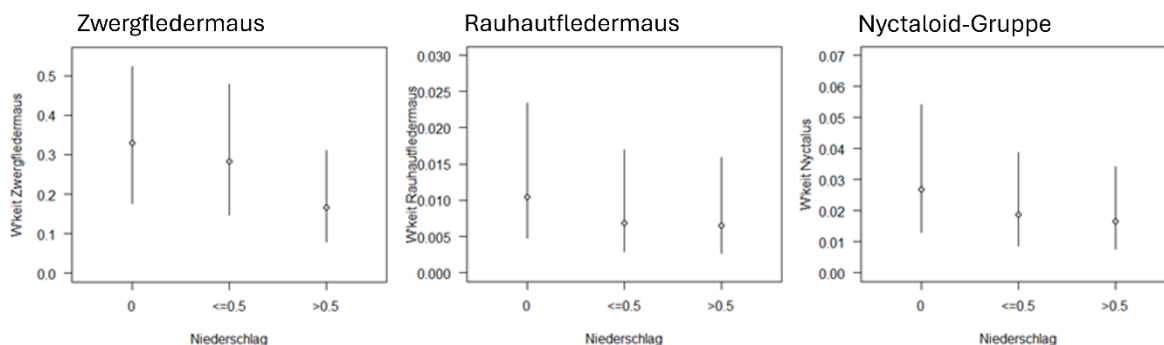


Abb. 68: Effektgrafiken des Niederschlags auf die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Rauhautfledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts). Die Niederschlagsmenge ist in mm/h angegeben. Beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.

Mit zunehmender Windgeschwindigkeit sinkt die Anwesenheitswahrscheinlichkeit der untersuchten Fledermäuse im Umfeld um das Testfeld, wobei der Effekt für die als robust gegen höhere Windgeschwindigkeiten geltende Rauhautfledermaus weniger ausgeprägt ist (Abb. 69, Mitte). Dieser Zusammenhang zwischen steigender Windgeschwindigkeit und abnehmender Fledermausaktivität entspricht dem bekannten Muster, auf dessen Basis Abschaltalgorithmen für Windenergieanlagen in Deutschland berechnet werden (Brinkmann et al. 2011; Behr et al. 2016; Behr et al. 2018). Auf den ersten Blick stimmen diese Ergebnisse auch mit den Modellergebnissen von den Messmasten überein. Zieht man aber auch die Windunterstützung in die Betrachtung mit ein, so ergibt sich, anders als an den Messmasten, kein differenzierteres Bild der Fledermausaktivität bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen (Abb. 69). Die Linien der Effektgrafiken verlaufen insbesondere für Zwergfledermaus und die Artengruppe Nyctaloid annähernd parallel und zeigen große, sich überlagernde Unsicherheitsintervalle. D.h. mit steigender Windgeschwindigkeit nimmt zwar die Anwesenheitswahrscheinlichkeit ab, allerdings unabhängig von der Windunterstützung (Abb. 69, rechts und links). Im Falle der Rauhautfledermaus scheint die Anwesenheitswahrscheinlichkeit der Art mit steigenden Windgeschwindigkeiten bei Gegenwind weniger stark abzunehmen (Abb. 69, Mitte). Aber auch hier sind die Unsicherheitsintervalle sehr groß, sodass die abgebildeten Effekte kaum vertrauenswürdig erscheinen.

Zieht man noch den Jahresverlauf mit in die Betrachtung ein (Abb. 70, Mitte), lässt sich für die Rauhautfledermaus erkennen, dass die Art vor allem im Frühjahr bei Bedingungen mit Gegenwind an den Batcordern aktiv war. Im weiteren Jahresverlauf gab es keine Veränderungen bezüglich der Windunterstützung, die Effektlinien verlaufen parallel. Im Herbst war die Nachweiswahrscheinlichkeit bei Rückenwind etwas erhöht. Dies zeigt sich in ähnlicher Weise für die Zwergfledermaus und die Artengruppe Nyctaloid (Abb. 70, rechts und links). Aufgrund der auch in dieser Modellierung großen Unsicherheitsintervalle lassen sich die Ergebnisse nur mit großer Vorsicht interpretieren. Im Vergleich zu den Daten der Messmasten und FWEA (vgl. Kapitel 2.2.1.2) sind die Effekte an den Batcordern, vor allem was Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Windunterstützung angeht, weniger eindeutig. Wie bereits erwähnt kann dies mit der Nähe der Batcorder BC 1 bis BC 4 zum Waldrand liegen, der Effekte, die im Offenland deutlicher hervortreten verschleiert.

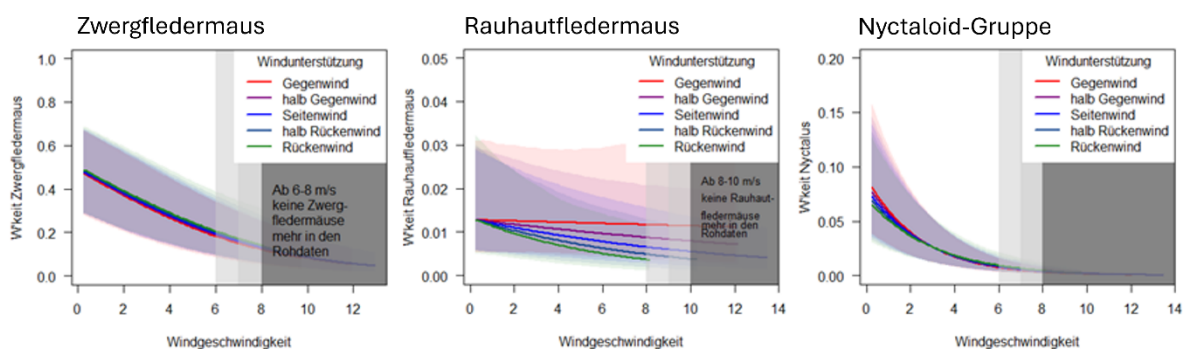


Abb. 69: Effektgrafiken zwischen der Windgeschwindigkeit und der Windunterstützung für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Rauhauffledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts) in der Umgebung des Testfelds. Transparent hinterlegt sind die 95%-Unsicherheitsintervalle für die verschiedenen Kategorien. Beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.

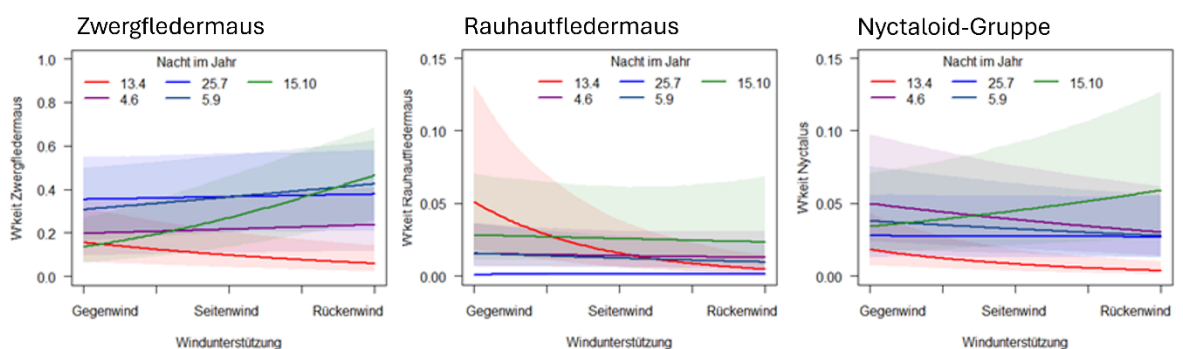


Abb. 70: Effektgrafiken zwischen der Saison und der Windunterstützung für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Artengruppe Nyctaloid (Mitte) und der Rauhauffledermaus (rechts). Transparent hinterlegt sind die 95%-Unsicherheitsintervalle für die verschiedenen Kategorien. Beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.

2.2.2 Einfluss der FWEA auf die Fledermausaktivität (Vorher-Nachher-Untersuchung)

2.2.2.1 Modellparameter

Für die Analyse, ob sich die Anwesenheit der FWEA im Testfeld auf die Anwesenheitswahrscheinlichkeiten der verschiedenen Fledermausarten auswirken, wurde das in Kapitel 2.2.1.1 beschriebene Modell verwendet. Für den Untersuchungsstart mit errichteten Anlagen wurde der 12.06.2023 als Stichtag definiert. Zusätzlich wurde ein weiteres Modell nur für die Zeit nach dem Bau der FWEA gefittet. Dieses soll mögliche Interaktionen zwischen der Anwesenheit der FWEA und der Detektionshöhe der Fledermausrufe aufdecken, separat für Messmasten und FWEA, um verändertes Flugverhalten im Testfeld identifizieren zu können. Aufgrund fehlender Betriebsdaten konnten bisher keine Rotordrehzahlen oder Informationen zum Betriebsmodus in die Modelle integriert werden.

Vereinfacht betrachtet folgten die Modelle in jeweils abgewandelter Form für die verschiedenen Fledermausarten dem folgenden Design (siehe auch Kapitel 2.2.1.1):

glmer (Anwesenheitswahrscheinlichkeit Fledermausart ~

Temperatur + Windgeschwindigkeit + Windunterstützung + Niederschlag + Saison + relative Nachtstunde + Erfassungshöhe +
 Interaktionen aus Temperatur:relative Nachtstunde + Windunterstützung:Windgeschwindigkeit + Erfassungshöhe:Saison + Erfassungshöhe:relative Nachtstunde + Saison:Windunterstützung +
 (1 | Jahr) + (1 | Nacht) + (1 | Standort)

Sowie für Daten nach dem Bau der FWEA:

glmer (Anwesenheitswahrscheinlichkeit Fledermausart ~

Temperatur + Windgeschwindigkeit + Windunterstützung + Niederschlag + Saison + relative Nachtstunde + Kombination Erfassungshöhe_Struktur +
 Interaktionen aus Temperatur:relative Nachtstunde + Windunterstützung:Windgeschwindigkeit + Kombination Erfassungshöhe_Struktur:Saison + Kombination Erfassungshöhe_Struktur:relative Nachtstunde + Saison:Windunterstützung +
 (1 | Jahr) + (1 | Nacht) + (1 | Standort)

2.2.2.2 Fledermausaktivität an den Messmasten und FWEA

Die Modellierungen zeigten, dass die Interaktionen zwischen der Erfassungshöhe und saisonalen bzw. nächtlichen Effekten auf die Fledermausaktivität vor und nach dem Bau der FWEA sehr gering ausgeprägt waren. Entsprechend war es legitim, nur den Effekt der Erfassungshöhe und der An- bzw. Abwesenheit der FWEA für einen mittleren Wert der Saison und der Nachtstunde zu betrachten. Die so erzeugten Effektgrafiken zeigen bereits aus den vorherigen Auswertungen bekannte Muster der Fledermausaktivität, aber auch bisher unbekannte art-spezifische Details.

Die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus an den verschiedenen Erfassungshöhen ist sowohl vor der Errichtung der FWEA als auch danach sehr ähnlich ausgeprägt (Abb. 71, links). Mit großem Abstand wird die Art vor und nach dem Bau in niedrigen Höhen (10 m und 35 m) nachgewiesen. Die lokal vorkommenden Zwergfledermäuse zeigen dementsprechend kein verändertes Flugverhalten oder eine Attraktionswirkung bezüglich des Rotorbereichs. Dies wird auch durch die in Abb. 72 und Abb. 73 gezeigten Zusammenhänge verdeutlicht. In den Grafiken ist die Nachweiswahrscheinlichkeit der verschiedenen Arten bzw. Artengruppen über das Jahr respektive die Nacht hinsichtlich der verschiedenen Messhöhen und Strukturen dargestellt, allerdings nur für den Zeitraum nach dem Bau der FWEA. So können mögliche Attraktions- oder Meideeffekte, die sich durch die Anwesenheit der FWEA ergeben, aufgezeigt werden. Bezüglich der Zwergfledermaus ergaben die Modelle keine nennenswerten Unterschiede zwischen der Nachweiswahrscheinlichkeit an Messmasten versus der FWEA. Dies gilt sowohl über den Jahresverlauf (Abb. 72, links) als auch über die Nacht (Abb. 73, links). Insgesamt wird die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus in den verschiedenen Höhen und an den verschiedenen Strukturen, also deren räumliche Verteilung, nicht durch die Anwesenheit der FWEA beeinflusst. Ob sich durch den regulären Betrieb der FWEA, der am 22.07.2024 startete, Veränderungen der Effekte ergeben, müssen die zukünftigen Auswertungen und experimentellen Untersuchungen zeigen (vgl. Kapitel 2.3.1). Für die hier gezeigten Modellierungen konnte der Betriebsmodus der Anlagen noch nicht integriert werden.

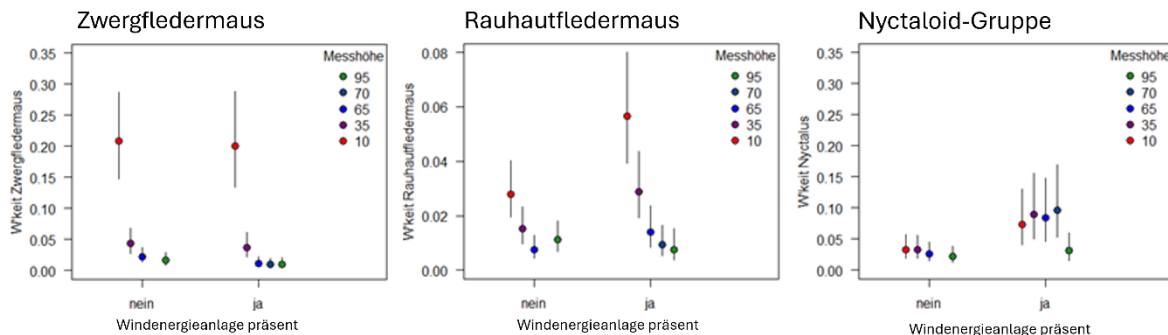


Abb. 71: Effektgrafiken der Erfassungshöhe für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Rauhaufledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts) vor und nach dem Bau der FWEA. 95% Unsicherheitsintervalle als senkrechte Linien dargestellt. Beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.

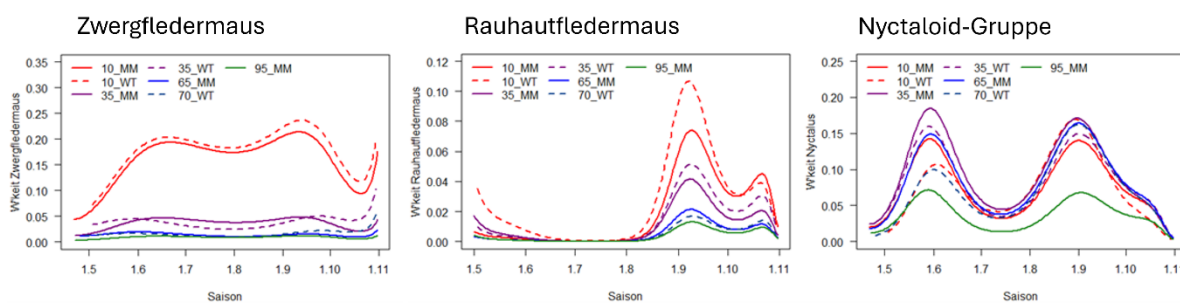


Abb. 72: Interaktionsgrafik der Saison mit der Kombination aus Erfassungshöhe und Struktur für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Rauhaufledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts) nach dem Bau der FWEA. Für die Erfassungshöhen der FWEA (WT = Windturbine) wurden gestichelte Linien verwendet, für die der Messmasten (MM = Messmast) durchgezogene Linien. Im Sinne der Übersichtlichkeit wurden die 95% Unsicherheitsintervalle nicht mit abgebildet. Beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.

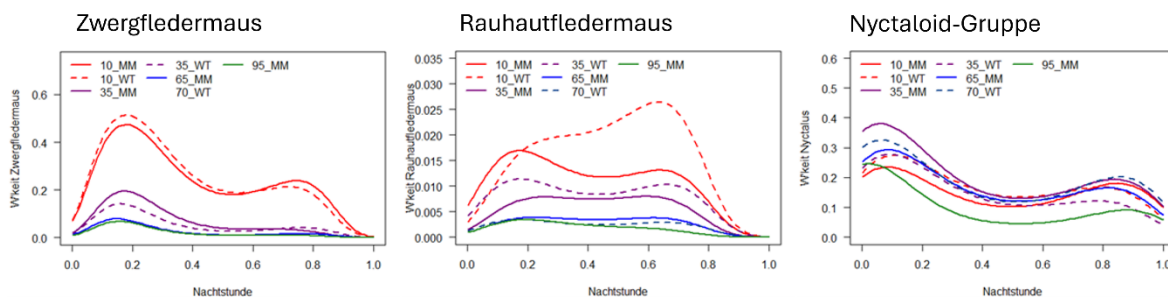


Abb. 73: Interaktionsgrafik der Nachtstunde mit der Kombination aus Erfassungshöhe und Struktur für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Rauhaufledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts) nach dem Bau der FWEA. Für die Erfassungshöhen der FWEA (WT = Windturbine) wurden gestichelte Linien verwendet, für die der Messmasten (MM = Messmast) durchgezogene Linien. Im Sinne der Übersichtlichkeit wurden die

95 % Unsicherheitsintervalle nicht mit abgebildet. Beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.

Im Gegensatz zur Zwergfledermaus wird die Rauhautfledermaus nach dem Bau der FWEA etwas häufiger im Testfeld nachgewiesen und das insbesondere auf einer Höhe von 10 m und 35 m (Abb. 71, Mitte). Vor dem Bau der FWEA zeigte sich an den Messmasten auf 65 m Höhe die geringste Nachweiswahrscheinlichkeit für die Rauhautfledermaus, die auf 95 m Höhe häufiger anzutreffen war (Abb. 71, Mitte). Bei näherer Betrachtung der Grafiken in Abb. 72 und Abb. 73 (jeweils Mitte) wird deutlich, dass die Nachweiswahrscheinlichkeit der Rauhautfledermaus insbesondere an den FWEA erhöht ist, wobei ein direkter Vergleich für die Erfassungshöhen 10 m und 35 m möglich ist, die weiteren Erfassungshöhen stimmen an Messmast und FWEA nicht vollständig überein. An den Erfassungshöhen von 65 m (Messmast), 70 m (FWEA) und 95 m (Messmast) zeigt sich der bekannte Effekt der Aktivitätsabnahmen mit zunehmender Höhe (Abb. 72 und Abb. 73, Mitte). Dies gilt sowohl für den Aktivitätsverlauf über das Jahr (Abb. 72, Mitte) als auch über die Nacht (Abb. 73, Mitte). Demnach halten sich die Rauhautfledermäuse am Testfeld bevorzugt am Turm und Turmfuß der FWEA auf, was auf eine gewisse Attraktionswirkung der Strukturen hindeutet. Bemerkenswert ist, dass dieser Effekt insbesondere in der zweiten Nachthälfte auf 10 m Höhe ausgeprägt ist. Hier weicht die Nachweiswahrscheinlichkeit der Rauhautfledermaus im Verhältnis zu den Werten der Messmasten, aber auch anderer Erfassungshöhen an den FWEA, deutlich nach oben ab. Über die Hintergründe kann an dieser Stelle nur spekuliert werden. Es ist aber davon auszugehen, dass die unterschiedliche Struktur von Messmast (Gittermast) und FWEA (massiver Turm) hierfür verantwortlich ist. Zum einen könnte die Verfügbarkeit von Beuteinsekten an den windgeschützteren FWEA-Türmen für die allgemein gesteigerte Anwesenheit von Rauhautfledermäusen an FWEA sorgen (Querbezug zu Insekten-Kapitel erfolgt nach erster Fertigstellung noch!). Allerdings lässt sich über diese Annahme nicht erklären, warum die Rauhautfledermaus-Aktivität in der zweiten Nachthälfte erhöht ist. Denn im nächtlichen Rhythmus von Fledermäusen wird meist direkt nach dem Ausflug aus dem Quartier mit der Nahrungssuche begonnen (Braun & Dieterlen 2003; Dietz et al. 2007), um die Energiespeicher der stoffwechselstarken Tiere rasch zu füllen. Es wäre an dieser Stelle ein Aktivitätsverlauf zu erwarten, wie er bei der Zwergfledermaus zu sehen ist (Aktivitäts-Peak zu Beginn der Nacht; vgl. Abb. 73 links und Mitte). Nun handelt es sich bei der Rauhautfledermaus, wie bereits mehrfach erwähnt, um eine ziehende Art, die vor allem im Herbst anwesend ist (siehe auch Abb. 72). Zum einen benötigen die ziehenden Tiere am Ende der Nacht ein Quartier zum Überleben. Zum anderen findet im Lebenszyklus der Rauhautfledermaus die Paarung auf dem Zug statt. Bei der Partnerfindung äußern männliche Rauhautfledermäuse Balzrufe, die Weibchen in ein geeignetes Paarungsquartier locken sollen (Jahelková et al. 2008; Jahelková & Horáček 2011). Dieses Balzverhalten beginnt im Hochsommer und Herbst nicht direkt mit einsetzender Nacht, was zum nächtlichen Aktivitätsverlauf in Abb. 73 passt (Furmankiewicz 2003). Es ist denkbar, dass die ziehenden Rauhautfledermäuse am Testfeld nach geeigneten Paarungsquartieren suchen und hierfür die Türme der FWEA inspizieren. Dies führt zu vermehrten Rufaufnahmen an den Mikrofonen der FWEA-Türme in der zweiten Hälfte der Nacht. Die Vermutung, dass Fledermäuse WEA und deren Türme mit Bäumen oder anderen Strukturen verwechseln, die Quartierpotenzial bieten könnten, existiert bereits seit Beginn der Diskussionen um die Auswirkungen von WEA auf Fledermäuse (Cryan 2008; Cryan & Barclay 2009; Cryan et al. 2014). Für die Anwesenheit der Rauhautfledermaus am Testfeld scheint dieser Erklärungsansatz zumindest möglich. In den Rufaufnahmen der letzten Jahre sind auch immer wieder Balzrufe der Rauhautfledermaus aufgezeichnet worden. Für eine statistische Analyse reichen die gesammelten Daten allerdings

noch nicht. Mit dem Fortschreiten des Projekts und der verbesserten Datenlage kann der hier vorgebrachte Interpretationsansatz vertieft untersucht werden.

Ähnlich zur Raufhautfledermaus wird auch die Artengruppe Nyctaloid nach dem Bau der FWEA häufiger nachgewiesen als noch in den Jahren ohne FWEA (Abb. 71, rechts), allerdings nicht nur auf den niedrigen Erfassungshöhen wie die Raufhautfledermaus, sondern über alle Höhen und Strukturen (Messmaste und FWEA) hinweg. Eine besondere Aktivitätszunahme scheint es für die Erfassungshöhen 10 m, 35 m und 65 m zu geben, wobei die Unsicherheitsintervalle ausgeprägt sind (Abb. 71, rechts). Aufgrund der lauten Ortungsrufe der Arten innerhalb der Artengruppe Nyctaloid, ist es wahrscheinlich, dass Individuen auf mehreren Erfassungshöhen gleichzeitig aufgezeichnet werden. Betrachtet man die Nachweiswahrscheinlichkeit der Artengruppe Nyctaloid für den Zeitraum nach dem Bau der FWEA, wird auch hier das beschriebene Höhenprofil deutlich (Abb. 72 und Abb. 73, rechts). Sowohl im Jahresverlauf als auch im Nachtverlauf zeigt sich die Präferenz für mittlere Flughöhen (35 m, 65 m), was auf das Jagdverhalten der Arten zurückzuführen ist (Braun & Dieterlen 2003; Dietz et al. 2007). Bei näherer Betrachtung der Grafik in Abb. 72 rechts zeigt sich, dass die Nachweiswahrscheinlichkeit der Artengruppe Nyctaloid im Frühsommer auf den jeweiligen Erfassungshöhen an den Messmasten größer ist als an den FWEA (durchgezogene Linien liegen höher als gestrichelte Linien einer Farbe). Es ist unwahrscheinlich, dass es sich hierbei um eine Meidung gegenüber der FWEA handelt. Denn im Herbst gleicht sich die Nachweiswahrscheinlichkeit, mit Ausnahme der Erfassungshöhe von 95 m, zwischen allen Höhen und Strukturen an (Abb. 72 rechts, zweiter Peak). Im Nachtverlauf sind ebenso wenig eindeutige Muster zu erkennen (Abb. 73, rechts). Die Grafik in Abb. 74 verdeutlicht, dass die Nachweiswahrscheinlichkeit der Artengruppe Nyctaloid sowohl mit als auch ohne FWEA im Testfeld für den Messmast Nordwest am höchsten war und dies über alle Erfassungshöhen. Im Frühjahr werden die aufgezeichneten Rufe voraussichtlich von den Individuen der lokal ansässigen Populationen dominiert. Diese finden in dem bewaldeten Albtrauf Quartiere für Wochenstuben und ein geeignetes Jagdhabitat. In dessen Nähe befindet sich der Messmast Nordwest, an dem die meisten Rufe der Artengruppe aufgezeichnet wurden. Deutlich wird in der Grafik in Abb. 74 ebenfalls, dass die Nachweiswahrscheinlichkeit der Artengruppe Nyctaloid nach dem Bau der FWEA an allen Strukturen und Erfassungshöhen gestiegen ist. Ob es sich bei diesem Muster um eine tatsächliche Attraktionswirkung der FWEA im Testfeld handelt, muss mit weiteren Daten überprüft werden. Da im Windtestfeld durch die Projektpartner der UMIT Fledermausflugbahnen über Wärmebildkamera erfasst werden, besteht die Möglichkeit, zukünftig auch das tatsächliche Flugverhalten einzelner Individuen mit in die Analysen einzubeziehen. Mit voranschreitender Automatisierung und Klassifizierung der Flugbahnen kann es ermöglicht werden unterschiedliches Flugverhalten (Nahrungssuche vs. Zug) im Jahresverlauf abzubilden und als Interpretationshilfe zu nutzen (siehe Kapitel 3).

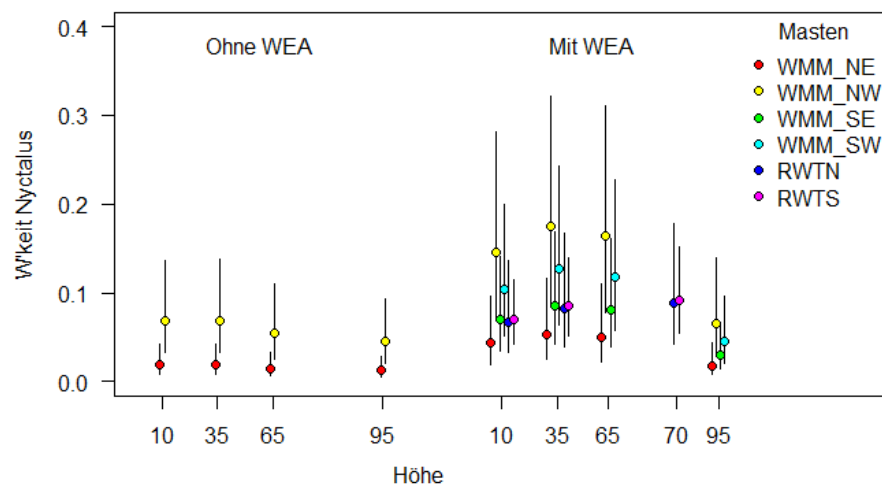


Abb. 74: Schätzwerte für den Zufallsfaktor Struktur (Messmast bzw. FWEA) im Modell der Artengruppe Nyctaloid, angegeben pro Erfassungshöhe sowie vor bzw. nach dem Bau der FWEA. Beachte, dass keine Interaktionen zwischen dem Zufallsfaktor Struktur und einem anderen Prädiktor im Modell bestehen. Daher sind die Schätzwerte für die sechs Messmasten und zwei FWEA (auf der logit-Skala) immer proportional gleich zueinander.

2.2.2.3 Fledermausaktivität in der Umgebung

Für die Modellierungen zur Klärung des Einflusses der FWEA auf die Anwesenheitswahrscheinlichkeit der verschiedenen Fledermausarten und Artengruppen im Umfeld des Testfelds konnten bis zur Berichtserstellung nur die Daten bis einschließlich 2023 integriert werden. Das bedeutet, dass für den Vorher-Nachher-Vergleich innerhalb der Kategorie „Nachher“ nur Daten vom 12.06.2023 bis zum 14.11.2023 vorliegen. Die Interpretationen der Modellergebnisse müssen daher mit Vorsicht betrachtet werden. Dennoch entsprechen in den Effektgrafiken abgebildete Tendenzen tatsächlich existierenden Zusammenhängen, da innerhalb der Modelle auf das Datenungleichgewicht und die Saison bzw. das Jahr korrigiert wurde. Die Daten aus 2024 werden im nächsten Projektbericht berücksichtigt und zeigen dann voraussichtlich ein belastbareres Bild.

Wie bereits in den Kapiteln 2.1.3 und 2.2.1.3 beschrieben, ist die Fledermausaktivität an den Offenland-Standorten (BC 5 bis BC 8) deutlich geringer als an den Waldstandorten (BC 1 bis BC 4). Dies wird auch in den Effektgrafiken der Vorher-Nachher-Auswertungen deutlich (Abb. 75 und Abb. 76, jeweils links). Beim Vergleich der Anwesenheitswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus an den Batcordern im Offenland und am Waldrand vor und nach dem Bau der FWEA im Sommer 2023 lässt sich erkennen, dass mit der Anwesenheit der FWEA im Testfeld weniger 10-Minuten-Intervalle mit Zwergfledermäusen aufgezeichnet wurden. Dies gilt sowohl für die Waldrand- als auch die Offenland-Standorte im Umfeld (Abb. 75, links). Da die Modelle auf saisonale Effekte korrigiert wurden, ist der gezeigte Effekt nicht etwa durch anderweitige saisonale Besonderheiten hervorgerufen worden. Dies verdeutlicht auch die Grafik in Abb. 76 (links). Hier sind die jährlichen Schwankungen in der Zwergfledermaus-Aktivität zu erkennen. Insbesondere ist aber das Jahr 2023 von Interesse, in dem die Nachweiswahrscheinlichkeit für Zwergfledermäuse für die zweite Jahreshälfte ab der Fertigstellung der FWEA geringer ausfällt als in der ersten Jahreshälfte. Natürlich muss die geringe Datenlage für die Kategorie „Nachher“ sowie die großen Unsicherheitsintervalle mit in Betracht gezogen werden. Da die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermäuse nach dem Bau der FWEA innerhalb des Testfelds nicht angestiegen ist, sondern auf einem ähnlichen Niveau verblieb wie vor dem

Bau der FWEA (vgl. Kapitel 2.2.2.2), ist nicht von einer Verschiebung der Zwergfledermausaktivität in das Testfeld auszugehen. Die Integration der Daten aus 2024 wird zu einer Klärung der Sachverhalte beitragen.

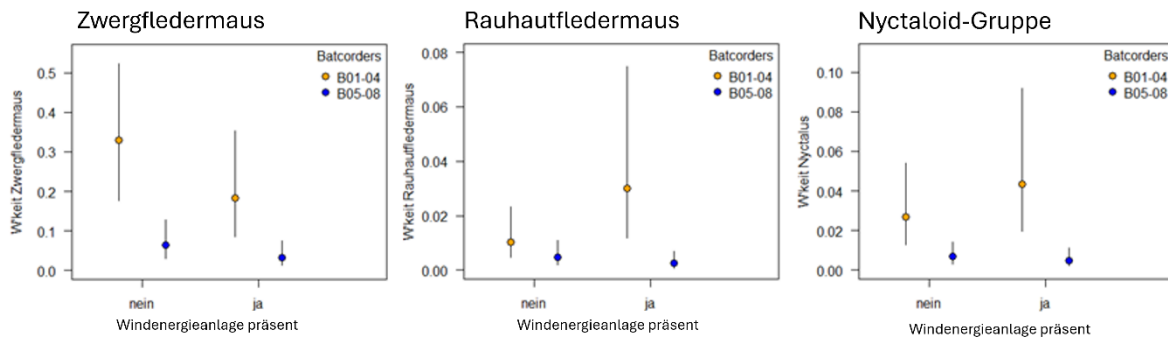


Abb. 75: Effektgrafiken der Batcorder-Standorte für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Rauhauffledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts) vor und nach dem Bau der FWEA. 95% Unsicherheitsintervalle als senkrechte Linien dargestellt. B01 bis B04 sind am Waldrand platziert, B05 bis B08 im Offenland. Beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.

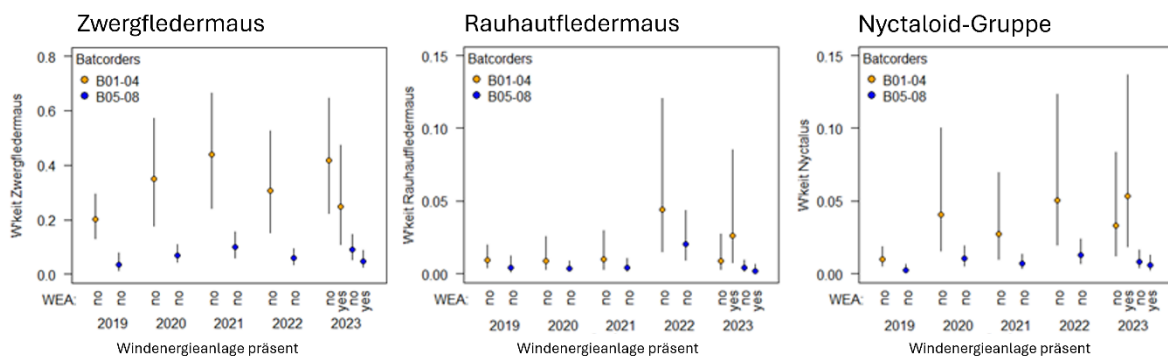


Abb. 76: Effektgrafiken der Batcorder-Standorte für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Rauhauffledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts) vor und nach dem Bau der FWEA, für die Erfassungsjahre separat dargestellt. 95% Unsicherheitsintervalle als senkrechte Linien dargestellt. B01 bis B04 sind am Waldrand platziert, B05 bis B08 im Offenland. Beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse.

Die Nachweiswahrscheinlichkeit von Rauhauffledermäusen und der Artengruppe Nyctaloid im Umfeld nahm im Gegensatz zur Zwergfledermaus mit dem Bau der FWEA zu (Abb. 75 und Abb. 76, jeweils Mitte und rechts). Auch hier wurden saisonale Effekte über das Modell ausgeschlossen. Die Aktivitätszunahme betreffend Rauhauffledermaus und Artengruppe Nyctaloid trifft allerdings nur auf die Wald-Standorte zu. Im Offenland nahm die Aktivität der beiden Arten(-gruppen) mit anwesenden FWEA leicht ab. Auch an den Messmasten und FWEA innerhalb des Testfelds wurden nach dem Bau der FWEA mehr 10-Minuten-Intervalle mit Rufen der Rauhauffledermaus bzw. der Artengruppe Nyctaloid festgestellt als vor dem Bau (vgl. Kapitel 2.2.2.2). Insbesondere an den Messmasten nahe des bewaldeten Albtraufs stieg die Nachweiswahrscheinlichkeit. Die Ergebnisse aus dem Testfeld und der Umfelderfassung stimmen dementsprechend überein und vervollständigen das in Kapitel 2.2.2.2 aufgezeigte Bild.

Dennoch werden die weiteren Auswertungen der Daten von 2024 der Interpretation der Modelle zuträglich sein.

2.3 Experimentelle Untersuchungen

Die Analyse der in den Arbeitspaketen 3.1 und 3.2 der Phase 2 gewonnenen Daten hat bereits erweiterte Erkenntnisse hinsichtlich korrelativer Zusammenhänge zwischen der Fledermausaktivität und verschiedenen Witterungsbedingungen geliefert. Die Einflüsse der FWEA auf die Fledermäuse im und um das Testfeld wurden bis zum Abschluss der aktuellen Projektlaufzeit (erste Hälfte 2025) anhand der Modellierungen mit den gesamthaften Daten aus Phase 2 beleuchtet. Um aber mögliche Wirkzusammenhänge gezielt untersuchen zu können, bietet das Testfeld die einmalige Möglichkeit, manipulativ in den Betrieb der FWEA einzugreifen, Parameter zu verändern und Experimente durchzuführen.

Mit Fortschreiten der Phase 1 des Forschungsprojekts wurden erste mögliche Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Variablen und Umweltparametern (Fledermausaktivität, Witterung) sichtbar. Um etwaige Korrelationen und Verhaltensmuster deutlicher herausarbeiten zu können oder bisher unklar gebliebene Sachverhalte beleuchten zu können, soll in Phase 2 manipulativ in verschiedene Anlagenparameter eingegriffen werden. Dieser experimentelle Ansatz zielte darauf ab in einem nächsten Schritt mögliche Vermeidungsmaßnahmen verfeinern zu können. Diese experimentellen Untersuchungen sollen dabei helfen, den Einfluss verschiedenster Parameter, wie etwa Nachlaufströmungen, auf Fledermäuse zu verstehen. Dabei sollen nicht nur die akustischen Daten zur Überwachung der Experimentierzeiträume erfasst und bei der Auswertung berücksichtigt, sondern auch in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern der UMIT und von OekoFor Erkenntnisse aus der optischen Erfassung der Fledermäuse sowie zur Insektenabundanz rund um die FWEA integriert werden. Aufgrund von Verzögerungen bei Bau und Inbetriebnahme der FWEA konnten im bisherigen Verlauf von Phase 2 noch keine der experimentellen Untersuchungen gezielt in Angriff genommen werden. Zwar liefen die FWEA seit der Inbetriebnahme und auch schon davor im Trudelmodus und mit höheren Umdrehungen, sodass diese Betriebszustände bezüglich der dann jeweils festgestellten Fledermausaktivität hätten analysiert werden können. Da es allerdings nicht möglich war, verlässliche Betriebsdaten für die bisherige Laufzeit zu ermitteln, konnte der Betrieb der FWEA noch nicht in die Modellierungen integriert werden. Dementsprechend ist die Durchführung der experimentellen Untersuchungen für den weiteren Verlauf geplant.

Es sollen folgende experimentelle Ansätze mit abnehmender Priorität verfolgt werden:

1. Aktive Veränderung des Betriebsmodus zur Untersuchung des Einflusses von Nachlaufströmungen auf die Fledermausaktivität,
2. Untersuchung des Einflusses des Trudelbetriebs auf die Fledermausaktivität und das Verhalten der Tiere,
3. Überprüfung von Systemen zur Schlagopferdetektion: Test verschiedener in der Entwicklung befindlicher Systeme und Vergleich mit konventionellem Nachsuchen bzw. dem im Rahmen von AP 4 entwickelten und installierten System,
4. Entwicklung von Ansätzen zur Abschaltung nach Echtzeitdaten und Vergleich mit konventionellen Methoden.

2.3.1 Aktive Veränderung des Betriebsmodus und Trudelmodus

Aufgrund der verzögerten Errichtung der FWEA, die erst im Sommer 2023 abgeschlossen werden konnte, und der damit einhergehenden verspäteten regulären Inbetriebnahme im Frühjahr 2024, konnten bis zum jetzigen Zeitpunkt keine gezielten Manipulationen der FWEA durchgeführt werden. Dennoch können nach der beendeten Erfassungssaison von 2025 erste Betriebsdaten, z.B. der Trudelmodus und verschiedene Rotordrehzahlen, in die Modellierungen integriert werden und so deren Einfluss auf die Fledermausaktivität am Testfeld und dessen Umgebung untersucht werden. Weiterhin soll ab spätestens 2026 zusätzlich aktiv in den Betriebsmodus der beiden FWEA eingegriffen werden. Dabei werden die FWEA einzeln auf zwei oder drei Rotordrehzahlklassen gedrosselt.

2.3.2 Überprüfung von Systemen zur Schlagopferdetektion

Bezüglich des Tests, der Überprüfung und dem Vergleich von automatisierten Schlagopferdetektions-Systemen (Punkt 3) wurde durch das ZSW Kontakt zur Firma B-Finder hergestellt. Das Unternehmen möchte sein Detektionssystem, das aus drei Ringen bestehend aus mehreren Wärmebildkameras aufgebaut ist und den Fall potenzieller Schlagopfer erkennen soll, im Testfeld testen und stellt dieses für vergleichende Tests mit anderen Systemen, wie das der UMIT, zur Verfügung. Die Abstimmung zum zeitlichen Horizont und der technischen Umsetzung am Testfeld wird 2025 wieder aufgegriffen. Der Test des Detektionssystems in Form von Abwurftests mit Fledermausdummies kann derzeit noch nicht zeitlich festgelegt werden.

2.3.3 Entwicklung von Ansätzen zur Abschaltung nach Echtzeitdaten

Im Rahmen der Entwicklung und Implementierung von Echtzeitdaten in die Abschaltalgorithmen (Punkt 4), wurde im Frühjahr 2024 eine Machbarkeitsrecherche zu dem Thema durchgeführt. Diese lieferte konträre Einschätzungen zur Umsetzbarkeit solcher Systeme. Zum einen wurde in den USA ein smart curtailment system mit der Bezeichnung „EchoSense“ entwickelt und getestet (Vallejo et al. 2023). Das System kombiniert Witterungsparameter mit Echtzeitdaten der Fledermausaktivität, die über akustische Detektoren erfasst wird. In einer Studie, die über zwei Jahre angelegt war (2020 und 2021), verglichen die Entwickler sowohl den finanziellen Ertrag aus der Windenergiegewinnung als auch die Schlagopferzahlen zwischen Anlagen mit einer pauschalen Abschaltung (19 WEA), Anlagen mit dem EchoSense-System (19 WEA) und Kontroll-Anlagen ohne jegliche Abschaltungen (22 WEA). Nach einer registrierten Fledermausdetektion an einem System werden alle mit dem EchoSense ausgestatteten Anlagen für 30 Minuten aus dem Wind gedreht und so abgeschaltet. Wurde in den letzten zehn Minuten des 30-Minuten-Zeitraums erneut eine Fledermaus festgestellt, verlängerte sich die Abschaltzeit um weitere zehn Minuten, und so weiter. Die Auswertungen der Studie zeigen, dass sowohl mit pauschalen Abschaltungen als auch mit dem EchoSense-System Fledermäuse an den WEA zu Tode kommen und das in ähnlicher Größenordnung. Im Jahr 2020 wurden 59 Schlagopfer (pauschale Abschaltung), 64 Schlagopfer (EchoSense) bzw. 100 Schlagopfer (Kontroll-Anlagen ohne jegliche Abschaltung) gefunden. Im Jahr 2021 waren es 89 (pauschale Abschaltung) bzw. 78 (EchoSense) Schlagopfer. Zwar gab es keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Schlagopferzahlen mit pauschaler Abschaltung oder Echtzeitabschaltung mittels EchoSense, allerdings konnten die Energieverluste mit der Echtzeitabschaltung im Vergleich zu der pauschalen Abschaltung um 41 % (2020) bzw. 56 % (2021) vermindert werden.

Aus Artenschutzsicht bringt das EchoSense-System mit der Echtzeitabschaltung wohl keinen Mehrgewinn. Betrachtet man aber die Dringlichkeit einer gelingenden Energiewende im Einklang mit dem Artenschutz, insbesondere unter dem Aspekt der novellierten Erneuerbaren-Energien-Richtlinie der EU, könnte ein solches System positive Effekte erzielen.

Auch in der Schweiz wurde bereits ein System zur Echtzeitabschaltungen an WEA untersucht (SWILD 2015). In der Studie wurde das System DTBat getestet und dessen Detektionsgenauigkeit mit klassischen, akustischen Fledermausdetektionssystemen (Batcorder der Firma ecoObs) verglichen sowie die Auswirkungen auf die Energiegewinnung berechnet. DTBat schaltet, ähnlich wie das System EchoSense, die WEA ab, wenn ein Fledermausruf detektiert wurde. Dabei können verschiedene Trigger-Einstellungen (1, 2 oder 3 detektierte Fledermausrufe bis die Abschaltung ausgelöst wird) und Abschalt-Zeiträume (20 min, 40 min oder 60 min) gewählt werden. Die Detektionsgenauigkeit des DTBat war etwas geringer als mit dem Vergleichssystem, aber dennoch zufriedenstellend: im besten Szenario konnten 92,4 % der Zeit mit Fledermausaktivität korrekt erkannt und somit die anwesenden Tiere geschützt werden.

Allerdings wies das DTBat, so wie alle anderen Systeme zur Echtzeitabschaltung, eine essenzielle Schwäche auf. Von dem Zeitpunkt der Fledermausdetektion bis zum Stillstand der Rotorblätter bzw. bis zu einer für Fledermäuse ungefährlichen Rotordrehzahl vergehen je nach technischen Voraussetzungen und Windverhältnissen bis zu 52 Sekunden. In dieser Zeit sind die lokal anwesenden Fledermäuse nicht vor Schlagereignissen geschützt. Bedenkt man, dass die Detektionsreichweite von Fledermäusen in den meisten Fällen deutlich unter 100 m liegt und die Tiere Distanzen schnell überwinden können, scheint ein verlässlicher Schutz der Fledermäuse mit einer Echtzeitabschaltung, sofern die Detektionssysteme an der WEA selbst angebracht werden, nur bedingt möglich. Die Einhaltung der artenschutzrechtlichen Anforderungen in Deutschland ist mit Systemen zur Echtzeitabschaltung alleine derzeit voraussichtlich nicht zu realisieren.

Das Testfeld bietet die Möglichkeit, die bestehenden Systeme (EchoSense, DTBat) zu testen oder eine eigene Echtzeitabschaltung zu implementieren und zu erproben. Ggf. können erfassungstechnische Anpassungen entwickelt werden, die eine Vereinbarkeit zwischen Detektionszeitpunkt und Rotorstillstand versprechen. Da hierfür aufwändige technische Anpassungen in der akustischen Erfassung und ein Eingriff in die FWEA-Betriebssoftware nötig sind, kann dieser experimentelle Untersuchungsansatz erst ab frühestens 2026 realisiert werden.

3 Wärmebild

Christof Happ und Alexander Sutor

3.1 Stereo-Wärmebilderfassung von Fledermäusen (AP 4.1)

Das Stereo – Wärmebildsystem basiert auf Vorarbeiten im Rahmen von Renebat II (Hochradel K, 2015). Basierend auf dieser Idee wurde ein System mit hohem Automatisierungsgrad entworfen und konnte am Ende des Erfassungsjahres 2023 zum ersten Mal vollumfänglich installiert und getestet werden. Es war dabei für zwei Nächte aktiv und wurde im Erfassungsjahr 2024 Anfang April bis Ende Oktober zur Erfassung von nächtlichen Fledermaus-Flugbahnen eingesetzt (siehe Abb. 77).

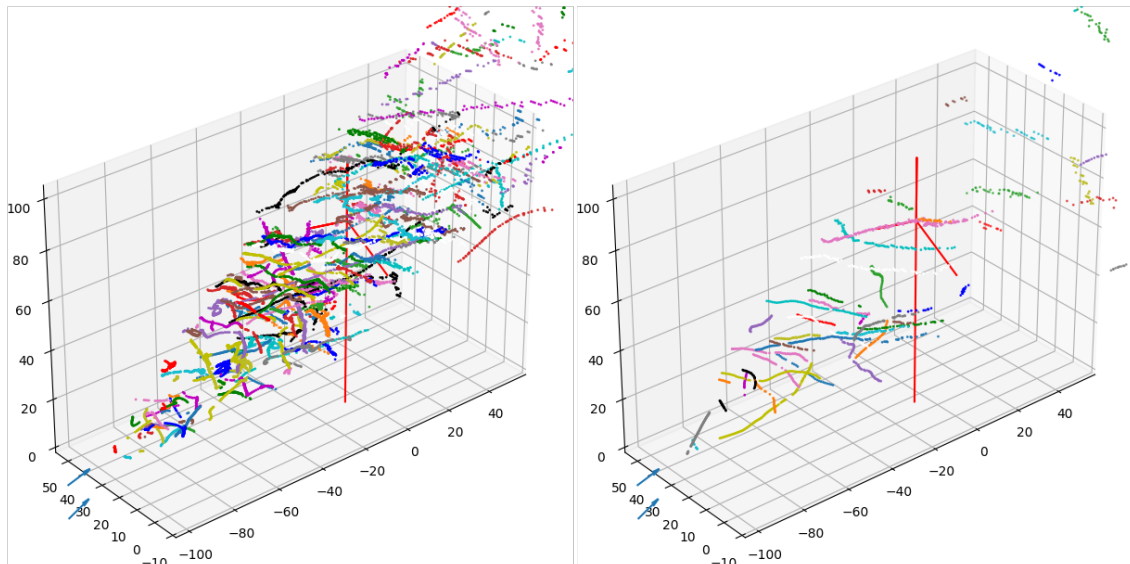


Abb. 77: Installation des Stereo-Wärmebild-Systems am nordwestlichen Messmast. Die Kameras sind durch gelbe Kreise und die Recheneinheit durch einen grünen Kreis markiert; Quelle: C. Happ, UMIT Tirol.

Die Kameras werden dabei in einem Abstand von etwa 15 Metern am Messmast installiert, um eine möglichst hohe Tiefenauflösung zu gewährleisten.

3.1.1 Erfassungsjahr 2023

27.-28.09.2023 erste Nachthälfte 27.-28.09.2023 zweite Nachthälfte



28.-29.09.2023 erste Nachthälfte 28.-29.09.2023 zweite Nachthälfte

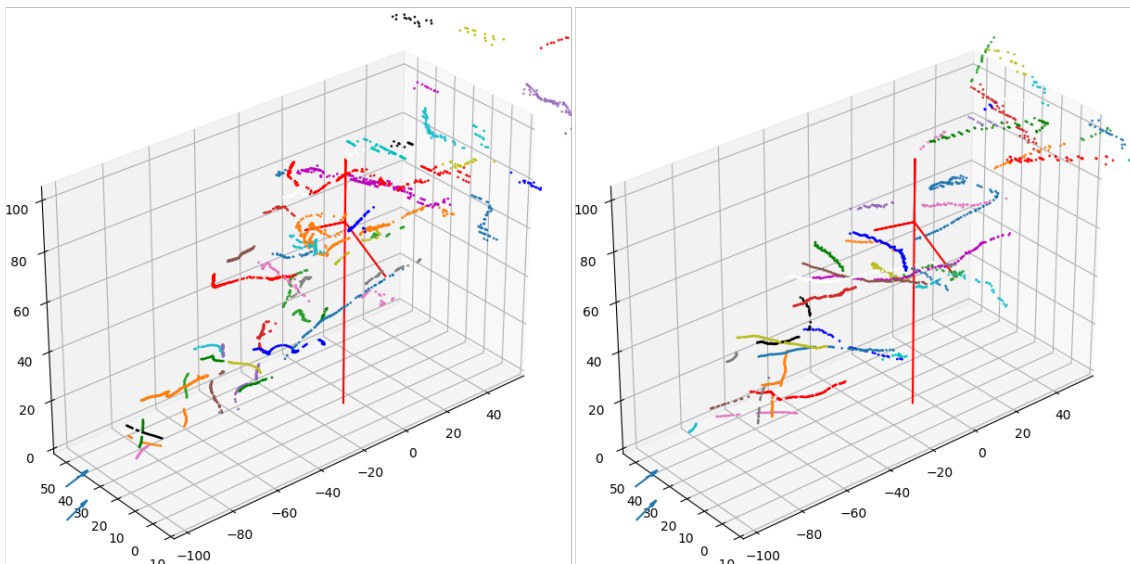


Abb. 78: Die 3D Darstellungen zeigen die nächtlichen Flugbahnen in unterschiedlichen Farben. Als Referenz wurde die WEA (rot) und die am Messmast installierten Kameras (blaue Pfeile) dargestellt.

In Abb. 78 sind die gewonnenen Flugbahnen zwischen 27. und 29.09.2023 zu sehen. Die Flugaktivität war an den verschiedenen Tagen deutlich unterschiedlich verteilt. Die Installation wurde als erster Test im Feld genutzt. Mit Hilfe der gewonnenen Daten wurden in der Folge die Algorithmen zur Flugbahndetektion verbessert und auch die Möglichkeit zur Darstellung der Daten erweitert. Des Weiteren wurden aufgrund der Erkenntnisse auch neue Kamerahalterungen geplant und gebaut, die eine bessere Möglichkeit zur dauerhaften Anbringung ermöglichen (siehe Abb. 79).

3.1.2 Erfassungsjahr 2024

Im Jahr 2024 wurde das System erstmals über die gesamten Sommermonate am Testfeld installiert. Jeder Aufbau erfordert eine 3D Kalibrierung mit der speziell für dieses System

entworfenen Kamera – Kalibriermethode, wobei eine Drohne zum Einsatz kommt, deren bekannter Flugpfad dabei, die genaue Position und Ausrichtung der Kameras im globalen Koordinaten-System zu bestimmen (Happ, Sutor, & Hochradel, 2024).

3.1.2.1 Kalibrierung 2024

In Abb. 79 ist die Installation 2024 der Wärmebildkameras am Messmast Nord-West zu sehen.



Abb. 79: Montage des Wärmebildkamera-Systems am Messmast NW; Quelle: C. Happ, UMIT Tirol.

Zur 3D Kamera-Kalibrierung wird ein Flugpfad mit einer handelsüblichen Drohne abgeflogen (Abb. 80). Die Positionsdaten der Drohne dienen zur 3D Kalibrierung und dessen Validierung, wobei weitere Drohnenflugfäde zur Fehlerabschätzung genutzt werden.

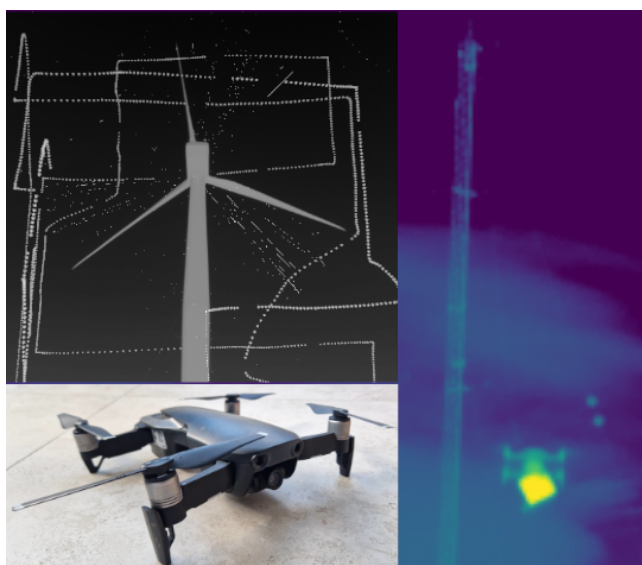


Abb. 80: Kalibrierungsflug mit einer DJI Mavic 2 Drohne; Quelle: C. Happ, UMIT Tirol.

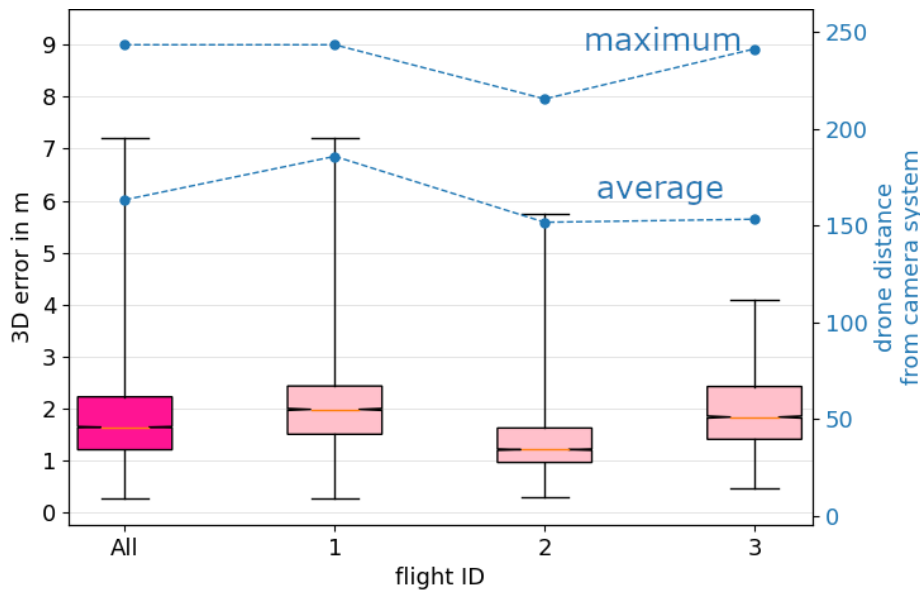


Abb. 81: Kreuzvalidierte Kalibrierengenauigkeiten der Drohnenflüge 2024. Flug 1 wurde beispielsweise zur Kreuzvalidierung mit der Kalibrierung aus den Flügen 2 und 3 rekonstruiert. Das gilt analog für die Flüge 2 und 3.

Die in Abb. 81 dargestellten Fehler ergeben sich durch voneinander unabhängige Drohnenflüge mit einer DJI Mavic 2. Die Fehlerabschätzung der 3D Kalibrierung hilft dabei, die Fehler bei der 3D Lokalisation der Fledermäuse einschätzen zu können. Für die 3D Kalibrierung 2024 beträgt der ermittelte Gesamtfehler unabhängiger Drohnenflüge im Median 1,64 m. Dieser Fehler kann in etwa für die Positionen der Fledermäuse angenommen werden.

3.1.2.2 Datenbasis und Messbereich

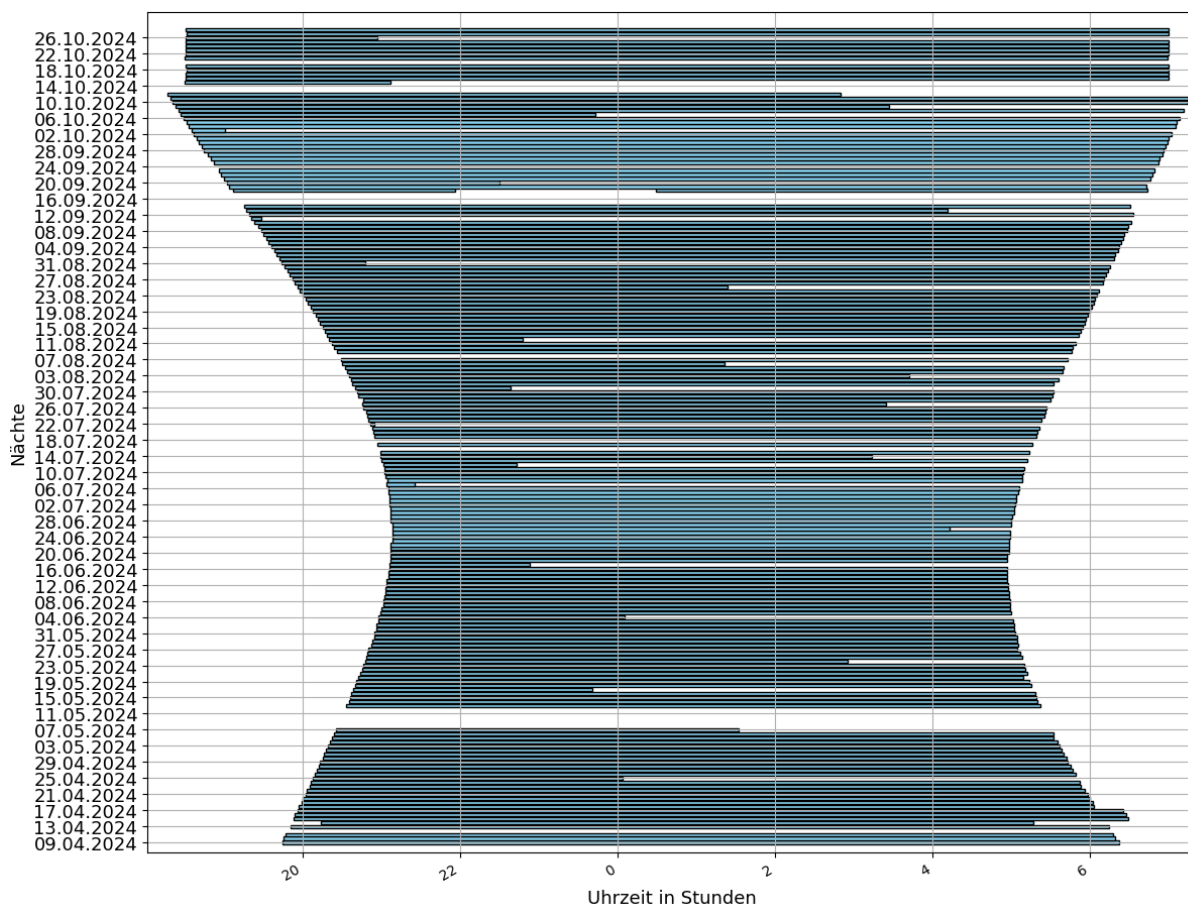


Abb. 82: Aktive Messzeiten während der Nachstunden des Stereo-Wärmebildsystems im Erfassungsjahr 2024. Die fehlenden Bereiche kennzeichnen Ausfälle aus verschiedenen Gründen (z.B. Stromausfall, Festplatte).

Im Jahr 2024 wurde das System von Anfang April bis Ende Oktober fix installiert. Dies stellte den ersten dauerhaften Einsatz im Feld über viele Monate dar. Das System zeichnete in jeder Nacht bis zu 1000 Gigabyte an Bilddaten auf. Diese wurden am folgenden Tag ausgewertet, um die relevanten Flugbahnen-Daten zu extrahieren und damit auch die Datenmenge stark zu reduzieren. Wenn es zu Fehlern bei der Auswertung kam, war die Festplatte aufgrund der hohen Datenmengen schnell vollgeschrieben und es konnten keine neuen Daten aufgezeichnet werden, bis der Fehler über Fernwartung behoben wurde. Dies, zusammen mit Stromausfällen am Testfeld, sind die Gründe für die in Abb. 82 sichtbaren Ausfälle des Systems. Gegen Ende der Saison wurden die Nächte zu lang für die operative Festplatte, dafür wurde mit Begrenzung auf fixe Zeiten eine schnelle Lösung gefunden. Dennoch konnte ein Großteil der vorgesehenen Messzeiten ausgewertet und Erfahrung für die Verbesserung des Systems gesammelt werden.

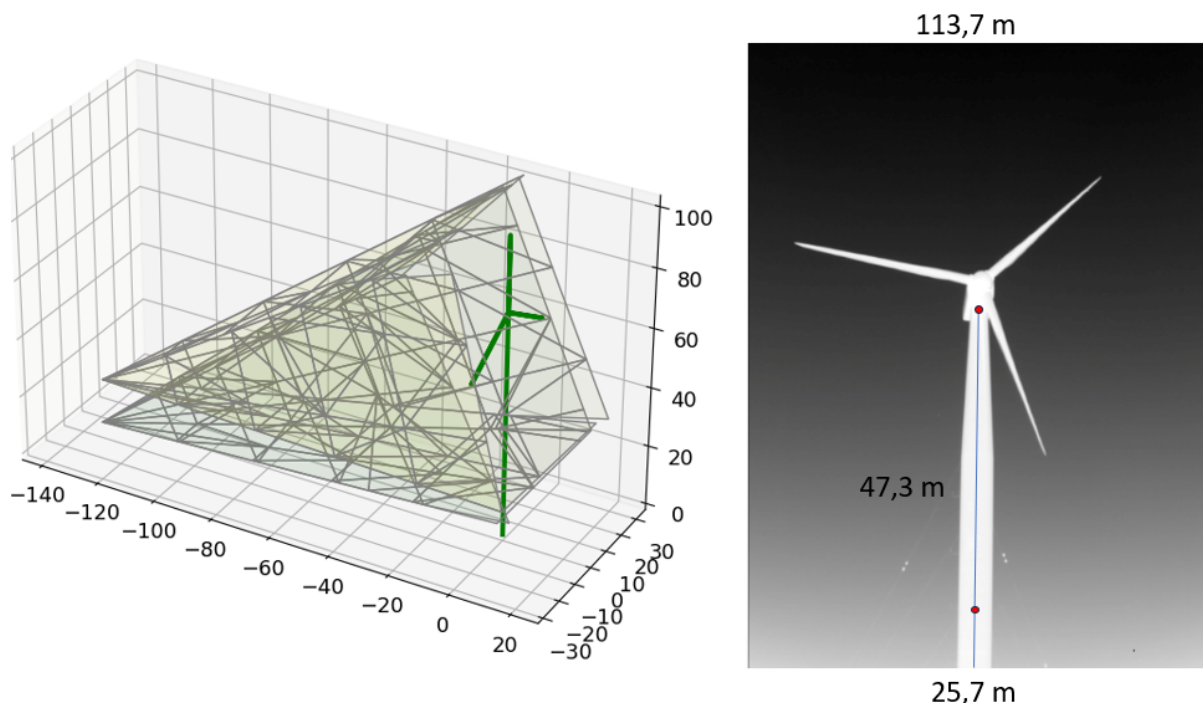


Abb. 83: Sichtfeld der Kameras. Links: Sichtfeld der beiden Kameras bezüglich der nördlichen WEA (grün). Rechts: Falschfarbendarstellung der unteren Wärmebild-Kamera mit eingezeichneten Positionen der Fledermaus-Mikrofone in 35 m und 73 m Höhe (rot). Alle angegebenen Einheiten in Metern.

Aus den Kalibrierungsdaten wurde der Messbereich berechnet und in Abb. 83 dreidimensional dargestellt. Der Messbereich direkt an der Anlage erstreckt sich damit über eine Höhe von etwa 25,7 m bis 113,7 m. Der Ausschnitt beinhaltet also die Mikrofone in 35 m und die der Gondel, das Mikrophon auf 10 m ist nicht im Blickfeld.

3.1.2.3 Flugbahnen

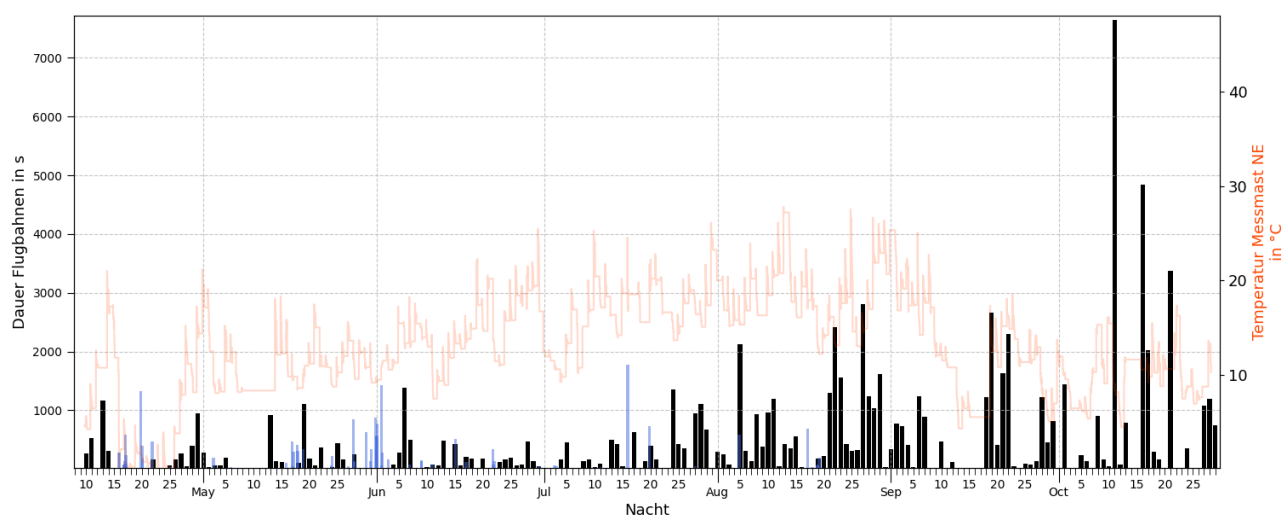


Abb. 84: Summe der nächtlich aufgezeichneten Flugbahnen in Sekunden. In rot sind die jeweiligen nächtlichen Temperaturen dargestellt und in blau ist die Regenintensität angedeutet.

Aus den Daten der 3D Kameras werden 3D Punktwolken gewonnen, aus denen über zeitliche und räumliche Zugehörigkeit Flugbahnen berechnet werden können. Die gesamte Messdauer

in Abb. 82 beträgt 68 Tage 22 Stunden. 22 Stunden 1 Minute dieser Gesamtmesszeit enthalten Flugbahnen (1,3 % der Gesamtmesszeit). Die tägliche Verteilung ist in Abb. 84 dargestellt. In 2 Stunden 9 Minuten dieser Zeiten mit Flugbahn kommt mehr als 1 Flugbahn gleichzeitig vor (9,8 % der Zeit mit Flugbahnen).

Aufgrund der Messzeiten (Nachtstunden) sind vermutlich die meisten Flugbahnen auf Fledermäuse zurückzuführen, eine Zuordnung zur Gattung / Art erfordert allerdings eine zeitgleiche Detektion durch die Akustik, die an der nördlichen WEA installiert ist. Dafür ist es notwendig, dass die Tiere nahe genug an den Mikrofonen vorbeifliegen und deren Rufe detektiert werden. Für eine möglichst sichere Zuordnung wurde das Gondelmikrofon mit Ausrichtung nach unten verwendet. Das nach oben ausgerichtete Mikrofon wies 2024 zu viele Ausfallzeiten auf. Auf diese Weise konnten 15 % der 3D Flugbahnen-Sekunden einer Fledermausart / -gattung zugewiesen werden, die durch das Mikrofon erfasst wurde. Die übrigen Flugbahnen waren zu weit entfernt oder wurden aus anderen Gründen nicht erkannt. Umgekehrt wurden 40 % der vom Mikrofon aufgezeichneten Fledermaus-Sekunden auch vom 3D-Kamera-System detektiert. Diese Zahlen gelten für die gesamte gemeinsame Messdauer 2024 und variieren täglich stark. Die Erkennung der Tiere im Wärmebild wird durch Wolkenhintergrund beeinträchtigt, da diese den Kontrast stark verschlechtern.

Durch die Korrelation der Flugbahnen mit dem Gondelmikrofon können in den folgenden Graphiken und Tabellen auch die art- und gattungsspezifischen Unterschiede betrachtet werden. In Tab. 25 zeigt sich, dass die Gruppen Nnoc, Nyctaloid und Ppip weitaus am häufigsten von beiden Systemen erfasst werden. Auffallend ist, dass die mittlere Geschwindigkeit aller Flugbahnen höher ist als jene der einzelnen Gruppen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass es sehr viele hohe Durchflüge ziehender Arten im Herbst gibt, die durch die Rückenwindunterstützung höhere Geschwindigkeiten aufweisen, während die vom unteren Gondelmikrofon erfassten Tiere meist kein Zugverhalten zeigen.

Tab. 25: Eigenschaften aller 3D Flugbahnen bzw. Art- und Gattungsspezifisch

1) 3D Flugbahnen	2) Dauer in Sekunden / Artspezifischer Anteil in %	3) Mittlere Geschwindigkeit in m/s	4) Durchschnittliche Länge einer Flugbahn in m
5) Alle	6) 79468 s	7) 10,8	8) 47,2
9) Überlappung Akustik	10) 12001 s	11) 7,7	12) 63,3
13) Nnoc	14) 3307 s / 28 %	15) 8,8	16) 55,8
17) Nyctaloid	18) 4240 s / 35 %	19) 8,0	20) 62,1
21) Plecotus	22) 9 s / 0,07 %	23) 6,4	24) 31,7

1) 3D Flugbahnen	2) Dauer in Sekunden / Artspezifischer Anteil in %	3) Mittlere Geschwindigkeit in m/s	4) Durchschnittliche Länge einer Flugbahn in m
25) Pnat	26) 416 s / 3,5 %	27) 9,0	28) 62,7
29) Ppip	30) 3904 s / 33 %	31) 5,6	32) 77,5
33) Ptiief	34) 126 s / 1,0 %	35) 4,7	36) 114,4

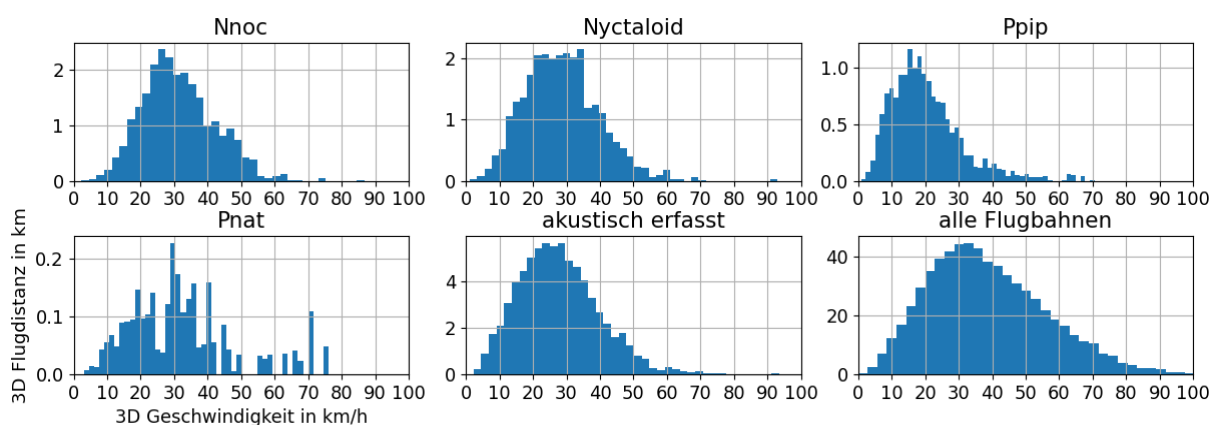


Abb. 85: Verteilung der Fluggeschwindigkeiten aller Flugbahnen und in den einzelnen Gruppen

In Abb. 85 ist die Verteilung der Fluggeschwindigkeiten noch einmal genauer als Histogramm dargestellt. Die y-Achse zeigt dabei die gesamte Flugdistanz und zeigt damit auch die sehr unterschiedliche Datengrundlage, die sich speziell in der Gruppe Pnat zeigt. Individuen der Gruppe Nyctaloid nutzen höhere und auch ein höheres Spektrum an verschiedenen Fluggeschwindigkeiten als beispielsweise Pnat.

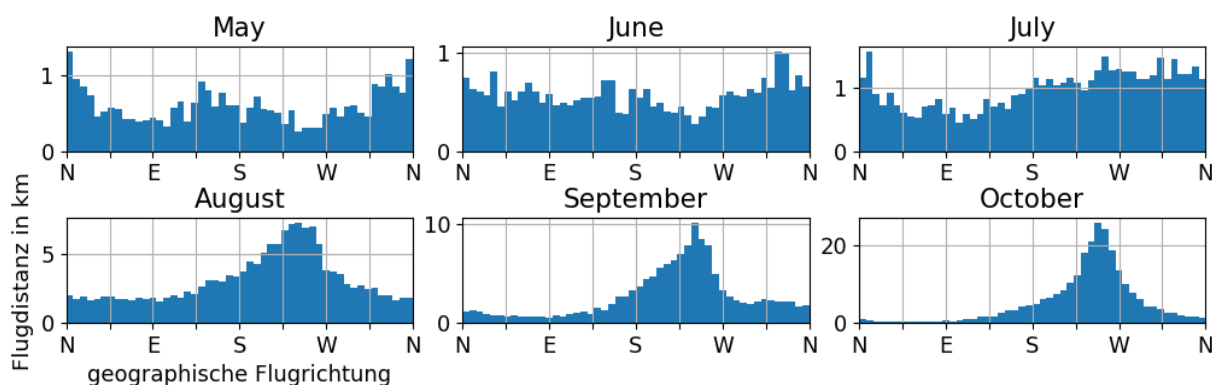


Abb. 86: Gesamtdistanz der Flugbahnen je geographischer Richtung und Monat

In Abb. 86 ist zu erkennen, dass es in den Monaten Mai und Juni eine leichte Präferenz für nördliche Richtungen gibt, während sich im Juli keine besondere Präferenz zeigt. Dies könnte

ein Hinweis auf Zugverhalten im Frühjahr sein. Danach, in den Monaten August bis Oktober, nehmen die Gesamtflugdistanzen stark zu. Außerdem zeigt sich in den Herbstmonaten eine vorherrschende Flugrichtung im Sektor WSW. Dies ist ein starker Hinweis auf Zugverhalten.

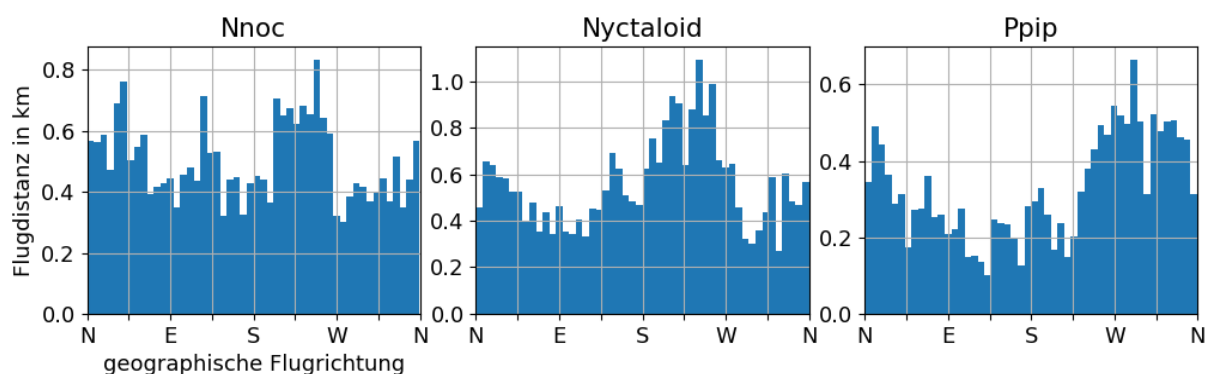


Abb. 87: Gesamtdistanz der Flugbahnen je geographischer Richtung und Art/Gattung

In Abb. 87 sind die Flugbahnen der am häufigsten vorkommenden Gruppen dargestellt. Es sei daran erinnert, dass diese Klassifizierung nur jene Tiere erhalten, die auch nah genug am Gondelmikrophon vorbeigeflogen sind, deshalb ist die Datenmenge weitaus geringer als in Abb. 86. Der Trend im Sektor WSW lässt sich verstärkt bei Nnoc und Nyctaloid feststellen, Ppip weist einen leichten Trend in den Richtungen W bis N auf.

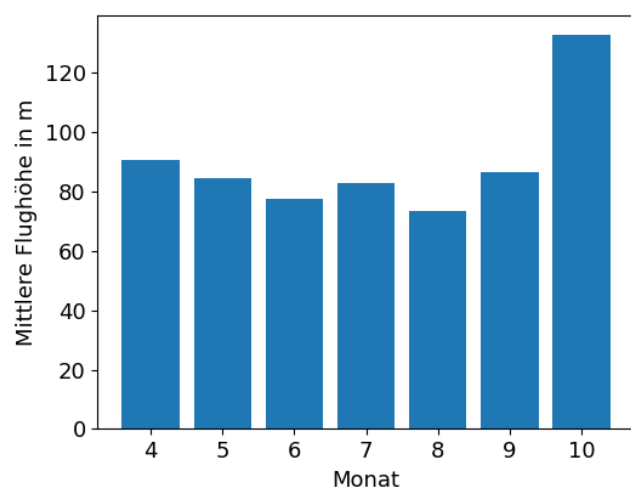


Abb. 88: Mittlere Flughöhe je Monat

Die in Abb. 88 dargestellten Flughöhen sind stark abhängig vom gewählten Messvolumen und auch vom Himmelshintergrund, deshalb sollten sie nicht absolut betrachtet werden. Allerdings fällt auf, dass auch hier der Oktober einen wesentlich höheren Wert aufweist. Dies stützt den Hinweis auf Zugverhalten.

3.1.2.4 Beispiele Flugbahnen

Die folgenden Bilder sollen einen qualitativen Eindruck vermitteln, wie einzelne Flugbahnen aussehen und beispielhaft das Verhalten der Tiere darstellen. Die Farbe der gesamten Flugbahn dient zur Unterscheidung verschiedener Flugbahnen voneinander. Der rote Punkt

markiert jeweils den Anfang einer Flugbahn. Dadurch ist die Flugrichtung der Tiere ersichtlich. Die 3D Graphiken wurden mit Python und Mayavi (Ramachandran, 2011) erstellt. Die Farbe der Flugbahn dient zur Unterscheidung und entspricht der Uhrzeit gemäß dem Farbspektrum „viridis“. Die Windenergieanlage ist ein vereinfachtes Modell, dessen Größe der realen WEA entspricht. Die Drehung der Gondel und die Rotorstellung wurden ebenfalls aus den Wärmebildern rekonstruiert (ausgenommen Abb. 89). Bei allen gezeigten Flugbahnen war die Rotordrehgeschwindigkeit null. Hat sich der Rotor während der Dauer der Flugbahn nur wenige Grad bewegt, dann wurde jener Zeitpunkt gewählt, bei dem das Tier dem Rotorblatt am Nächsten war, sodass die Rotorstellung als repräsentativ angesehen werden kann.

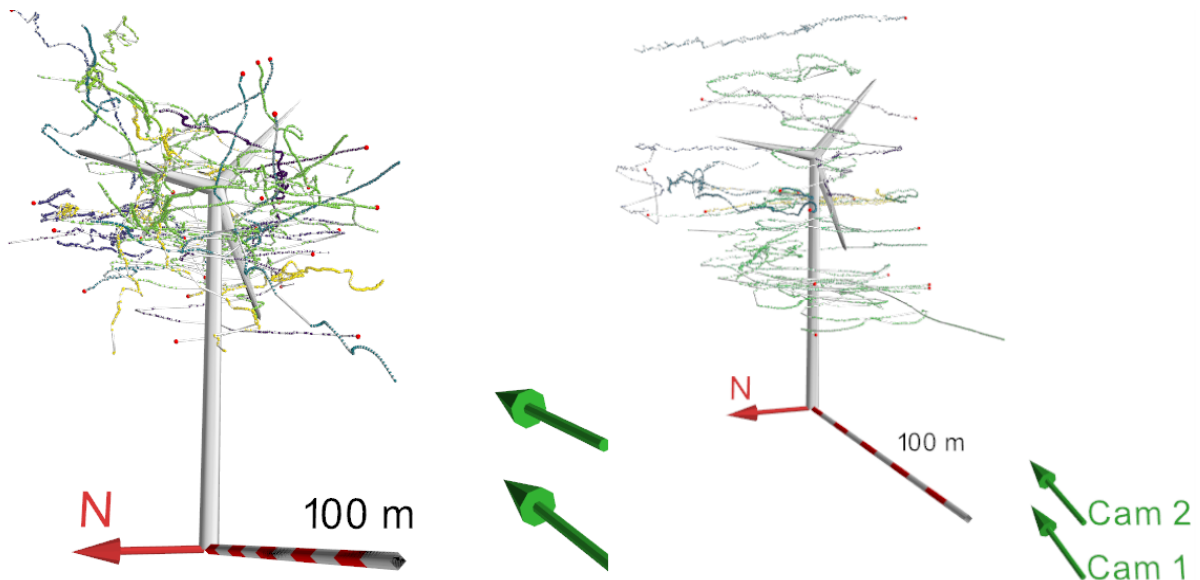


Abb. 89: Längere Flugbahnen (>160 m) von Tieren, die per Akustik als Ppip (links) und Nyctaloid (rechts) erkannt wurden

In Abb. 89 sind längere Flugbahnen der Gruppen Ppip und Nyctaloid zu sehen. Dabei fällt auf, dass die Flugbahnen von Ppip im Allgemeinen mehr Richtungswechsel und engere Radien aufweisen. Im Folgenden werden einzelne beispielhafte Flugbahnen dargestellt.

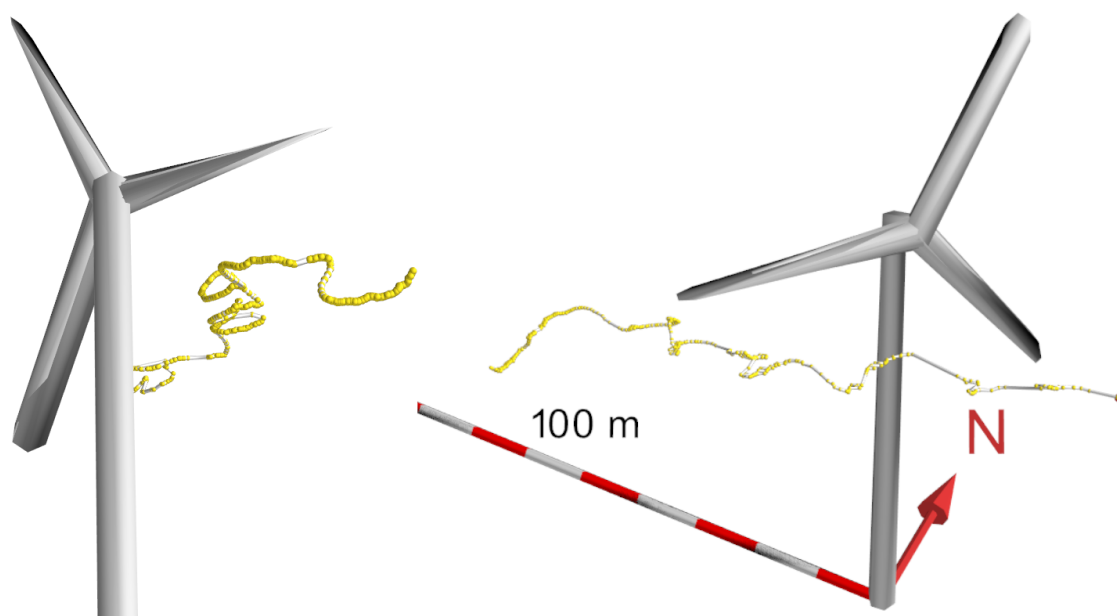


Abb. 90: 3D Flugfad der in Abb. 91 dargestellten Ppip. Im Bild links wurde für einen Vergleich die Blickrichtung der Kamera gewählt, rechts eine frei gewählte Blickrichtung, in der der Flug besser erkennbar ist.

Abb. 90 zeigt den Flugfad einer Ppip. Das Bild links zeigt dabei die Kameraansicht, die in Abb. 91 als Wärmebildaufnahme gezeigt wird (mit akkumulierter Bildsequenz der detektierten Punkte). Im Bild rechts wurde eine aussagekräftigere Ansicht gewählt, die zeigt, dass die Flugbahn eher einem länglichen Vorbeiflug mit entspricht. Dabei sind möglicherweise Flugmanöver erkennbar, die auf Jagdverhalten hindeuten könnten.

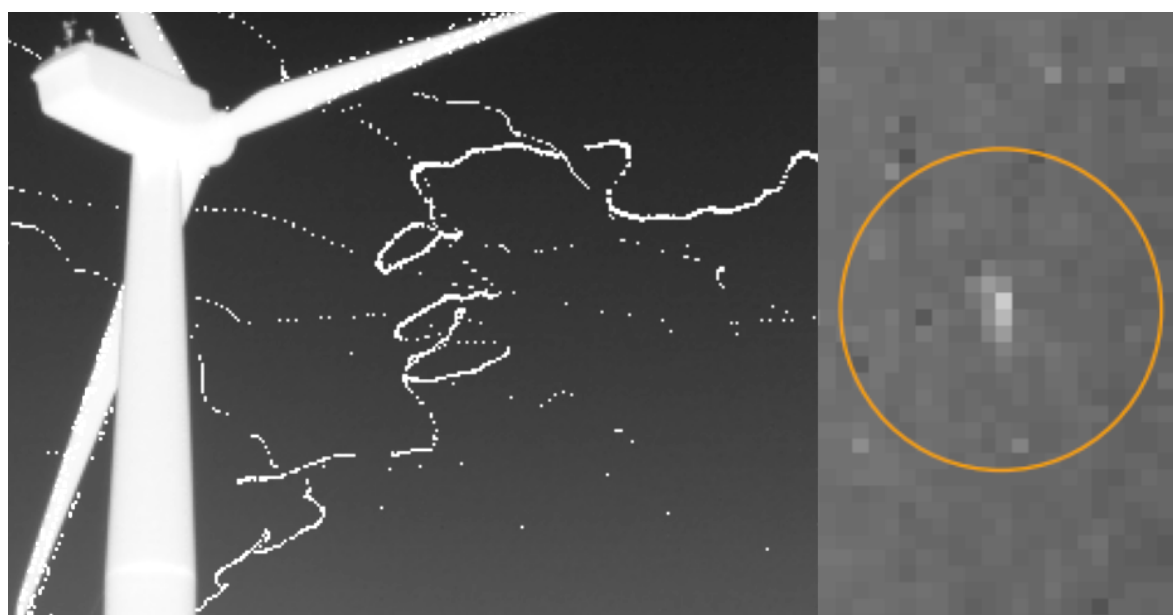


Abb. 91: Flugfad des als Ppip markierten Individuums aus Abb. 90 in einer der Wärmebildkameras (links) und Vergrößerung einer Einzelaufnahme dieser Fledermaus in 73 m Entfernung von der Kamera (rechts).

Rechts in Abb. 91 wird ein vergrößerter und kontrastangereicherter Ausschnitt dieser Flugbahn gezeigt. Darauf ist die Fledermaus in 73 m Entfernung sichtbar.

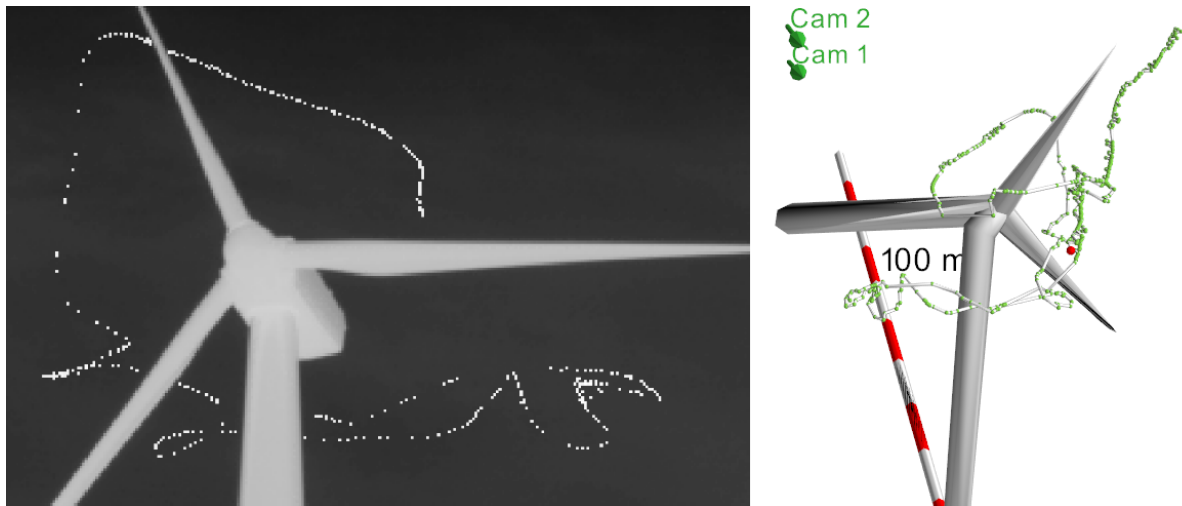


Abb. 92: Als Ppip klassifiziertes Individuum, das möglicherweise Interesse für den Gondelbereich der Anlage zeigt.

In Abb. 92 ist ebenfalls eine Ppip dargestellt, deren Verhalten eine deutliche Interaktion mit der WEA zeigt.

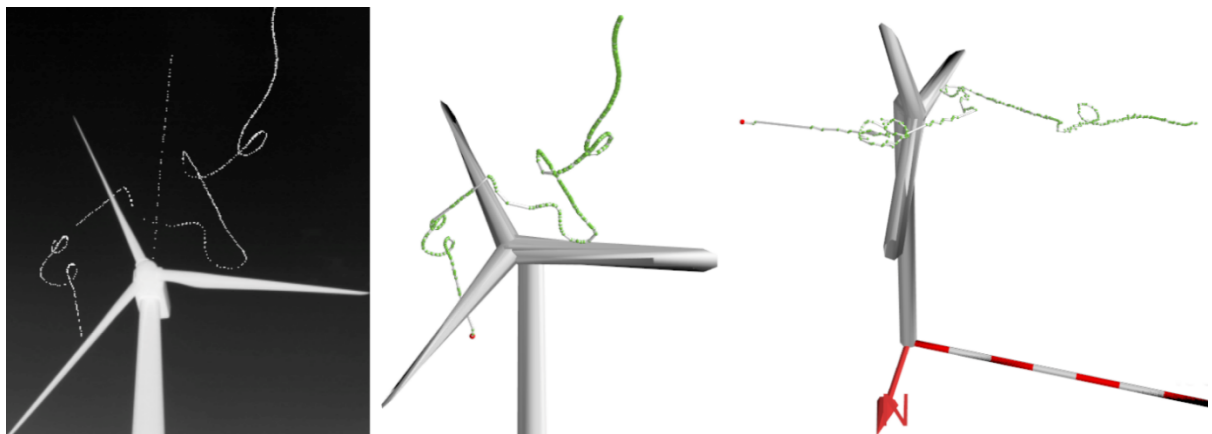


Abb. 93: Als Ppip klassifiziertes Individuum. Links und Mitte aus Sicht der Kamera, Rechts eine Seitenansicht.

Auch Abb. 93 zeigt ein als Ppip klassifiziertes Individuum. Die beiden Kameraansichten (Links und Mitte) deuten dabei auf eine sehr dreidimensionale Flugbahn hin. Die Seitenansicht auf der rechten Seite zeigt, dass die Flugbahn entgegen der ersten Annahme allerdings mehr einem Vorbeiflug entspricht, bei dem das Tier offenbar auch kleine Manöver fliegt. Diese könnten auf Jagdverhalten zurückzuführen sein.

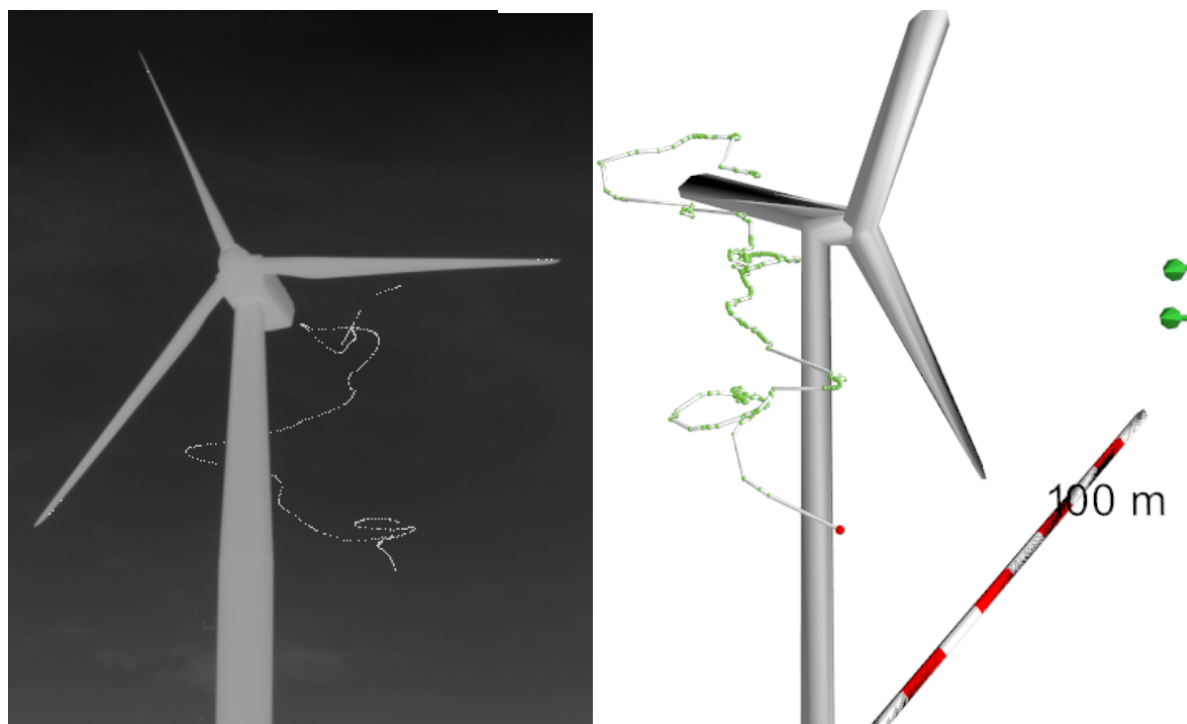


Abb. 94: Als Ppip klassifiziertes Individuum, das nahe an der Anlage an Höhe gewinnt.

Auch Abb. 94 zeigt wieder eine Interaktion mit der WEA. Das als Ppip klassifizierte Tier gewinnt an der Anlage an Höhe.

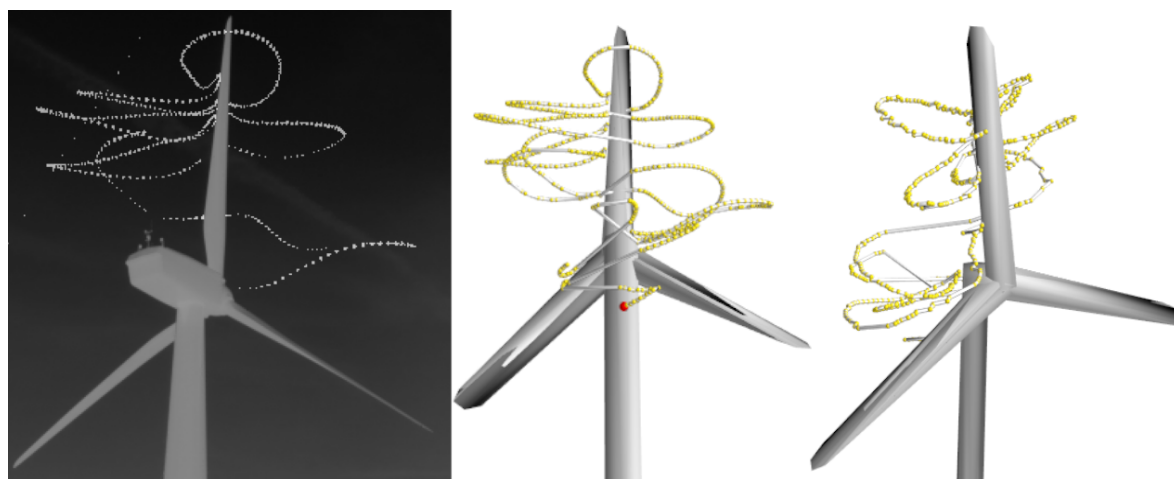


Abb. 95: Als Nyctaloid klassifiziertes Individuum, das sich schleifenförmig an der WEA nach oben bewegt.

In Abb. 95 ist ein als Nyctaloid klassifiziertes Individuum zu sehen, das schleifenförmige Bahnen fliegt und sich dabei sehr nahe an das stehende Rotorblatt heranwagt. Dabei bleibt das Tier entweder auf derselben Höhe oder befindet sich in einem flachen Steigflug. Dieses Verhalten ist ein häufiges Muster der Gruppe Nyctaloid, weitere Beispiele sind in Abb.96 zu sehen, wo vor Allem die beiden oberen und in der Mitte das rechte Beispiel ein ähnliches Muster aufweisen. Die nahen Vorbeiflüge an den stehenden Rotorblättern könnten ein Hinweis sein, dass die Nyctaloide dort Insekten vorfinden. Die anderen Beispiele in Abb.96 (mittlere Zeile links und untere Zeile) könnten auf Hindernisvermeidung zurückzuführen sein.

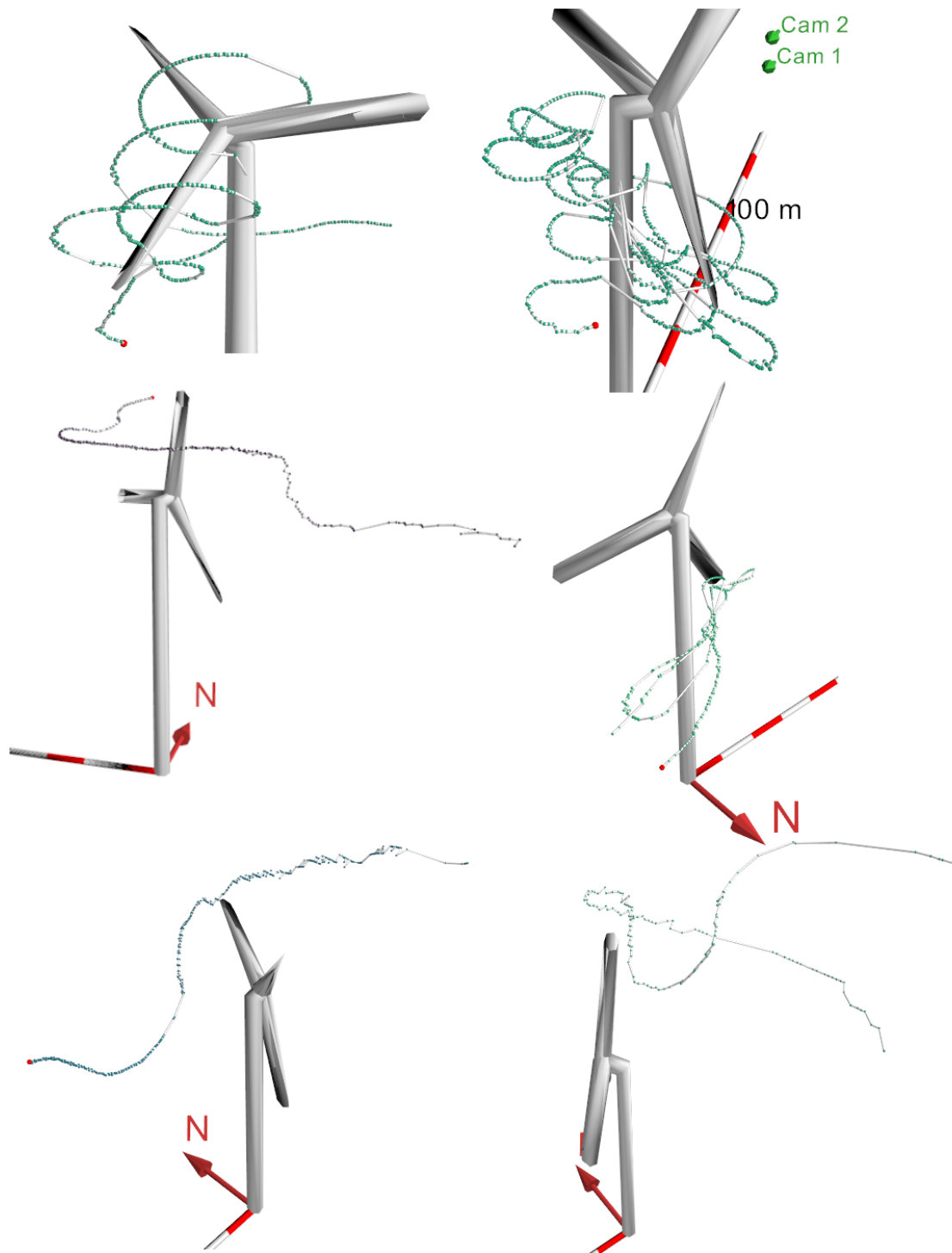


Abb. 96: Weitere Beispiele für Nyctaloid-Flugbahnen (Gruppen Nyctaloid und Nnoc)

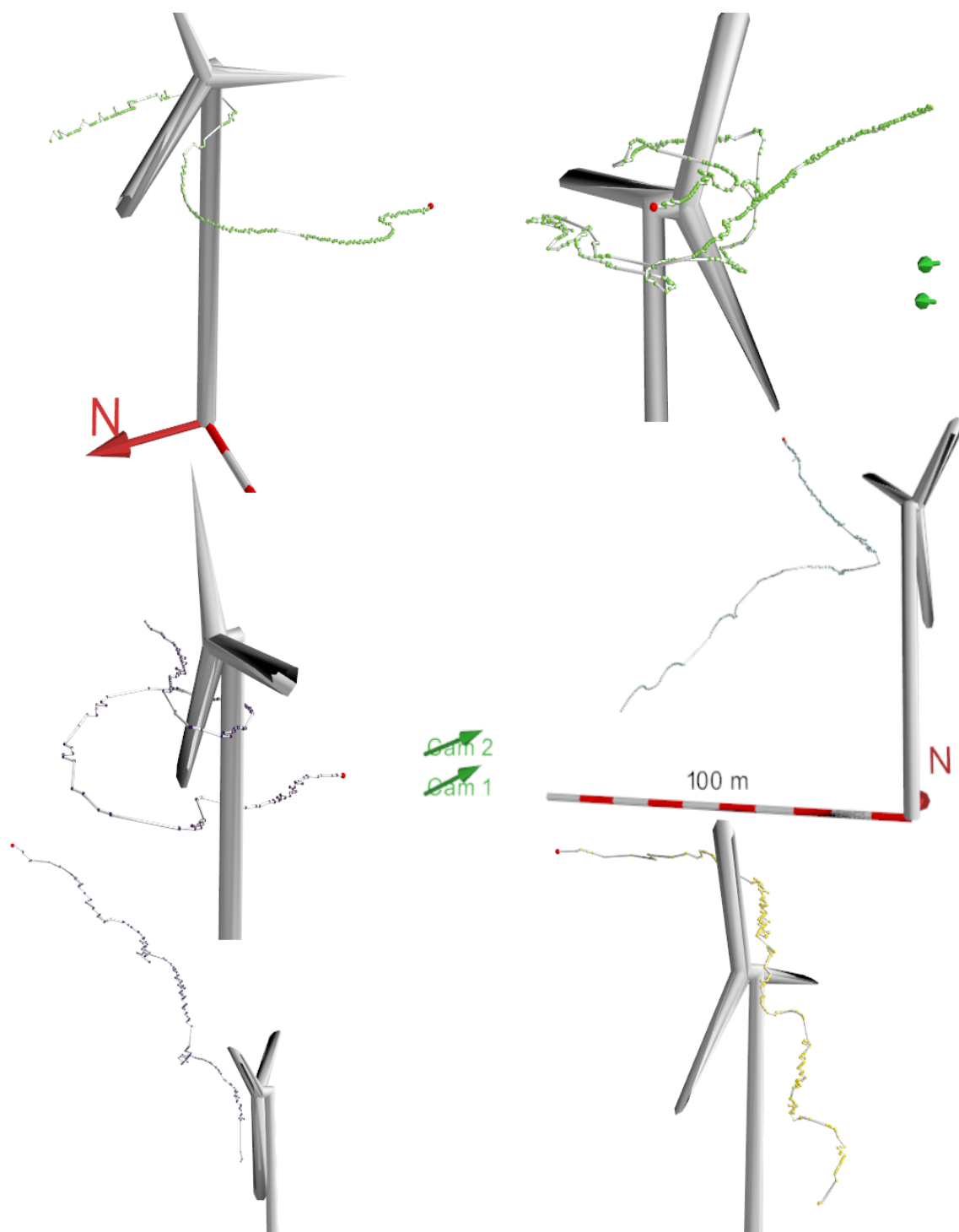


Abb. 96: Weitere Beispiele für als Ppip klassifizierte Tiere.

Die in Abb. 96 dargestellten Flugbahnen wurden als Ppip klassifiziert. Die Flugbahnen enthalten im Vergleich zu denen von Nyctaloiden generell mehr Richtungswechsel. Während Nyctaloide häufiger kreis- und schleifenförmige Muster auf derselben Höhe fliegen, wirken die Flugbahnen von Zwergfledermäusen eher abgehackt und dreidimensional. Dabei sind Sink- und Steigflüge entlang der Anlage erkennbar, sehr richtungswechsel-intensives Flugverhalten in der Nähe des Rotors, möglicherweise vermeidendes als auch interessiertes Verhalten.

3.1.2.5 Korrelation mit Wetterparametern

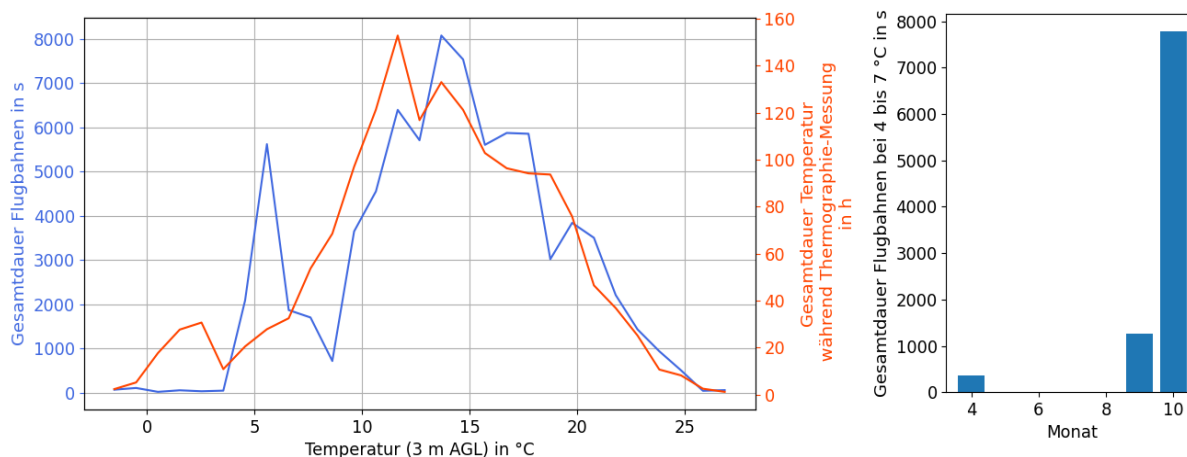


Abb. 97: Flugbahnen - Dauer über die Temperatur (links) und Flugbahnen-Dauer zwischen 4 und 7 °C zur Erklärung des lokalen Maximums.

In Abb. 97 ist die Gesamtdauer der Flugbahnen je Temperatur in blau dargestellt. In Rot ist die Gesamtdauer der Temperaturen im Messzeitraum des Thermographie-Systems dargestellt. Die Verschiebung der Maxima zeigt, dass die Tiere höhere Temperaturen grundsätzlich bevorzugen. Außerdem fällt auf, dass sie erst ab ungefähr 4 °C aktiv werden. Das lokale Maximum bei etwa 6 °C wird hauptsächlich durch die Monate September und Oktober erzeugt, wie in der Graphik rechts erkennbar ist. Daher kann angenommen werden, dass die Toleranz für tiefe Temperaturen in der Zugzeit erhöht ist.

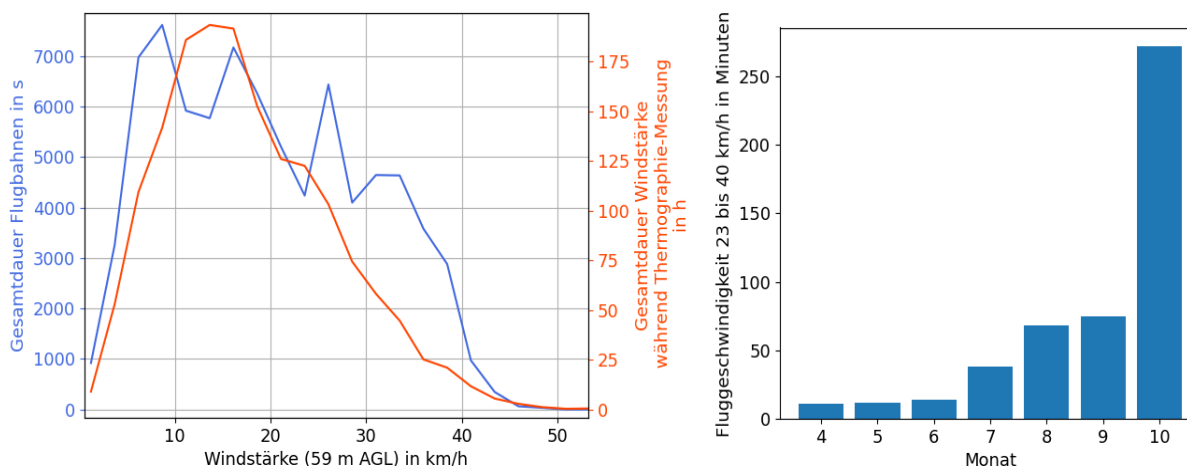


Abb. 98: Flugdauer je Windstärke (blau) und Dauer Windstärke, während des Messzeitraums des Thermographie-Systems (rot).

Die Betrachtung der auftretenden Windgeschwindigkeiten zeigt, dass die Fledermäuse geringere Windgeschwindigkeiten bevorzugen, dies ist an der Verschiebung des Maximums der beiden Kurven in Abb. 98 zu erkennen. Es scheinen aber auch hohe Windgeschwindigkeiten bevorzugt zu werden im Bereich zwischen etwa 23 bis 40 km/h. Ein Histogramm der Dauer der Nutzung dieser Windgeschwindigkeiten in der Abbildung rechts zeigt, dass dies vor Allem

den Oktober und auch den August und September betrifft, was wieder auf das Zugverhalten hindeutet.

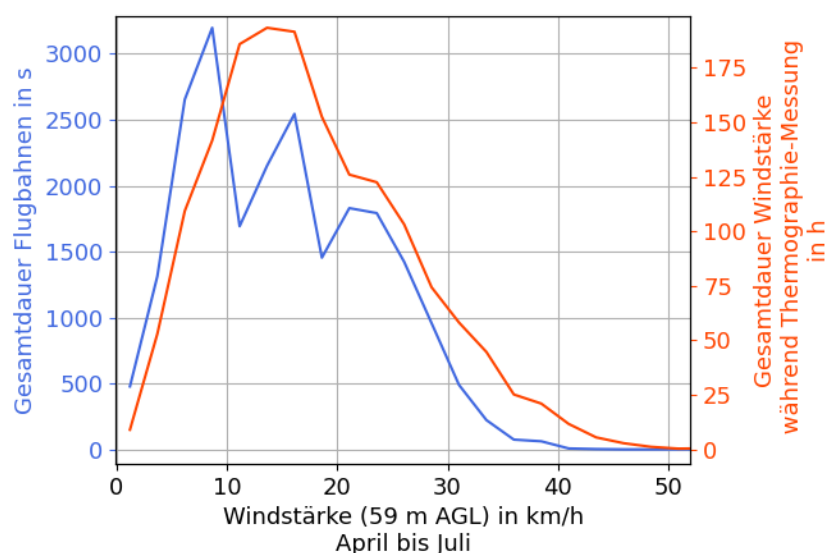


Abb. 99: Flugdauer je Windstärke (blau) und Dauer Windstärke (rot) für die Monate April bis Juli.

Eine Darstellung ohne die Monate August bis Oktober zeigt den Trend zu niedrigeren Windgeschwindigkeiten deutlicher (siehe Abb. 99).

Für die Berechnung der Windunterstützung wurden die Flugbahnen zur Glättung in Abschnitte von 2 Sekunden unterteilt und jeweils das Skalarprodukt ihrer Flugrichtung mit der korrespondierenden Windrichtung gebildet. Diese Werte wurden in Abb. 100 für jede Nacht gemittelt, wobei der Mittelwert über die Länge der Flugbahnabschnitte gewichtet wurde. Damit wurden jene Nächte ermittelt, in denen die Windunterstützung eher groß war.

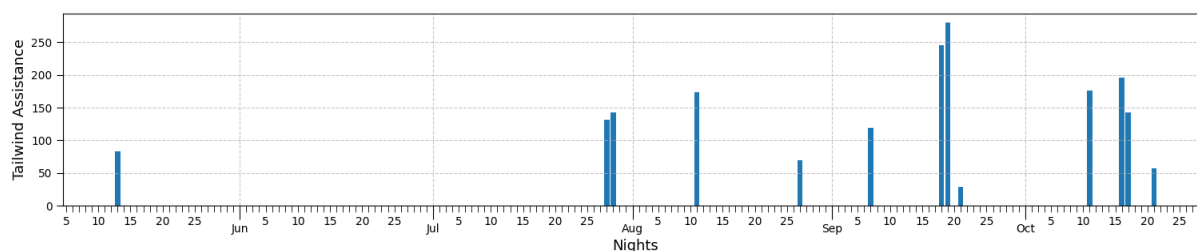


Abb. 100: An diesen Tagen weisen die Flugbahnen eine hohe Windunterstützung auf. Damit ein Tag in dieser Graphik vorkommt, muss die Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 59 m am Messmast NW während der Messzeit der Thermographie-Kameras durchschnittlich mehr als 20 km/h betragen.

3.1.2.6 Attraktionswirkung der WEA auf die Fledermäuse

Um die Frage zu klären, wie stark eine angenommene Attraktionswirkung (P.M. Cryan, 2014; Guest, et al., 2022) der Windenergieanlage auf die Fledermäuse ist, wird aus den Flugbahnen eine Dichteverteilung errechnet und über den radialen Abstand zum Turm aufgetragen. Zur Dichteberechnung werden einerseits die Flugbahnen – Punkte und andererseits definierte Volumina benötigt, die im Sichtfeld der Kameras liegen und dem jeweiligen Abstand zur WEA entsprechen. Außerdem wurde die Auswertung der Attraktionswirkung auf die Höhe der WEA

beschränkt. Nachdem diese dynamisch ist, wurde als Näherung die Höhe der Gondel plus die halbe Rotorblattlänge gewählt, dies sind 85,5 m. Nachdem sich herausgestellt hat, dass die Detektionswahrscheinlichkeit von Fledermäusen stark von deren Entfernung zum Kamerasystem abhängt, wurden zwischen dem Bereich vor der Anlage (den Kameras zugewandte Seite) und dem Bereich hinter der Anlage (den Kameras abgewandte Seite) unterschieden. Das Szenario ist in Abb. 101 dargestellt.

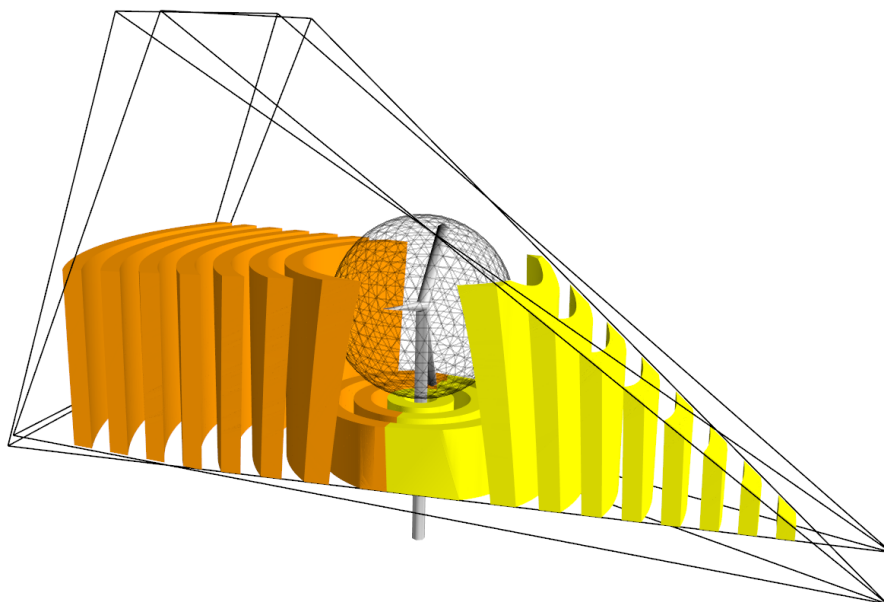


Abb. 101: Radiale Zylinderschalen zur Dichteberechnung vor (gelb) und hinter (orange) der WEA. Jede zweite Zylinderschale ist nicht dargestellt, um die Verständlichkeit der Graphik zu erhöhen. Aus demselben Grund wurden die Zylinderschalen im Bereich der WEA in ihrer Höhe beschränkt. Für die Berechnung werden die 5 m dicken Zylinderschalen mit einer Höhenbeschränkung von 85,5 m verwendet.

Die Schalendicke der verwendeten Volumina beträgt 5 m. Durch das Wissen über die Zugehörigkeit der jeweiligen Flugbahnen-Punkte zu den jeweiligen Schalen kann so eine Dichte für jede oben dargestellte Schale berechnet werden. Das Ergebnis ist in Abb. 102 zu sehen. Die Kurve ist eindeutig von der Detektionswahrscheinlichkeit überlagert, dennoch ist in der Nähe der Anlage eine deutliche Zunahme der Fledermaus-Punkte zu sehen (im Bereich der Rotorblattlänge um 0 auf der x-Achse, die Rotorblattlänge beträgt 25 m). Die sichtbare Lücke entspricht der WEA selbst und den Punkten, die dadurch verdeckt werden.

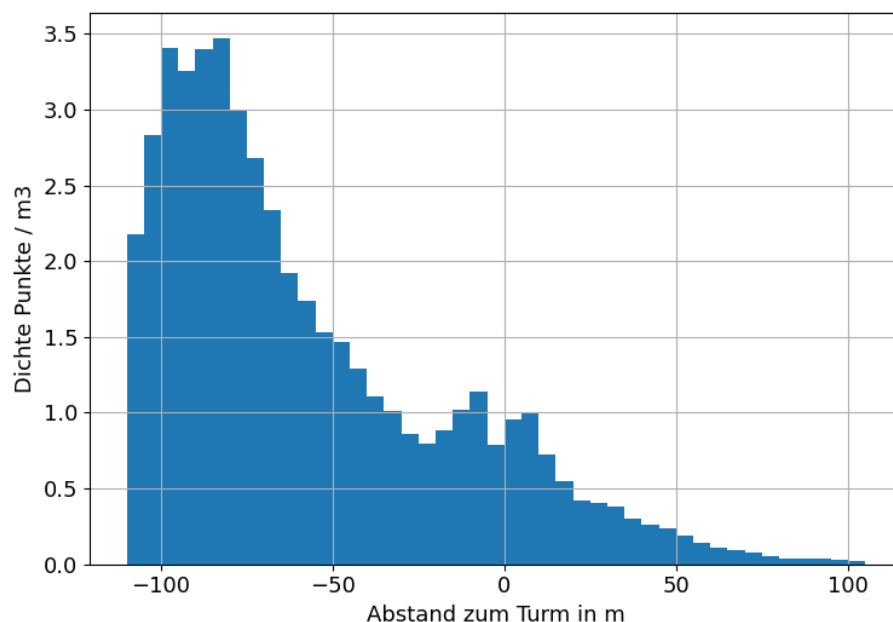


Abb. 102: Dichte der Flugbahnen-Punkte gemäß Abb. 101.

Um den Effekt der Detektionswahrscheinlichkeit genauer zu untersuchen, wurden im selben Gesamtvolumen wie oben Kugelschalen, ausgehend vom gemeinsamen Kamerazentrum, angenommen (Abb. 103).

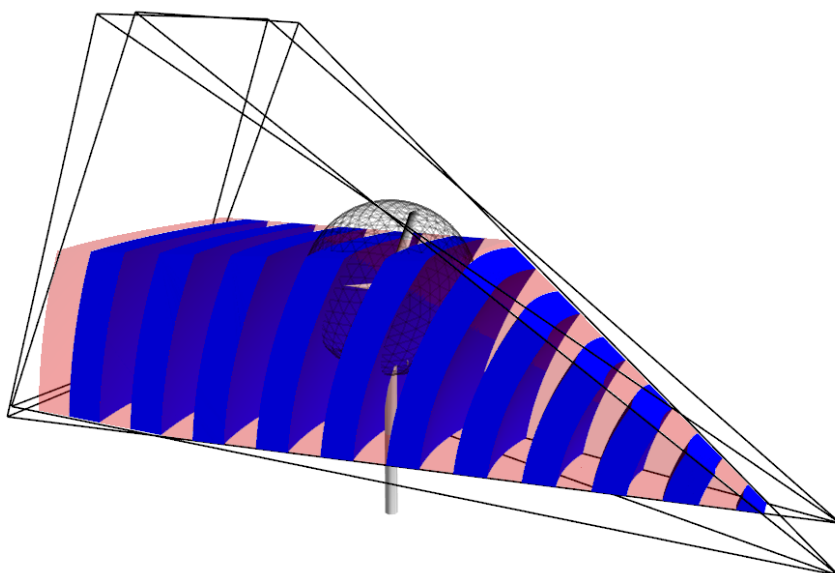


Abb. 103: Kugelschalen im Kamerakegel zur Dichteberechnung.

Daraus ergab sich dann die Dichtefunktion in Abb. 104. Bemerkenswert dabei ist, dass auch bei dieser Kurve, die im Gegensatz zur den Zylinderschalen von vorher keinen räumlichen Bezug zur WEA aufweist, der Effekt der Attraktionswirkung in den Schalen nahe der Anlage (bei etwa 135 m Abstand) dennoch deutlich zu sehen ist. Unter der Annahme, dass außer dieser Attraktionswirkung keine weiteren Besonderheiten im Kamerakegel vorliegen, kann damit

eine Kurve genähert werden, die die Detektionswahrscheinlichkeit im Abstand von den Kameras annähert.

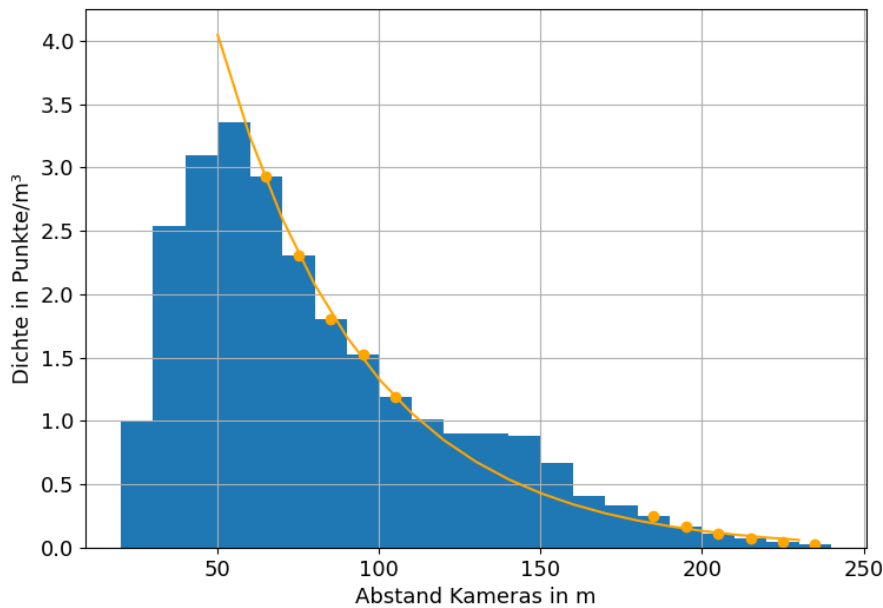


Abb. 104: Dichte der Flugbahnen – Punkte (blau) der jeweiligen Kugelschalen aus Abb. 103

Diese Kurve kann anschließend dazu genutzt werden, um die ursprüngliche Dichtekurve aus Abb. 102 für die Detektionswahrscheinlichkeit zu kompensieren. Dies ist in Abb. 105 dargestellt.

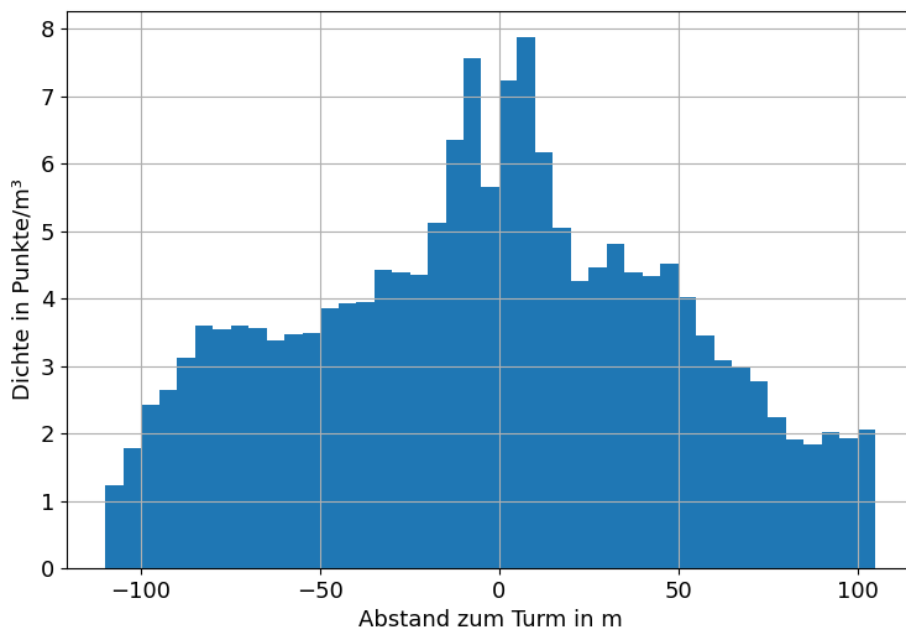


Abb. 105: Für die Detektionswahrscheinlichkeit im Abstand zu den Kameras kompensierte Dichte aus Abb. 102.

Als grobe Näherung kann aus dieser Graphik gelesen werden, dass sich die Dichte der Fledermaus-Punkte zur WEA hin ungefähr verdoppelt. Nachdem die Dichtefunktion nach

Kompensation wieder als einigermaßen symmetrisch angenommen werden kann, kann die Dichte wieder zylindrisch um die Anlage betrachtet werden, ohne den Bereich davor und dahinter zu unterscheiden.

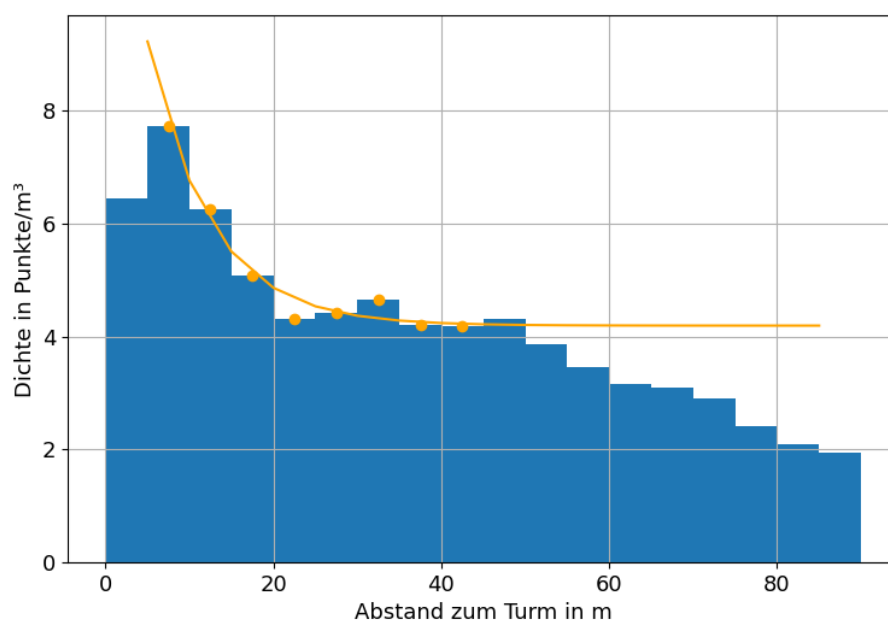


Abb. 106: Kompensierte Dichte und Kurve (orange), die diesen Zusammenhang annähert.

Daraus ergibt sich die Kurve in Abb. 106. Auch hier zeigt sich ungefähr eine Verdoppelung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Tiere zum Turm der WEA hin. Die Abnahme der Kurve im hinteren Bereich wird aufgrund der starken Abhängigkeit von der Kompensationskurve aber unsicher und sollte nicht überbewertet werden.

3.2 Wärmebild-Schlagopfererfassung (AP 4.2)

Die Schlagopferkamarasysteme sind zum Zweck der Schlagopfererkennung von Vögeln und Fledermäusen im Juli 2023 in den beiden Forschungswindenergieanlagen im hinteren Teil des Gondelbodens installiert worden (siehe Abb. 107). Mit diesem, auf zwei Kameras basierenden System soll eine verhältnismäßig kostengünstige Möglichkeit evaluiert werden, dauerhaft Schlagopfer detektieren zu können. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass grundsätzlich neben dem Schlagopfersystem in der Gondel auch das Stereo-Wärmebild-System eine weitere, vielversprechende technische Grundlage bietet, nächtliche Schlagopfer zu detektieren. Dies ist derzeit algorithmisch nicht implementiert, könnte aber perspektivisch genutzt werden. Unabhängig davon würden im Rahmen von NatForWINSSENT-II die Daten des Stereo-Wärmebildsystems parallel untersucht werden, sollte das Schlagopfersystem der nördlichen WEA ein nächtliches Schlagopfer detektieren.



Abb. 107: In der WEA eingebautes Schlagopfersystem: Ansicht Außen (links) und in der Gondel (rechts);
Quelle: C. Happ, UMIT Tirol.

Die Sichtfelder der Systeme in beiden Anlagen sind in Abb. 108 dargestellt. Die Wärmebildkamera deckt dabei eine Fläche von 70 m x 56 m ab, das sind 3920 m², die Tageslicht-Kamera im nahen Infrarotbereich eine Fläche von 80 m x 53 m, das sind 4240 m². Die Kamerasysteme sind grundsätzlich dauerhaft in Betrieb und es wurde eine Möglichkeit geschaffen, jederzeit darauf zugreifen zu können, um Detektionen zu begutachten.



Abb. 108: Sichtfenster der Schlagopferkameras: Tageslicht-Kamera (links), Wärmebildkamera (rechts), WEA Nord (oben), WEA Süd (unten)

Das Prinzip der Schlagopfersysteme beruht darauf, dass Veränderungen in zeitlich aufeinanderfolgenden Bildern auf Basis von Merkmalen analysiert werden. Dabei wird angenommen, dass Schlagopfer auf die Fläche unter der Anlage stürzen und in weiterer Folge ausreichend lange an dieser Stelle liegen bleiben.

Um bei der Tageslicht-Kamera einen möglichst hohen Kontrast zu erreichen, wurde das Prinzip genutzt, wonach intakte Vegetation in den Wellenlängen des nahen Infrarots (ab ca 700 nm) besonders stark reflektiert, während das für die meisten Oberflächen der betrachteten Raubvögel nicht gilt. Dazu wird ein Filter genutzt, der unterhalb dieser Wellenlänge nicht mehr für sichtbares Licht durchlässig ist. Als Nachweis, dass dieses Prinzip funktioniert, wurden Federn der betreffenden Raubvogelarten mit einem Spektrometer untersucht (Abb. 109).

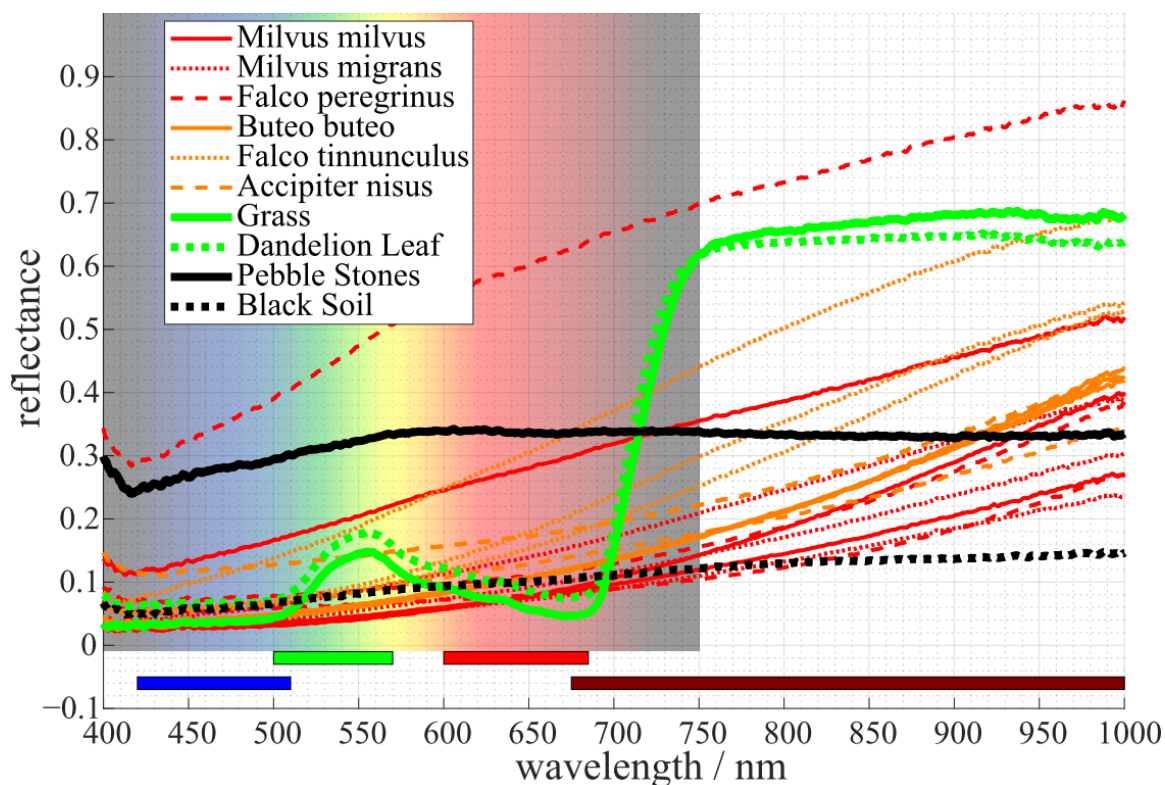


Abb. 109: Vegetation (hier Gras und Blätter) reflektieren äußerst charakteristisch im Bereich des nahen Infrarots (ab ca. 700 nm). Graphik aus (Happ, Sutor, & Hochradel, 2021)

Der dunkelrote Balken unterhalb der Kurven stellt dabei den Bereich des verwendeten nahen Infrarot Filters da.

3.2.1 Abwurftests

Um die Systeme trotz weniger angenommener Schlagopfer validieren zu können, wurden Phantom-Abwurftests durchgeführt. Die ersten Tests erfolgten 2021, als das Kamerasystem auf dem Messmast in etwa 75 Metern Höhe platziert wurde. Sie ergaben eine Sensitivität von etwa 75% für die nächtlichen Aufnahmen mit der Wärmebildkamera und etwa 85% für die Tageslicht-Detektion (Happ, Sutor, & Hochradel, 2021). Die Abwurftests wurden nach der Installation in den WEA erneut durchgeführt. Für die Wärmebild-Kamera wurden Fledermausphantome auf etwa 37 – 40 °C erwärmt und an der nördlichen WEA an unterschiedlichen Orten in der Wiese und an der Kranstellfläche platziert. Das Gras war dabei etwa 10-20 cm hoch. Für die Detektion mit der Wärmebildkamera wurde ein größeres Zeitfenster von 200 Sekunden gewählt, weil frühere Abwurftests mit einem Zeitfenster von 80 Sekunden ergeben hatten, dass dadurch auch z.B. Mäuse detektiert werden, die über diesen Zeitraum ruhig in der Wiese verharren. Innerhalb von mehreren Stunden wurden 14 Phantome ausgelegt, 10 der 14 Phantome (71,4 %) wurden erkannt. Eine Analyse der nicht erkannten Phantome zeigt, dass dabei der Kontrast zur Umgebung nicht ausreichend war. Um die Tageslichtkamera zu testen, wurde wie bereits beim Test in der Entwicklungsphase ein Vogelphantom ausgelegt. Dabei wurden 23 von 26 Abwürfen detektiert (88,4%). Die Ergebnisse aus der vorherigen Projektphase konnten demnach bestätigt werden.

3.2.2 Detektionen seit Einbau im Juli 2023 bis Mai 2025

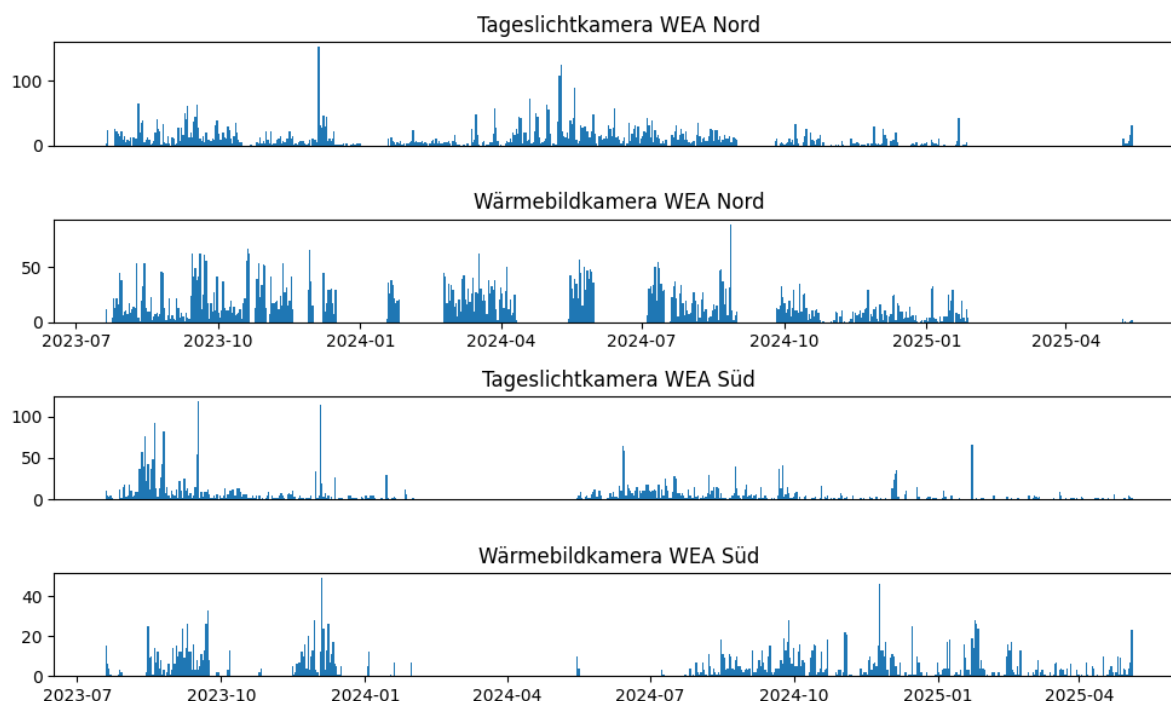


Abb. 110: Detektionen Schlagopferkameras

In Abb. 110 ist die Anzahl der (falsch positiven) Detektionen der Schlagopfersysteme seit Installation in den beiden Gondeln zu sehen. Im Zuge der Inbetriebnahme der WEA waren die Schlagopferkameras nicht zu jeder Zeit mit Strom versorgt. Teilweise gab es auch Netzwerkausfälle und Ausfälle der Wärmebildkamera durch den Dauerbetrieb, der jüngste Ausfall an der WEA Nord ist auf eine leere BIOS-Batterie zurückzuführen (Spätfolge von Stromausfällen). Mit dem Regelbetrieb reduzieren sich die Ausfälle, weil die Stromversorgung grundsätzlich als gegeben betrachtet werden kann. Die Detektionen wurden regelmäßig manuell kontrolliert. Der Großteil der Detektionen hatte eine erkennbare Ursache (z.B. Fußspuren in der Wiese) und lässt sich daher eindeutig als Fehldetektionen klassifizieren, einige wenige Detektionen ließen sich aber nicht eindeutig zuordnen. Dies lag vor allem am bis dahin verwendeten Algorithmus, aufgrund dessen nur ein Bild pro 10 Sekunden verarbeitet und gespeichert wurde, um die notwendigen Zeitfenster von mehreren Minuten in jedem 10 Sekunden – Intervall berechnen zu können. Deshalb, und um eine Datenbasis zur Verbesserung des Algorithmus zu schaffen, wurde dieser im August 2024 angepasst, sodass auch hochfrequente Aufnahmen (10 – 15 Hz) der Detektionen gespeichert werden. Dies ermöglicht eine bessere manuelle Beurteilbarkeit der Detektionen. Die manuellen Auswertungen ergaben dabei bis zum jetzigen Zeitpunkt keinen Hinweis auf ein Schlagopfer. Die hochfrequenten Aufnahmen helfen dabei, die Art der falsch positiven Detektionen besser analysieren zu können.

3.2.3 Falsch positive Detektionen

Im Zeitraum 18.7.2023 – 14.05.2025 (666 Tage) wurden an der WEA Süd mit der Wärmebildkamera 2221 Detektionen, also 3,3 pro Nacht und mit der Tageslicht-Kamera 3329 Detektionen, also 5,0 pro Tag, gezählt. Für die WEA Nord wurden im selben Zeitraum mit der

Wärmebildkamera 7029 Detektionen, also 10,6 pro Nacht und mit der Tageslicht-Kamera 5940, also 8,9 pro Tag, gezählt. Diese falsch positiven Detektionen dienen als Grundlage, das System weiter zu verbessern.

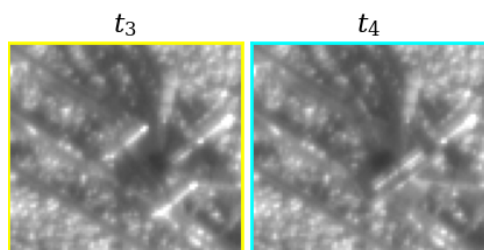


Abb. 111: Eindeutige Fehldetektion der Tageslichtkamera: Ein Kamerasystem, das auf dem Dach eines Baucontainers angebracht ist.

Ein Beispiel für eine manuell feststellbare Fehldetektion der Tageslichtkamera ist in Abb. 111 zu sehen. Dabei handelt es sich um eine Positionsänderung eines Kamerasystems, das auf dem Container der WEA Nord montiert ist. Der dunkle Fleck in der Mitte zum Zeitpunkt t_4 wurde als Detektion interpretiert.

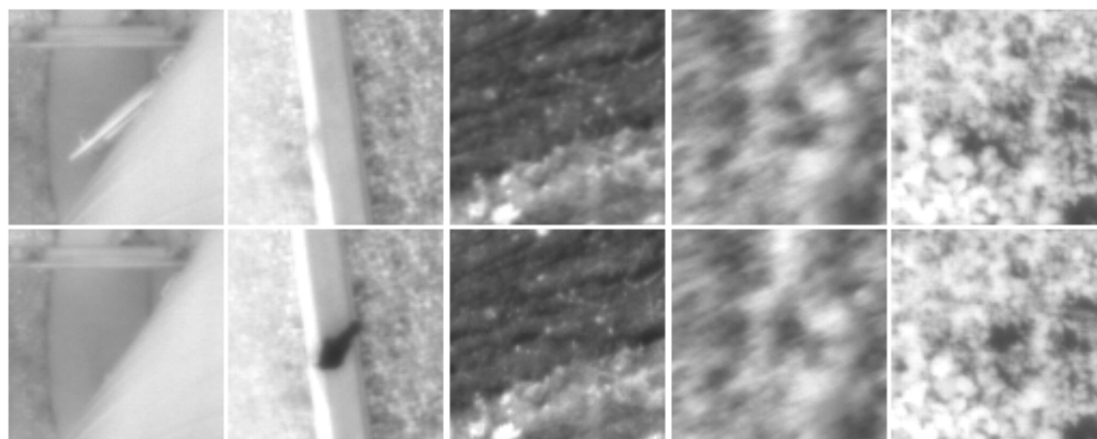


Abb. 112: Falsch positive Detektionen der Tageslicht-Kamera

Weitere Fehldetektion der Tageslichtkamera sind menschliche Fußstapfen im Kies oder Gras, abgestellte Gegenstände, kleinräumiger Schattenwurf, durch Wind bewegtes Gras oder Vögel, die ausreichend lange auf derselben Stelle verharren. Für die Tageslicht-Kamera zeigt sich, dass die falsch-positiven Detektionen sehr unterschiedliche Ursachen haben. Beispiele sind: Spuren von Autos auf der Kranstellfläche, kleinräumiger Schattenwurf von z.B. Büschen, bleibende Veränderungen in der Wiese durch Fußstapfen, Wind sowie Vögel, die ausreichend lange an derselben Stelle verharren (siehe Abb. 112). Jede Spalte zeigt ein Bild vorher (oben) und nachher (unten) einer falsch positiven Detektion. Von links sind die Tür der WEA, ein Vogel, Traktorspuren in der Wiese und zwei nicht näher identifizierbare Fehldetektionen zu sehen.

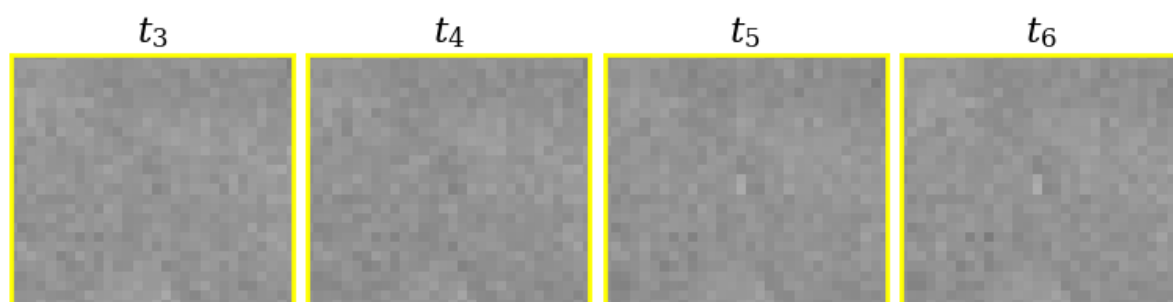


Abb. 113: Nicht eindeutig klassifizierbare Detektion der Wärmebildkamera

Ein Beispiel für eine falsch positive Detektion der Wärmebildkamera ist in Abb. 113 zu sehen. Es zeigt vermutlich eine Feldmaus (Bildzentrum in den rechten beiden Bildern), die ihre Position zuvor mehrfach gewechselt hat, bevor sie mindestens 140 Sekunden auf derselben Stelle verharrt. Es gibt viele eindeutig falsch positive Detektionen, deren Ursache klar ersichtlich ist und wenige, bei denen das nicht der Fall war. Nachdem die WEA aber zur Zeit der unsicheren Detektionen noch nicht in Betrieb war, kann man diese alle als falsch-positiv bewerten. Eine Analyse der Wärmebild-Detektionen zeigt, dass viele Detektionen aufgrund falscher Bildregistrierung auftreten. Diese war dafür gedacht, Gondelbewegungen auszugleichen, führt aber bei kontrastarmen Bildern zu Fehlern, weshalb in der Folge darauf verzichtet wurde, was zu besseren Ergebnissen geführt hat. In Abb. 114 sind Bewegungssequenzen der hochfrequenten Bilder zu sehen. Die Bewegungsmuster der Tiere zeigen dabei eindeutig, dass es sich um falsch-positive Detektionen handelt. Diese Bilder schaffen eine Datengrundlage, um den Algorithmus weiter verbessern zu können.

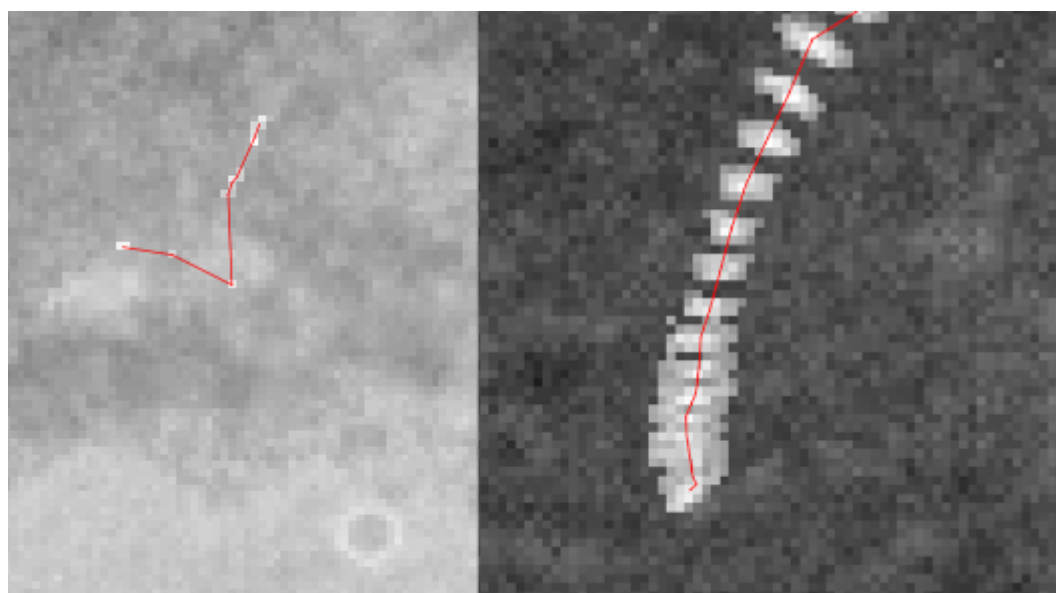


Abb. 114: Bewegungssequenz aus hochfrequenten Aufnahmen von falsch positiven Detektionen. Links im Bild ist ein kleines Tier zu sehen, das sich unregelmäßig in der Wiese bewegt und rechts die Landung eines Vogels.

In der folgenden Projektphase soll getestet werden, ob ein angepasster Algorithmus verwendet werden kann, der auch auf den hochfrequenten Bildern arbeitet und diese wertvolle Mehrinformation nutzen kann. Dazu müssen aber einfachere Berechnungen genutzt werden, die bei dieser Bildfrequenz in Echtzeit funktionieren.

4 Insekten

Sarah Radford, Hendrik Reers und Johanna Grimm

4.1 Einleitung

Eine Hypothese für das Auftreten von Fledermäusen an Windenergieanlagen ist, dass Fledermäuse dort Insekten jagen, die sich im Bereich der WEA aufhalten (Cryan, Barclay 2009). Studien, die zeitgleich die Insektenabundanz und auch die Fledermausaktivität erfassen, sind jedoch rar und mögliche Abhängigkeiten bislang nur wenig untersucht. Ziel dieses Arbeitspakets ist es daher, das Wissen zu Auftretensmustern von Insekten auszuweiten und damit ggf. die Vorhersage von Fledermausaktivitäten an WEA zu verbessern.

In Phase 1 des Vorhabens (vor dem Bau der Windenergieanlagen) konnten erste Zusammenhänge zwischen der Insektenabundanz und Umweltparametern sowie dem Auftreten von Fledermäusen nachgewiesen werden (Musiol et al. 2023). So zeigte sich hinsichtlich bestehender Witterungsbedingungen ein signifikant positiver Zusammenhang der Temperatur mit der Insektenabundanz. Umgekehrt ließ sich nachweisen, dass erhöhte Windgeschwindigkeiten mit einer signifikanten Abnahme der Insektenabundanz verbunden waren. Außerdem konnte gezeigt werden, dass mit zunehmender Erfassungshöhe die Anzahl der nachgewiesenen Insekten signifikant abnahm. Gleiche Korrelationen ließen sich auch für die gemessene Fledermausaktivität nachweisen. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen die wenigen vergleichbaren Studien (De Jong et al. 2019; Trusch et al. 2020), in denen zur Insektenerfassung unterschiedliche klassische Erfassungsmethoden eingesetzt wurden (Saugfalle, Lichtfalle und Klebefalle). Für die Erfassung der Insektenabundanz in Phase 1 fand jedoch eine neuartige Methode Anwendung, die eigens für das Vorhaben entwickelt wurde. Die entwickelte Insektenfotofalle basiert auf einem automatisierten, optischen System, welches Insekten in einem ersten Schritt anlockt und im zweiten Schritt fotografisch erfasst. Die Analogien der Ergebnisse der Vergleichsstudien (De Jong et al. 2019; Trusch et al. 2020) zu den Ergebnissen der Untersuchungen in Phase 1 (Musiol et al. 2023) machen deutlich, dass mit der Insektenfotofalle eine geeignete Methode entwickelt werden konnte, um die Insektenabundanz im Windtestfeld zu erfassen.

In Phase 2 des Vorhabens kommen die Insektenfotofallen weiterhin zum Einsatz, wobei hier die Methode einer automatisierten Auswertung weiterentwickelt und etabliert wurde, um möglichst viele Daten analysierbar zu machen und so die Datengrundlage für die zwei Kernfragen der Untersuchung ausbauen zu können: Welche Faktoren beeinflussen die Insektenabundanz? Welche Zusammenhänge bestehen zwischen der vorherrschenden Insektenabundanz und der Fledermausaktivität? Dabei soll neben dem Einfluss von meteorologischen Parametern im Besonderen auch geprüft werden, ob Unterschiede zwischen den Untersuchungsergebnissen an den Messmasten im Vergleich zu den Windenergieanlagen bestehen.

4.2 Methode

4.2.1 Konzept

Prinzipielles Ziel war es – analog zu Phase 1 – einen Grunddatensatz der Insektenabundanz an den Forschungswindenergieanlagen (FWEA) zu generieren, der im Anschluss mit den vorherrschenden Umweltparametern sowie der gemessenen Fledermausaktivität verschnitten und gesamtheitlich ausgewertet werden kann.

Da zu Beginn (Phase 1) der Untersuchungen zunächst nur zwei Messmasten installiert waren, wurde an diesen Strukturen sowie im Umfeld mit der Beprobung begonnen. Im Rahmen der Untersuchungen in Phase 2 wurden die Erfassungen auf alle vier bestehenden Messmasten sowie die beiden FWEA ausgeweitet. Die Erfassungen im Umfeld (Phase 1) wurden nicht fortgeführt, da hier nur wenig aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden konnten.

Zusätzlich zu den nächtlichen Erfassungen der Insektenabundanz wurden die Untersuchungen in Phase 2 um die Erfassung von tagaktiven Insekten ergänzt, da diese Insekten möglicherweise auch nachts an den Strukturen verbleiben und somit eine Attraktion für Fledermäuse darstellen. Zur Erfassung der tagaktiven Insekten wurden die bestehenden Insektenfotofallen mit farbigen Lockflächen ausgestattet.

Die Untersuchungen zur Insektenabundanz (tagsüber und nachts) wurden – wie in Phase 1 – in direkter räumlicher Nähe zu den Erfassungen der akustischen Fledermausaktivität an den Messmasten bzw. den FWEA durchgeführt. Hierbei wurden wiederum jeweils vier unterschiedliche Erfassungshöhen beprobt (Messmasten: 10m, 35m, 65m und 95m; FWEA: 10m, 35m, 47m und 75m). Insgesamt kamen damit 24 Insektenfotofallen zum Einsatz.

Die Auswertung der durch die Insektenfotofallen gesammelten Daten (Bilder der Lockfläche) erfolgte automatisiert. Dabei wurde auf die Methode der Objekterkennung mittels neuronaler Netze (You Only Look Once - YOLO Netzwerk) zurückgegriffen und ein eigenes Modell trainiert.

Die erfassten Daten mittels Insektenfotofalle wurden außerdem mit den Daten der Radar-Erfassungen aus AP 2 verschnitten, um die jeweils ermittelte Insektenabundanz zu vergleichen und auf Übereinstimmungen zu prüfen.

Zusätzlich zu den quantitativen Erfassungen mit der Insektenfotofalle wurden Untersuchungen an den Rotorblättern der FWEA durchgeführt, um Insekten, die mit den Rotoren der FWEA kollidieren, qualitativ zu erfassen. Zu diesem Zweck wurden DNA-Abstriche von den Rotorblättern gemacht und durch ein externes Labor mit Hilfe von DNA-Barcoding analysiert.

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse aus den Erfassungssaisons 2023 und 2024 vor.

4.2.2 Insektenfotofalle

4.2.2.1 Überblick Optimierung & Neuerungen

Die in Phase 1 des Vorhabens entwickelte Insektenfotofalle wurde für die Erfassungen in Phase 2 optimiert und angepasst. Der grundsätzliche Aufbau (Bauteile und Formfaktor) wurde jedoch nicht verändert, da er sich im Hinblick auf die Witterungsbeständigkeit bereits sehr gut in Phase 1 bewährt hat. In erster Linie betreffen die Änderungen den Anlock-Prozess (Lockfläche, Erfassungsraum, Kamera). So wurde auf die Umgebungskameras und die Erfassung des offenen Luftraums verzichtet, da hier nahezu keine Daten generiert werden konnten. Dadurch konnte die integrierte Lockfläche der Insektenfotofalle verdoppelt werden und umfasst jetzt den gesamten Deckel der Box (Abb. 115).

Wesentlich sind auch die Änderungen, die das Prinzip der Anlockung betreffen. Anstelle einer selbst-leuchtenden UV-Lockfläche (Phase 1) wird nun eine UV-reflektierende Anlockfläche mit UV-Licht beleuchtet, um phototaktische Insekten zu erfassen. Dieses Vorgehen wird zumeist auch bei klassischen Lichtfängen angewendet. Außerdem sollen neben phototaktisch-nachtaktiven Insekten mit der Insektenfotofalle in Phase 2 auch tagaktive Insekten erfasst werden, weshalb die Anlockfläche nun zusätzlich auch farbige ist.

Im ersten Design wurden zwei unterschiedliche Farben gewählt (gelb und blau). Die Farbauswahl erfolgte nach eingehender Literaturrecherche (Diestelhorst et al. 2014; Harris et al. 2017; Westphal et al. 2008) und dem persönlichen Austausch mit Forschenden. Nach weiteren Farbtests im März 2024 wurde die Farbe der Lockfläche nochmal angepasst. Statt der blau-gelb kombinierten Farbfläche wird aktuell nur mit einer einheitlich gelb gefärbten Lockfläche gearbeitet.

Außerdem werden zur optischen Aufnahme der Insekten statt Infrarot-Aufnahmen, die in Grautönen erscheinen, nun Farbfotos erstellt. Allerdings sind Aufnahmen in Farbe nur tagsüber möglich, da hierzu die Beleuchtung mit Weißlicht-LEDs nötig ist. Nachts wird auf die Weißlicht-LEDs bei den Fotoaufnahmen verzichtet, da ein Störungseffekt auf Fledermäuse nicht ausgeschlossen werden kann. Die neu verbaute, hochwertigere Kamera ermöglicht aber auch bei geringerer Beleuchtung eine hohe Bildauflösung. In Summe können dadurch detailliertere Informationen über die erfassten Insekten gesammelt und eine Bestimmung erleichtert werden.

Neben den Änderungen an der Insektenfotofalle sind zudem die geänderten Installationsbedingungen im Vergleich zu Phase 1 zu nennen. An den Windmessmasten bzw. FWEA besteht Internetverfügbarkeit durch eine installierte WLAN-Richtfunkstrecke (WLAN-Router in Kombination mit Richtantennen). Da die Übertragung von Datenvolumina somit nicht mehr limitiert ist, können die durch die Insektenfotofalle aufgenommenen Bilder in voller Größe und Auflösung bereits vorab übermittelt und gesichtet werden.

4.2.2.2 Konstruktion & technischer Aufbau

Die Insektenfotofalle besteht aus einem wasserdichten, rechteckigen Kunststoffgehäuse („Hauptbox“; BOPLA Polycarbonat-Box), das über einen stabilen Edelstahl-Rahmen (Spezialanfertigung durch Herrn Timo Wagenblast; Wagenblast-Technik GmbH) an der jeweiligen Struktur (Messmasten/ FWEA) befestigt wird. Um eine galvanisch getrennte Befestigung an den Messmasten zu gewährleisten, sind am Rahmen Isolierstützer montiert (Abb. 115).

Die Lockfläche der Fotofalle befindet sich auf dem Deckel der Hauptbox. Sie wurde auf Grundlage der Erfahrungen aus der Erfassungssaison 2023/2024 sowie zusätzlicher Methodentests weiter optimiert (Kapitel 4.2.2.3). Die übrige Konstruktion der Insektenfotofalle wurde nicht verändert, sie hat sich im Feldtest gut bewährt. So ist an den schmalen Enden der Hauptbox am Edelstahl-Rahmen ein rechtwinkliger Bügel aus stabilen Aluminiumprofilen angebracht. An diesem Bügel ist eine kleine, ebenfalls wasserdichte Kunststoffbox montiert („Kamera-Box“; BOPLA Polycarbonat-Box). Der Deckel enthält ein Sichtfenster aus Acrylglas, welches wiederum passgenau CNC-gefräst und mit Hilfe eines 1K-Klebers (Sikaflex® 521) verklebt wurde (Abb. 116). Im Deckel der Kamera-Box befinden sich die Kamera (Raspberry Pi Camera Module 3 wide), zwei Weißlicht-LED-Streifen (LED-TECH LT-2983 EcoFlex 500 Flexband (Cool White)) sowie eine UV-LED (LED-TECH LT-4797 Luminus SST-10 UV 390 nm-395 nm Slider). Diese Komponenten sind auf einer 3D-gedruckten Kunststoffplatte befestigt, welche im Deckel verschraubt wurde. Die Komponenten im Inneren der Kamera-Box (Kamera, UV-LED und Weißlicht-LEDs) sind mit der Hauptbox über ein Strom- und Kamerakabel verbunden. Beide Kabel werden wasserdicht und geschützt in einem Gummi-Schlauch geführt, welcher über wasserdichte Kabeldurchführungen in die jeweiligen Kunststoffboxen mündet.

Im Inneren der Hauptbox (Abb. 117) befinden sich ein Raspberry Pi (RPi) Einplatinencomputer (Raspberry Pi 3b V1.2), zwei Relais, drei Spannungswandler und ein Überspannungsschutz. Mithilfe des RPi können alle technischen Komponenten gesteuert werden, sodass neben der

Kamera auch die beiden Relais zur Lichtsteuerung (Weißlicht-LEDs und UV-LED) an den RPi angeschlossen sind. Über die Spannungswandler wird die eingehende 24V-Spannung auf die entsprechend benötigte Spannung heruntergeregelt (Rpi 5,1V, UV-LED 3,1V und Weißlicht-LEDs 9,0V).

In Abb. 115 ist die Konstruktion der Insektenfotofalle schematisch dargestellt und die Komponenten einer im Windtestfeld an einer FWEA installierten Insektenfotofalle erklärt. Abb. 116 und Abb. 117 zeigen die verbauten technischen Komponenten in der Haupt- und Kamera-Box der Insektenfotofalle.

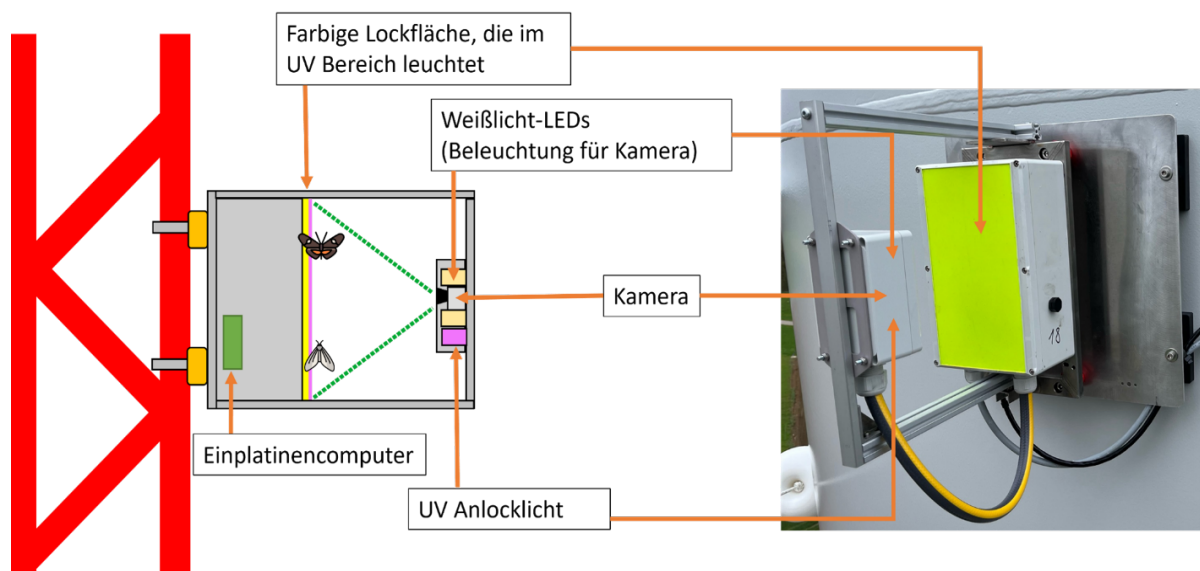


Abb. 115: Konstruktion der Insektenfotofalle. Schematischer Aufbau (links) und Insektenfotofalle (rechts); Quelle (Bild rechts): M. Wigger, ZSW.

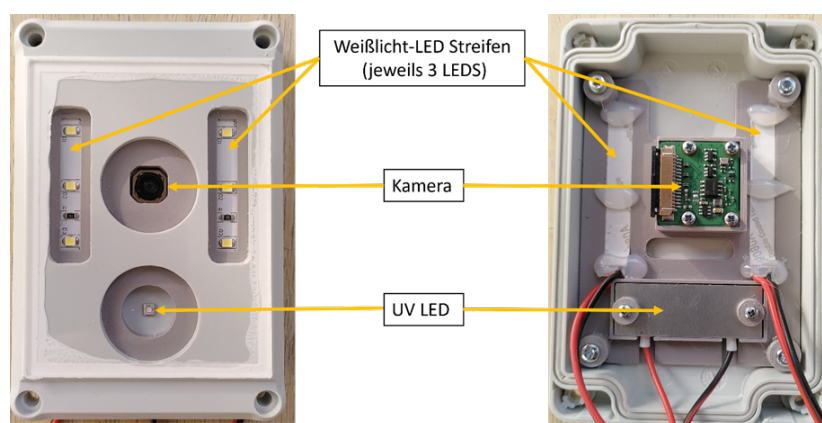


Abb. 116: Komponenten der Kamera-Box. Alle Komponenten (Kamera, Weißlicht-LEDs und UV-LED) sind im Deckel der Kamera-Box verbaut; Quelle: OekoFor.

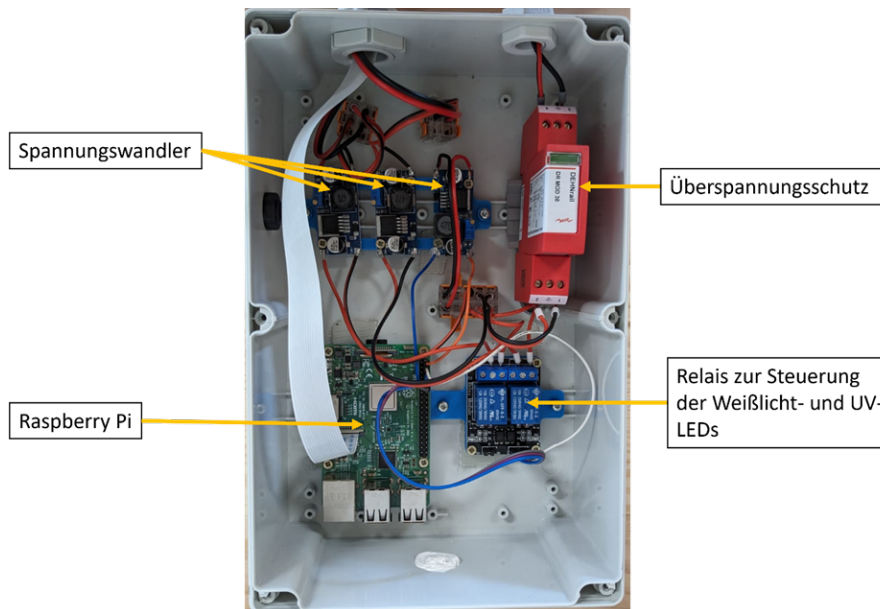


Abb. 117: Innenansicht der Hauptbox der Insektenfotofalle mit den darin enthaltenen Komponenten;
Quelle: OekoFor.

4.2.2.3 Lockfläche

Die Lockfläche der Fotofalle soll tagaktive und phototaktisch-nachtaktive Insekten gleichermaßen anlocken. Ziel ist, dass die Insekten entweder direkt durch die Farbe angelockt werden (tagsüber) oder durch die mit UV-Licht beleuchtete Farbfläche (nachts). Insekten, die sich auf der Lockfläche absetzen, werden dann fotografisch erfasst (Kapitel 4.2.2.4).

Im ersten Design der Lockfläche, das in der Erfassungszeit 2023/2024 zum Einsatz kam, wurde auf dem Deckel der Hauptbox eine zweifarbig (gelb und blau) besprayte Acrylglasplatte verklebt. Im Laufe der Feld-Erfassungen zeigte sich jedoch, dass sich die Acrylglasplatten an den Ecken nach oben bogen und sich an diesen Stellen leicht vom Deckel ablösten.

Für die Erfassungen 2024 wurden diese Erfahrungswerte berücksichtigt und das Lockflächen-Design überarbeitet. Statt auf separaten Acrylglasplatten, wurde die Farbe direkt auf dem fest verschraubten Deckel der Hauptbox aufgetragen. Des Weiteren wurde, anstelle der zweifarbigem Lockfläche im ersten Design, die Lockfläche im überarbeiteten Design einheitlich gelb besprayt (Sparvar Leuchtfarbe 1026) und im Anschluss UV-reflektierender, farblos Acrylharzlack (Sparvar Leuchtfarbe 3108) aufgetragen, sodass die gesamte Fläche im UV-Bereich leuchtet (Abb. 118).

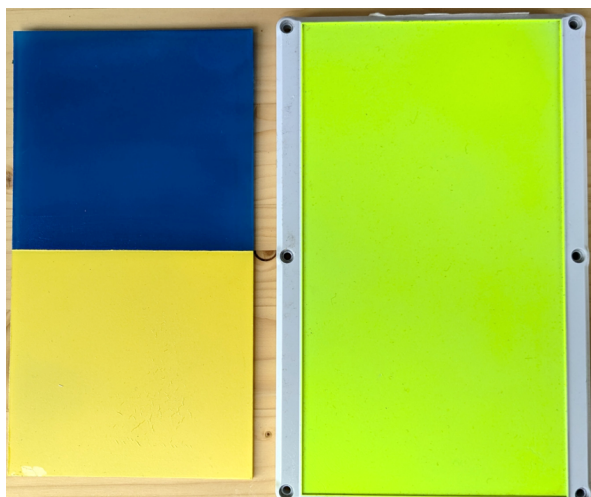


Abb. 118: Die Lockfläche im alten Design (links) und im neuen Design (rechts). Die unterschiedlichen Gelbtöne sind gut erkennbar; Quelle: OekoFor.

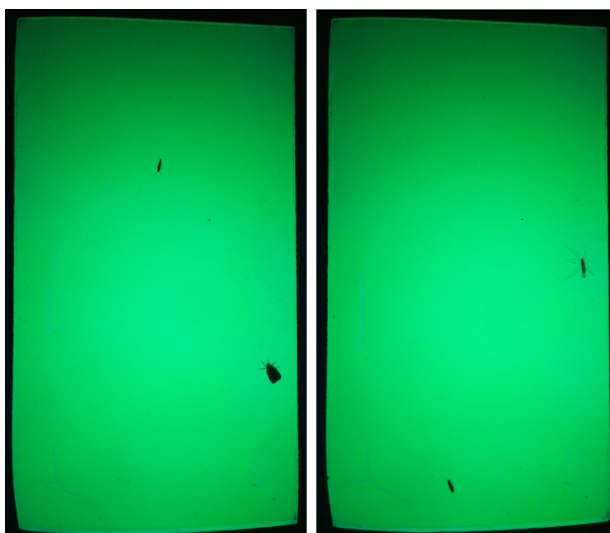


Abb. 119: Methodentest der Insektenfotofalle mit neuem Design (einfarbige Lockfläche). Die hellgelbe Lockfläche erscheint im UV-Licht grünlich. Die angelockten Insekten heben sich gut vor dem hellen Untergrund ab.

Ausblick Anpassungen laufende Erfassungen 2025

Es zeigte sich, dass die verwendete gelbe Sprayfarbe nicht ausreichend UV-stabil war, um einer intensiven Sonneneinstrahlung – wie sie an den Strukturen im Windtestfeld gegeben sind – standzuhalten. Der Gelbton verblasste im Laufe der Erfassungssaison 2024 sehr stark, was einen Austausch der Deckel Anfang August 2024 nötig machte.

Als Konsequenz aus diesen Erfahrungswerten und basierend auf dem Austausch mit anderen Fachleuten, wurden die Deckel für die aktuell laufende Erfassungssaison 2025 erneut überarbeitet. Dazu wurden die Deckel mit einer gelb reflektierenden Fluorfolie (Reflecto Fluorfolie 7510) beklebt, die bei Tageslicht eine besonders hohe Leuchtkraft aufweist und für den Außeneinsatz beworben wird. Diese wird bei der Diopsis-Insektenkamera der Firma Faunabit Meetsystemen (diopsis.eu) ebenfalls erfolgreich verwendet.



Abb. 120: Ausbleichen der gelben Lockfläche im Laufe der Erfassungssaison 2024. Links ist die Lockfläche zum Zeitpunkt der Installation zu sehen, rechts zum Ende der Erfassungssaison; Quelle: OekoFor.



Abb. 121: Lockfläche 2024 und 2025 im Vergleich. Links ist die mit Acrylharzlack besprayte Lockfläche zu sehen. Rechts wurde die Lockfläche mit reflektierender Fluorfolie beklebt. Die beiden Gelbtöne weichen nur geringfügig voneinander ab; Quelle: OekoFor.

4.2.2.4 Funktionsweise & Fernzugriff

Insekten werden in regelmäßigen Intervallen tagsüber sowie nachts angelockt und fotografisch erfasst. Durchgeführte Methodentests mit baugleichen Insektenfotofallen vor Ort in Freiburg sowie die Erfahrungswerte aus der Erfassungssaison 2023/2024 halfen, die Lock- und Erfassungszeiten weiter zu optimieren. So wurde festgestellt, dass sich die Insekten während der Lockphase meist nur kurz auf der Lockfläche absetzten und durch die Fotoaufnahme zu Beginn sowie am Ende der Lockphase häufig gar nicht erfasst wurden. Entsprechend wurden deutlich weniger Insekten optisch erfasst als tatsächlich angelockt wurden. Um die Insektenaktivität besser abzubilden, wurde das Aufnahmeregime im Juni 2024 (09.06.2024) angepasst und im Besonderen die Anzahl der fotografischen Aufnahmen erhöht. Die Auswertung der nun sehr viel größeren Datenmenge wurde durch die Etablierung der automatischen Auswertung ermöglicht (Kapitel 4.2.3).

Die folgenden Angaben entsprechen den Einstellungen der ab Juni 2024 im Windtestfeld installierten Geräte, wobei durch den Fernzugriff Anpassungen der Lock- und Erfassungszeiten jederzeit möglich sind. Zur Erfassung tagaktiver Insekten wird tagsüber (Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang) alle 60 Minuten die Lockfläche für insgesamt 10 Minuten erfasst, wobei jede 10 Sekunden ein Foto von der farbigen Lockfläche erstellt wird. Insekten, die sich auf der

Lockfläche abgesetzt haben, können so aufgenommen werden. Dabei werden Farbfotos von den Insekten erstellt, indem die Weißlicht-LEDs die Lockfläche zusätzlich bei der Fotoaufnahme beleuchten. Für die Erfassung der phototaktisch-nachaktiven Insekten wird nachts (Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang) ebenfalls alle 60 Minuten ein Aufnahmeprogramm gestartet: Die UV-LED wird für eine Dauer von 10 Minuten angeschaltet. Während dieser Lockphase wird, genau wie tagsüber, alle 10 Sekunden eine Aufnahme von der Lockplatte gemacht. Auf diese Weise können angelockte Insekten in hoher zeitlicher Auflösung optisch erfasst werden. Die Weißlicht-LEDs werden nachts nicht eingesetzt, da ein Störungseffekt auf Fledermäuse nicht ausgeschlossen werden kann. Nachts werden die Aufnahmen entsprechend ohne Weißlicht-Beleuchtung gemacht und die Insekten heben sich als dunkle Silhouette vor der UV-Lockfläche ab. Auch wenn Fotos mit Weißlicht-Beleuchtung bei der Bestimmung von Insekten sehr hilfreich sind, da sie die Farben der Insekten wiedergeben, reicht die Qualität der nachts erstellten Fotos, um die Insektenabundanz ableiten zu können. Die schwarzen Umrisse der Insekten heben sich gut vom hellen Untergrund der Lockfläche ab und machen auch Bestimmungen auf Ordnungs-/Gattungsniveau möglich. In Abb. 122 ist die Funktionsweise der Insektenfotofalle schematisch dargestellt.

Die erstellten Bilder werden lokal in voller Datengröße auf der Micro-SD Karte des RPi gespeichert und zusätzlich per Internet auf einen externen Cloud-Server (OekoFor GbR) übertragen. Damit ist eine Sichtung und Auswertung der erstellten Bilder ohne Abbau der Insektenfotofallen möglich.

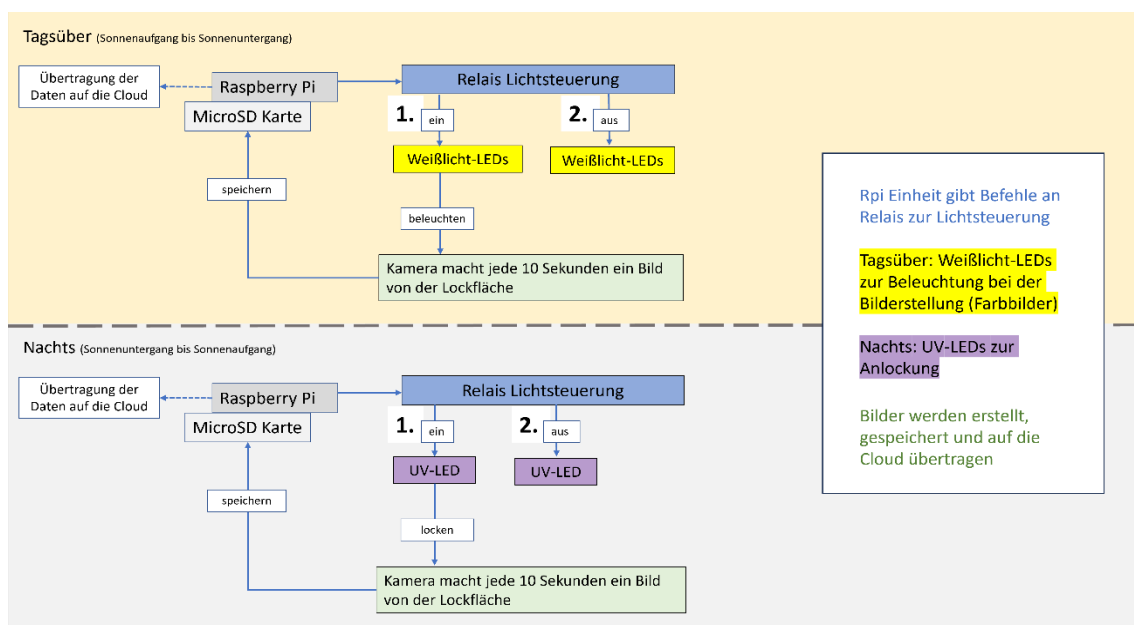


Abb. 122: Schematische Funktionsweise der Insektenfotofalle. Tagsüber (gelb hinterlegt): 1x pro Stunde werden für 10 min alle 10 s Bilder der Lockfläche erstellt und gespeichert. Weißlicht-LEDs beleuchten die Fläche während der Fotoaufnahme, Farbbilder werden erstellt. Nachts (grau hinterlegt): 1x pro Stunde werden für 10 min die UV-LEDs angeschaltet und die Lockfläche beleuchtet. Während dieser Lockphase wird alle 10 s ein Bild der Lockfläche erstellt. Die Aufnahmeregime (Lockzeit und Wiederholungs-Rhythmus) sind per Fernzugriff anpassbar. Die genannten Werte geben die derzeitige Einstellung wieder.

4.2.2.5 Stromversorgung & Internetzugang

Die Geräte werden über die bestehenden Stromanschlüsse an den Windmessmasten bzw. FWEA permanent mit Strom versorgt. Ein Internetzugang im Windtestfeld ist durch die Installation eines Routers (Teltonika: RUTX10) in Kombination mit einer WLAN-Richtantenne (interline:2,4 GHz WiFi Antenne) sichergestellt. An den FWEA wurde eine virtuelle LAN-Verbindung zum nordöstlichen Messmast eingerichtet.

4.2.2.6 Installation

Entsprechend dem Erfassungskonzept wurden 2023 je vier Insektenfotofallen an den zwei Messmasten (NW und NE) in vier unterschiedlichen Höhen (10 m, 33 m, 65 m und 95 m) angebracht. Die Installation der Geräte an Messmast NW erfolgte am 18.07.2023 (SN 001 bis SN 003). Die oberste Insektenfotofalle an Messmast NW (SN 004) konnte an diesem Tag jedoch nicht installiert werden. Erst Mitte Dezember konnte die Insektenfotofalle SN 004 vom ZSW-Team installiert werden. Am 19.07.2023 wurden die Geräte (SN 005 bis SN 008) an Messmast NE angebracht. Die Messmasten SE und SW waren zum Zeitpunkt der Installation 2023 noch nicht abschließend für eine Installation vorbereitet, die Installation erfolgte hier erst 2024.

Die Geräte blieben über die Wintermonate (2023/2024) im Windtestfeld installiert und liefen zuverlässig - auch bei niedrigen Temperaturen – und das Material sowie die Konstruktion erwiesen sich als robust und wetterbeständig (Abb. 123).



Abb. 123: Insektenfotofallen im Windtestfeld während der Wintermonate 2023. Trotz Schnee und Eis blieben die Insektenfotofallen funktionstüchtig; Quelle (Bild rechts): M. Wigger, ZSW).

Die Installation am Messmast SE erfolgte am 19.03.2024 (SN 013 bis SN 016); am 20.03.2024 wurden die Geräte (SN 009 bis SN 012) an Messmast SW installiert (Abb. 124). Im gleichen Zeitraum wurden auch die Lockflächen der bereits installierten Geräte (SN 001 bis SN 008) ausgetauscht und die alten zweifarbigen Acrylglas-Lockflächen mit den neuen einfarbigen Lockflächen ersetzt. Die Insektenfotofallen an den FWEA mussten in unterschiedlichen Höhen zu den Messmasten installiert werden, wobei, sofern möglich, vergleichbare Höhen zu denen vom Messmasten gewählt wurden. Die Installation erfolgte demnach in 10,1 m, 34,1 m und 46,7 m (eine Installation in größerer Höhe ist aus (sicherheits-)technischen Gründen nicht möglich, der Abstand zu den Rotorblattspitzen wäre dann zu gering). Für die Installation am Turm wurden die Insektenfotofallen jeweils mit galvanischer Trennung durch Isolierstützer auf einer Edelstahl-Platte verschraubt und konnten so über einen Starkmagneten außen am Turm

der FWEA befestigt werden (Abb. 124). Das Befestigungskonzept wurde vom ZSW entwickelt. Die Installation am Turm der FWEA S erfolgte am 09.04.2024 (SN 017 bis SN 019); am Turm der FWEA N am 18.04.2024 (SN 021 bis SN023). Die Stromversorgung der beiden FWEA konnte am 30.04.2024 eingerichtet werden, eine Internetverbindung bestand ab dem 06.05.2024. Die Installation der Insektenfotofallen (SN 020 und SN 024) auf der Gondel erfolgte am 30.08.2024 an FWEA S (eine Stromversorgung bestand hier jedoch erst ab dem 26.09.2024) und am 05.09.2024 an FWEA N durch das ZSW (Abb. 124). Da die Insektenfotofallen an vorhandenen fixen Gondel-Strukturen befestigt wurden, muss berücksichtigt werden, dass die Ausrichtung der Insektenfotofalle sich mit dem Drehen der Gondel ebenfalls ändert.



Abb. 124: Installierte Insektenfotofallen im Windtestfeld. Oben links: Insektenfotofalle am Messmasten (Drohnenaufnahme von M. Wigger, ZSW). Oben rechts: Insektenfotofalle auf der Gondel der FWEA. Unten: Insektenfotofalle am Turm der FWEA. Für die Installation am Turm ist die Fotofalle mit Isolierstützer auf einer Edelstahlplatte verschraubt, die mittels Starkmagneten an der Turmoberfläche befestigt wurde; Quellen: M. Wigger, ZSW; T. Aulehla, ZSW (oben rechts).

Einen Überblick über die installierten Geräte an den Messmasten und den FWEA sowie zu deren Installationsdatum gibt Abb. 125.

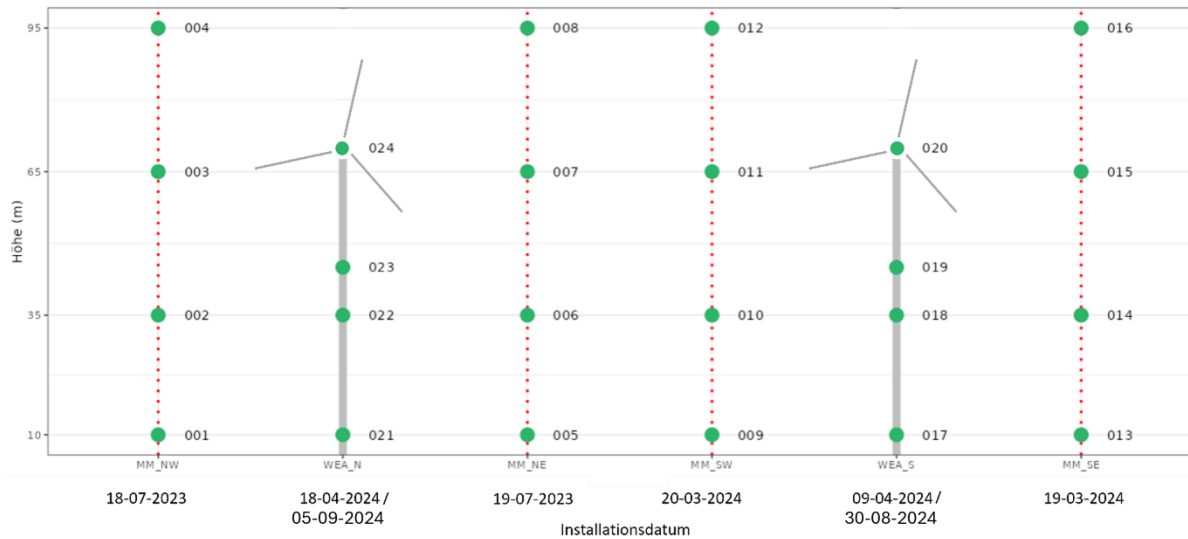


Abb. 125: Überblick der installierten Insektenfotofallen jeweils in vier verschiedenen Höhen an den Messmasten (MW) sowie den FWEA. Es werden vier Höhenklassen unterschieden: Klasse 1 = 10 m Höhe, Klasse 2 = 35 m Höhe, Klasse 3 = 65 m Höhe (Messmast) bzw. 47 m Höhe (FWEA), Klasse 4 = 95 m Höhe (Messmast) bzw. 75 m Höhe (FWEA). Angegeben sind die Seriennummern (SN) der Insektenfotofalle, die in den verschiedenen Erfassungshöhen an den unterschiedlichen Strukturen installiert wurden. Das Installationsdatum ist auf der x-Achse angegeben.

In Abb. 126 sind zwei Luftbilder des Windtestfelds zu sehen auf denen die Lage der Messmasten und FWEA jeweils markiert ist. Damit wird die räumliche Orientierung dieser Strukturen nochmal deutlicher. Außerdem geben die Luftbilder Aufschluss über die landschaftlichen Gegebenheiten vor Ort. Im Westen grenzt ein Wald an das sonst landwirtschaftlich genutzte Gebiet des Windtestfelds. Im Osten befindet sich ein Bauernhof. Deutlich wird zudem auch die Geländestruktur, wobei sich das Windtestfeld auf einer Art Plateau befindet und westlich zum Wald hin stark abfällt.

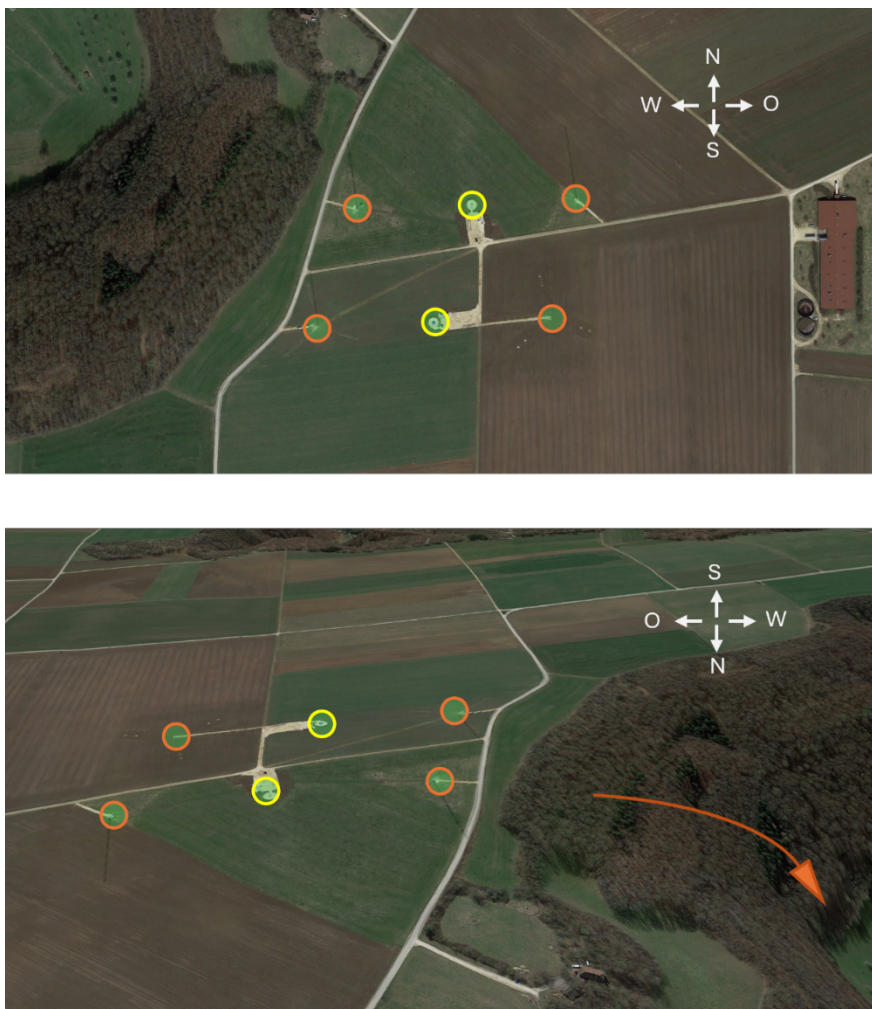


Abb. 126: Luftbilder des Windtestfelds mit den Standorten der Messmasten (orange) und FWEA (gelb). Im oberen Bild ist das Windtestfeld in einer Aufsicht zu sehen; an die westlich gelegenen Strukturen grenzt ein Wald an, östlich befindet sich ein Bauernhof. Im unteren Bild ist das Windtestfeld in einer seitlichen Ansicht zu sehen, wobei hier das Relief der Landschaft zum Teil sichtbar wird und im Besonderen der Wald durch seine starke Hanglage hervorsteht (orangener Pfeil). Quelle: Google Earth

4.2.2.7 Kontroll-App

Zur Funktionskontrolle der Insektenfotofallen wurde eigens für das Projekt eine App entwickelt und programmiert. Das Ziel der App ist es, sich schnell einen Überblick über den Gerätstatus zu verschaffen und Ausfälle einzelner Komponenten (z.B. UV-Licht, Kamera etc.) oder des gesamten Geräts frühzeitig erkennen zu können. Außerdem können für eine erste Sichtung der Daten gezielt einzelne Insektenfotofallen ausgewählt werden, wobei die erstellten Bilder dann in einer Galerie explorierbar sind. Die folgenden zwei Abbildungen (Abb. 127 und Abb. 128) zeigen beispielhafte Auszüge aus der App.

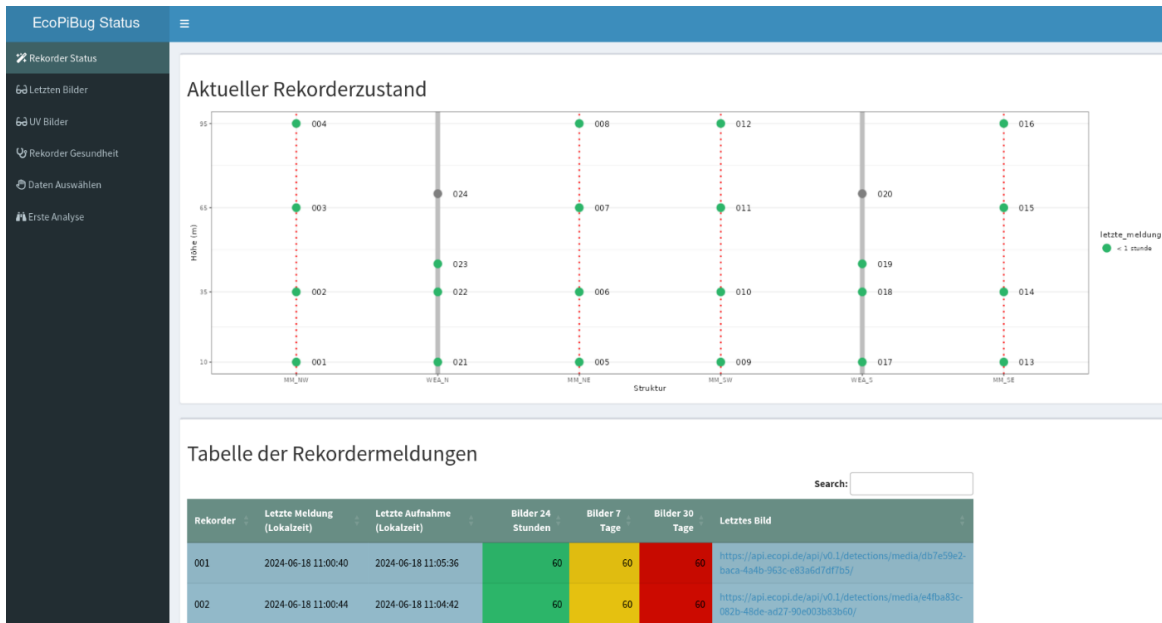


Abb. 127: Kontroll-App „Rekorder Status“. Hier ist in einem Diagramm (oben) der aktuelle Funktionsstatus der installierten Insektenfotofallen via Farbcode dargestellt. Die Tabelle (unten) listet verschiedene Informationen zum Gerätestatus (z.B. letzte Meldung & letzte Aufnahme; Anzahl der Aufnahmen über unterschiedliche Zeiträume).



Abb. 128: Kontroll-App „Letzte Bilder“. Hier werden für jede Insektenfotofalle die letzten Aufnahmen in Form einer Bilder-Galerie dargestellt. Auffälligkeiten bzgl. der Gerätekamera sind hier schnell feststellbar.

4.2.3 Automatisierte Auswertung

Im Fokus unserer Auswertung steht die Insektenabundanz, d.h. die Anzahl an Insekten, die erfasst wird. Folglich ist unser Anspruch an einer automatisierten Auswertung, dass automatisch erkannt wird, ob und wie viele Insekten sich auf der Lockfläche der Insektenfotofalle befinden. Die Klassifizierung von Insekten ist zunächst zweitrangig.

4.2.3.1 Hintergrund & Funktionsprinzip

In den letzten Jahren wurden verschiedene Insektenfotofallen für diverse Fragestellungen entwickelt, samt jeweils einer entsprechenden Auswertungsmethode (Bjerge et al. 2021; Geissmann et al. 2022; Sittinger et al. 2024). Werden viele Bilder von den Geräten generiert, kommen zumeist automatisierte Auswertungsprozesse zum Einsatz. Dabei basieren die Methoden für die Insektenerkennung und -klassifizierung seit 2017 zunehmend auf Deep Learning Verfahren (Amarathunga et al. 2021), einem Teilbereich des maschinellen Lernens (Machine

Learning). Die grundsätzliche Aufgabe dieser Systeme ist die Objekterkennung, d.h. die Fähigkeit, Objekte in Bildern und Videos zu erkennen und zu klassifizieren (Abb. 129).

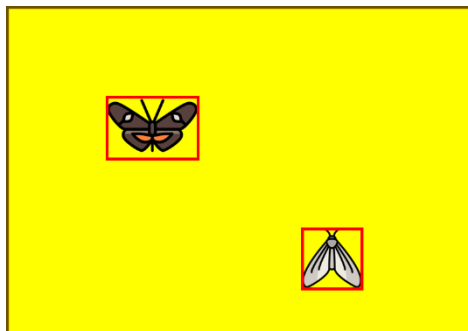


Abb. 129: Schematisches Beispiel einer Bounding-Box. Die räumliche Ausdehnung des erkannten Objekts (hier Insekten) wird durch die Bounding-Box (rot) erfasst.

Für die Analyse wird das Bild in ein Gitter unterteilt. Fällt ein Objekt in eine der Gitterzellen, ist diese Gitterzelle für die Erkennung des Objekts verantwortlich. Dazu bestimmt jede Gitterzelle Bounding Boxes und Bewertungszahl (*confidence scores*). Die Bewertungszahlen geben an, wie sicher sich das Modell ist, dass die Bounding Box ein Objekt beinhaltet und wie genau die Box zum Objekt passt. Befindet sich kein Objekt in der Zelle, ist die Bewertungszahl gleich null. Gleichzeitig wird die Klassenwahrscheinlichkeit für jede Zelle bestimmt. Auf Basis eines bestimmten Grenzwertes trifft der Algorithmus die finale Vorhersage, aus der dann die Detektion unter Angabe der Klassenwahrscheinlichkeit erfolgt. Die Klassifizierungsgenauigkeit kann durch (Re-)Training für den jeweiligen Anwendungsfall entsprechend verbessert werden.

4.2.3.2 Modell-Training

Zu Beginn unserer Modell-Entwicklung wurde durch die Literaturrecherche die Studie von Sittinger et al. 2024 ermittelt, in der selbst entwickelte Fotofallen zur Erfassung von Schwebfliegen eingesetzt wurden.

Im ersten Schritt wurden in Kollaboration mit den Autoren der Studie Max Sittinger und Valentin Stefan – aufbauend auf dem „pre-trained“ YOLOv5-Modell aus Sittinger et al. 2024 – verschiedene Modellversionen zur Analyse der Bilder unserer Insektenfotofalle entwickelt und getestet. Basierend auf diesen Modell-Ergebnissen konnte der Trainingsdatensatz aus unseren eigenen Daten immer mehr erweitert werden, in dem automatische Insektendetektionen (richtig-positive Bestimmungen, d.h. Insekt wird richtig als Insekt erkannt) manuell geprüft und zum Re-Training verwendet wurden. Im letzten Schritt wurde ein YOLOv5 Modell ausschließlich basierend auf unseren eigenen Daten trainiert. Das Modell ist ein „Single Classifier“, d.h. es erkennt nur eine Kategorie von Objekten – in unserem Fall „Insekten“ – eine genauere Klassifizierung findet nicht statt. Die Performance des Modells wurde mit einer zufälligen Stichprobe bestehend aus 4.800 Tag-Aufnahmen und 4.800 Nacht-Aufnahmen (200 Tag-Aufnahmen und 200 Nacht-Aufnahmen pro Fotofalle) manuell geprüft. Die richtig-negative Rate betrug bei Tag-Aufnahmen 99,6 % und bei Nacht-Aufnahmen 99,8 %, d.h. das Modell hat nur sehr wenige Insekten übersehen (0,4 % bzw. 0,2 %). Übersehen wurden hier vor allem Spinnen, die sich auf der Lockfläche befunden haben und nicht als „Insekt“ in den Trainingsdatensatz eingingen. Außerdem wurden sehr kleine Insekten nicht erkannt.

Bei der Analyse zeigte sich, dass das Modell sehr sensibel ist und auch auf ungewollte Veränderungen auf der Lockfläche reagiert (z.B. Vogelkot) sowie Insekten außerhalb der Lockfläche

detektiert (diese werden für unsere Fragestellung nicht gewertet), weshalb der Anteil an richtig-positiven Bestimmungen entsprechend gering ist. Für Tag-Aufnahmen wurde eine richtig-positiv Rate von 8,3 % erreicht, für Nacht-Aufnahmen betrug die richtig-positiv Rate 6,6 %. Um die Anzahl an falsch-positiven Detektionen zu verringern, wurden verschiedene Post-Processing Filter angewendet. Bei der Anwendung der Filter wurde nicht zwischen Tag-Aufnahmen und Nacht-Aufnahmen unterschieden. Alle Aufnahmen wurden einheitlich weiter prozessiert.

Post-Processing Filter

Problematik: Insekten werden außerhalb der Lockfläche erkannt

Post-Processing Filter 1: Zuschneiden des Auswertungsbereichs nur auf die Lockfläche

Um falsch-positive Bestimmungen zu minimieren, die durch detektierte Insekten außerhalb der Lockfläche verursacht werden, wurde der Auswertungsbereich jeweils genau auf die Lockfläche der Insektenfotofalle zugeschnitten (Abb. 130). Detektionen außerhalb dieses Bereichs wurden nicht mehr gewertet.



Abb. 130: Beispiel Post-Processing Filter 1 – Zuschneiden des Auswertungsbereichs auf die Lockfläche.

Problematik: Verschmutzungen auf der Lockfläche werden fälschlicherweise als Insekten erkannt

Post-Processing Filter 2: Objekte, die innerhalb von 10 Minuten konstant erkannt wurden, werden nicht berücksichtigt

Für diesen Filterschritt wurde die Lockfläche in ein Gitter unterteilt mit einer Zellengröße von 30x30 Pixel, das entspricht einer Größe von 5x5 mm in unseren Aufnahmen. Dieses Gitter wurde über die Aufnahmen gelegt und die Detektionen innerhalb eines Tages (24h) analysiert. Detektionen, die für länger als 10 Minuten (das entspricht einem Aufnahmeblock innerhalb einer Stunde, siehe Kap. 4.2.2.4) konstant an einer Stelle auftraten, wurden aus dem Datensatz entfernt, da hier davon ausgegangen werden konnte, dass es sich um nicht bewegliche Objekte und ergo nicht um Insekten handelt (Abb. 131).

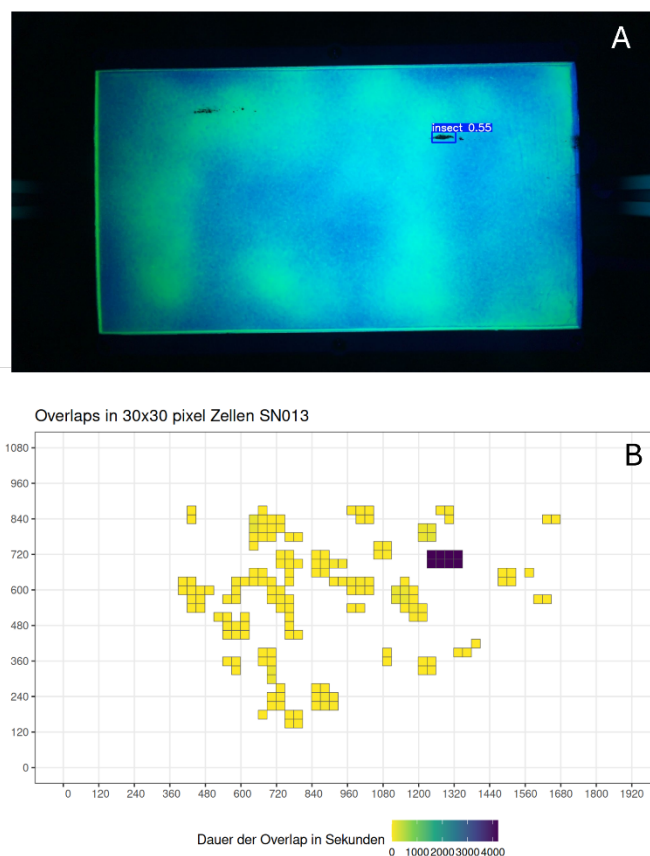


Abb. 131: Beispiel 1 für Post-Processing Filter 2 – Ausschluss konstanter Detektionen innerhalb 10 Minuten. Auf der Lockfläche wurde Vogelkot als Insekt erkannt (A). Werden alle Detektionen im Laufe eines Tages (24h) im Gitter dargestellt (B), wird diese falsch-positive Detektion besonders deutlich. Die dunkle Farbe zeigt an, dass sich hier Detektionen über einen längeren Zeitraum immer wieder überlagert haben. Diese Detektionen können dann ausgeschlossen werden.

Mit diesem Filterschritt konnten jedoch nicht alle fälschlichen Bestimmungen aufgrund von Verschmutzung der Lockfläche „herausgefiltert“ und aus dem Datensatz entfernt werden, wie das Beispiel in Abb. 132 zeigt. Manche Verschmutzungen wurden zu selten innerhalb des 10 Minuten Aufnahmeblocks wiederholt detektiert (z.B. aufgrund sich veränderten Lichtverhältnissen) und wurden daher nicht mit dem Post-Processing Filter 2 entfernt. Wird der Zeitraum jedoch verlängert, in dem sich überlagernde Detektionen analysiert werden, können solche falsch-positiven Bestimmungen weiter minimiert werden (Post-Processing Filter 3).

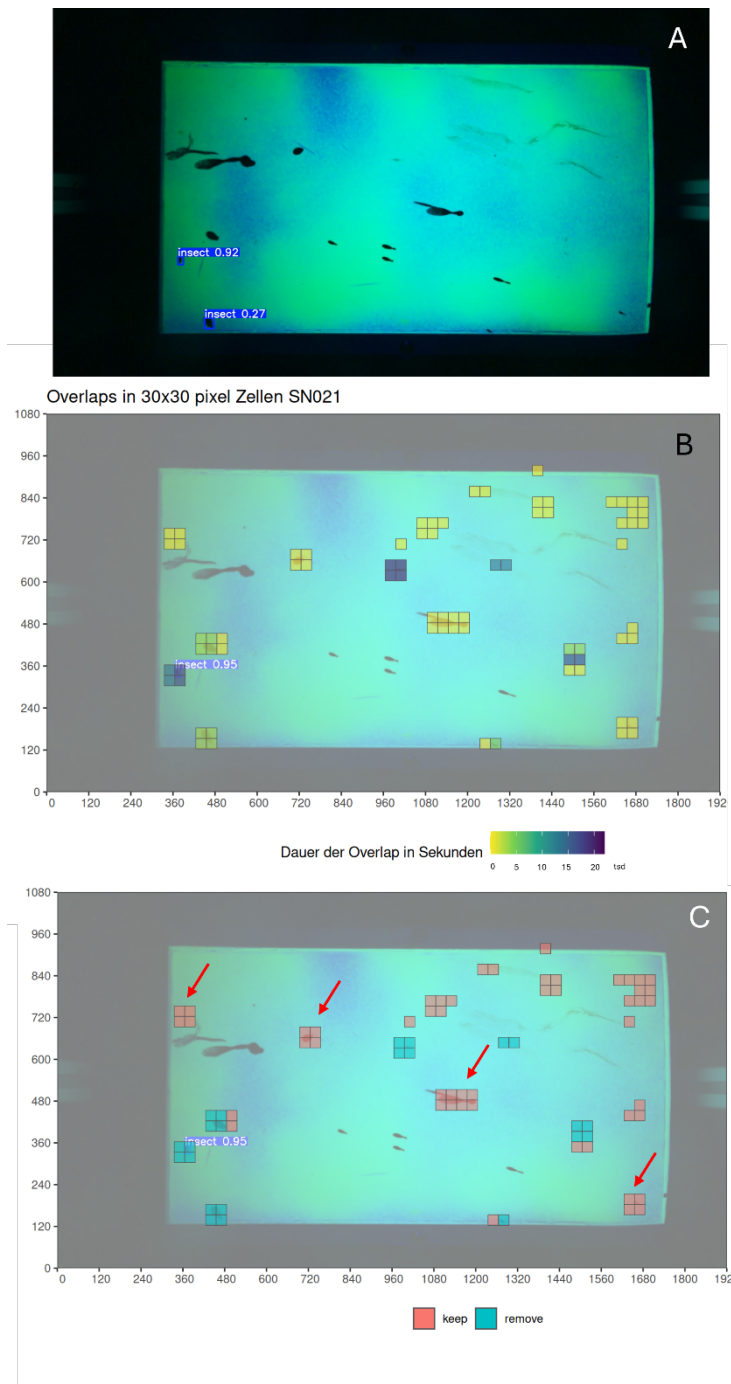


Abb. 132: Beispiel 2 für Post-Processing Filter 2 – Ausschluss konstanter Detektionen innerhalb 10 Minuten. Nicht alle falsch-positiven Bestimmungen verursacht durch eine Verschmutzung der Lockfläche (A) können durch den Post-Processing Filter (B) aus dem Datensatz entfernt werden, wie durch die roten Pfeile markiert (C).

Problematik: Nicht alle falsch-positiven Bestimmungen aufgrund der Verschmutzung der Lockfläche werden mit dem Post-Processing Filter 2 erkannt.

Post-Processing Filter 3: Objekte, die innerhalb eines Auswertungstages sowie am Tag davor und/oder am Tag danach immer wieder an der gleichen Stelle detektiert werden (mindestens 10-mal) werden entfernt.

Dieser Filterschritt entspricht prinzipiell Filter 2 und basiert ebenfalls auf der Unterteilung der Lockfläche in ein 30x30 Pixel Gitter. Jedoch werden sich überlagernde Detektionen über den

ganzen Auswertungstag (24 h) betrachtet und nicht nur innerhalb des 10 Minuten Aufnahmeblocks (Filter 2). Zusätzlich zum spezifischen Auswertungstag wurde auch der Tag davor und danach analysiert. Traten an einer der Tage oder an beiden ebenfalls wiederholt Detektionen an der gleichen Stelle auf, wurden diese aus dem Datensatz entfernt. Auf diese Weise können auch falsch-positive Bestimmungen „herausgefiltert“ werden, die nicht durchgehend detektiert worden sind.

In Abb. 133 wird deutlich, wie die Filter 2 und 3 zusammenwirken und welche Bereiche jeweils von welchem Filter als falsche Detektion identifiziert werden. Mit schwarzen Pfeilen ist in Abb. 133 markiert, welche Bereiche zusätzlich durch Filter 3 ausgeschlossen werden. Der gelbe Pfeil markiert, welcher Bereich nur durch Filter 2 ausgeschlossen wurde. Bereiche, die durch beide Filter ausgeschlossen wurden, sind hellblau hinterlegt und schwarz umrandet. Allerdings konnten auch durch den Einsatz beider Filter, nicht alle falsch-positiven Bestimmungen aufgrund von Verschmutzungen ausgeschlossen werden, wie in Abb. 133 durch die roten Pfeile markiert. Aus diesem Grund wurde ein weiterer Filter (Post Processing Filter 4) angewendet, der die Detektionen basierend auf ihrer Bewertungszahl (*confidence scores*, Kap. 4.2.3.1) abschließt.

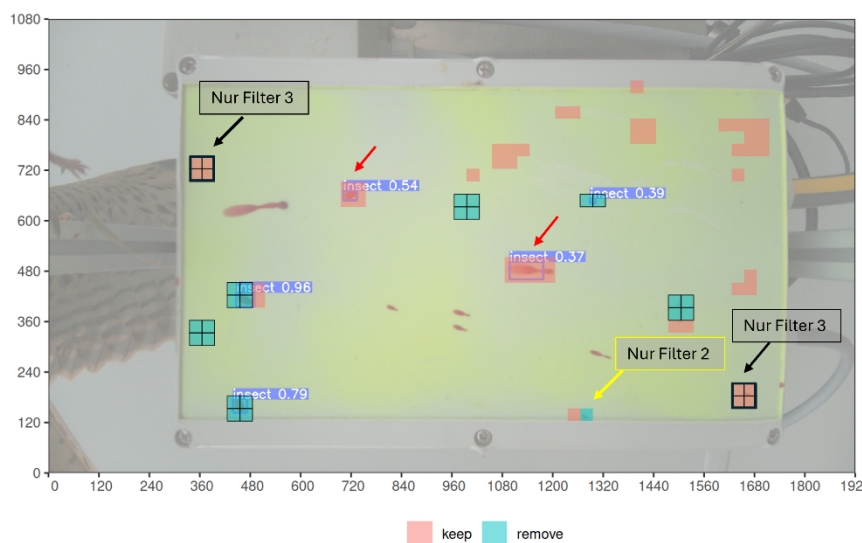


Abb. 133: Beispiel für Post-Processing Filter 3 – Ausschluss konstanter Detektionen innerhalb eines Auswertungstags. Mithilfe des Filter 3 können zusätzliche Bereiche ausgeschlossen werden (schwarze Pfeile), die mit Filter 2 nicht identifiziert werden konnten. Manche Bereiche wurden jedoch nur mit Filter 2 ausgeschlossen (gelber Pfeil). Bereiche, die durch beide Filter ausgeschlossen wurden, sind hellblau hinterlegt und schwarz umrandet. Rote Pfeile markieren falsch-positive Detektionen, die von keinem Filter erkannt wurden und basierend auf ihrer Bewertungszahl ausgeschlossen werden können (Post-Processing Filter 4).

Problematik: Nicht alle falsch-positiven Bestimmungen aufgrund der Verschmutzung der Lockfläche werden mit dem Post-Processing Filter 2 und 3 erkannt.

Post-Processing Filter 4: Ausschluss von Detektionen basierend auf ihrer Bewertungszahl („Konfidenzwert“).

Alle Detektionen des Modells werden mit einer Bewertungszahl („Konfidenzwert“) ausgegeben. Diese Zahl gibt keine echten Wahrscheinlichkeiten an, sondern ist ein numerischer Ausdruck für die Vorhersageverlässlichkeit des Modells. Ab welchem Schwellenwert das Modell

zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit „vertrauenswürdig“ ist, muss ermittelt werden (Wood, Kahl 2024). Dazu wurden Modellvorhersagen mit den Konfidenzwerten 0.80-0.85, 0.85-0.90, 0.90-0.95 und 0.95-1.0 stichprobenhaft anhand von je 600 zufälligen Detektionen pro Kategorie manuell geprüft. Konfidenzwerte kleiner 0.80 wurden nicht geprüft, da hier von einer zu geringen Wahrscheinlichkeit ausgegangen wurde, dass diese Modell-Vorhersage korrekt ist. Anhand der ermittelten Anzahl an richtig-positiven und falsch-positiven Bestimmungen pro Kategorie wurde eine logistische Regression durchgeführt. Die Regressionsanalyse gibt Auskunft darüber, ab welchem Konfidenzwert die Bestimmung des Modells mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit korrekt ist. Abb. 134 zeigt die Ergebnisse der logistischen Regression. Basierend darauf wurde für die Modell-Detektionen ein Konfidenzwert von mindestens 0.95 definiert, um in die Datenanalyse einzugehen. Ab diesem Wert sind die Bestimmungen des Modells zu 80 % korrekt, was von uns als ausreichende Genauigkeit festgelegt wurde.

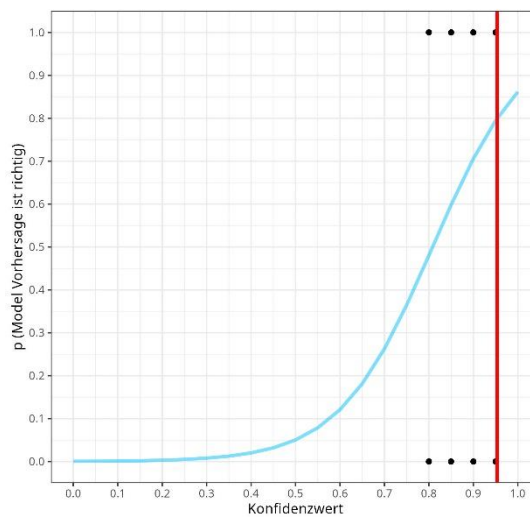


Abb. 134: Logistische Regression zur Vorhersagewahrscheinlichkeiten der Modell-Konfidenzwerte. Auf der y-Achse ist die Wahrscheinlichkeit für die Vorhersagegenauigkeit des Modells angegeben (p), auf der x-Achse sind die Modell-Konfidenzwerte aufgetragen. Manuell geprüft wurden je 600 Detektionen mit den Konfidenzwerten ab 0.8 in Kategorien bis 1.0 (schwarze Punkte). Die rote Linie markiert den Konfidenzwert (0.95), bei der die Vorhersagegenauigkeit 80 % ($p=0.8$) beträgt. Dieser wurde als Schwellenwert für die Modell-Detektionen festgelegt, um in die Datenanalyse einzugehen.

In Abb. 135 werden zwei Beispiele von Insektendetektionen gezeigt, nach den vier Post-Processing Filterschritten.

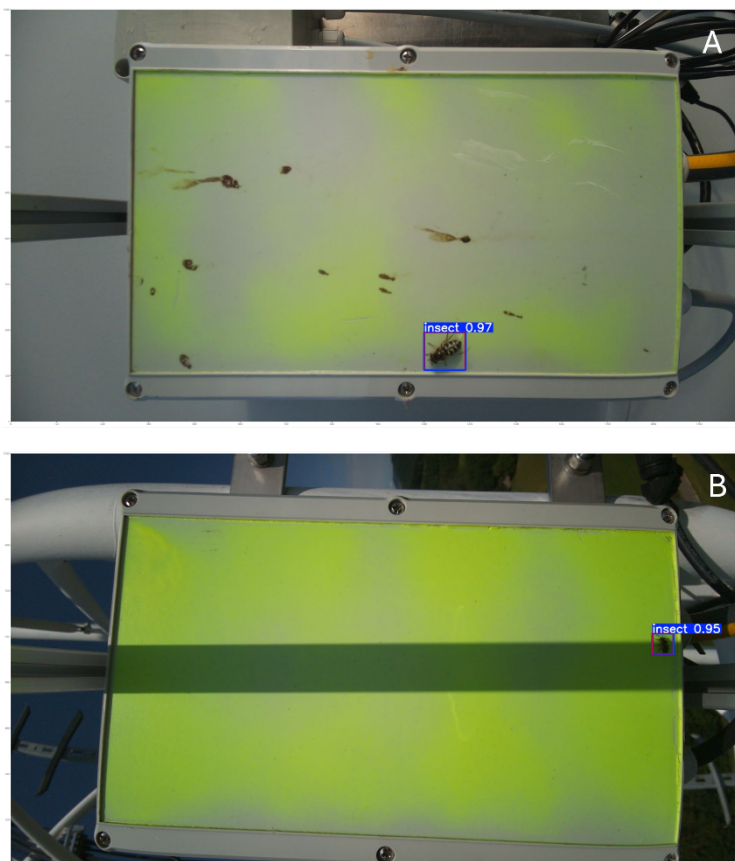


Abb. 135: Beispiel für Detektionen nach allen vier Post-Processing Filter Schritten. Trotz der verschmutzten Lockfläche (A), wird nur das tatsächliche Insekt detektiert bzw. geht in die Datenanalyse aufgrund des hohen Konfidenzwerts ein. Das Insekt an der Schattenkante (B) wird auch bei schwierigen Lichtverhältnissen mit einer ausreichend hohen Konfidenz erkannt und geht mit in die Bewertung ein.

Automatisiert ausgewertet wurden die Daten, die während der Erfassungssaison 2024 (01.03.2024 bis 31.10.2024) erhoben wurden. In diesem Zeitraum wurden von allen Insektenfotofallen zusammen 5,2 Millionen Aufnahmen generiert, davon waren ungefiltert 1.341.673 Aufnahmen mit Detektionen. Nach der Anwendung aller vier Post-Processing-Filter verblieben 30.251 Insekten-Detektionen. Sie bilden die Datengrundlage für die deskriptive wie statistische Analyse.

4.2.4 Deskriptive und Statistische Analyse Insektenabundanz & Fledermausaktivität

Grundlage für die deskriptive Analyse der Insektenabundanz bilden die Daten aus den Erfassungsjahren 2023 (18./19.07.23 bis 31.10.23) und 2024 (01.03.24 bis 31.10.24). Der Schwerpunkt liegt auf den Daten aus dem Erfassungsjahr 2024, diese wurden automatisiert ausgewertet (vgl. Kapitel 4.2.3). Im Jahr 2023 konnten aufgrund des relativ späten Erfassungsbegins sowie der anfänglichen Probleme hinsichtlich der Stromversorgung und der Internetverbindung im Windtestfeld nur vergleichsweise wenige Daten gesammelt werden; sie wurden manuell ausgewertet.

Die statistische Analyse wurde mit den Daten aus 2024 durchgeführt. Dabei beschränkte sich die Analyse auf die Daten ab 09.06.2024, da ab diesem Zeitpunkt das Aufnahmeregime der Insektenfotofallen verändert wurde (vgl. Kapitel 4.2.2.4) und die Daten damit methodisch vergleichbar sind.

Für die Analyse der Insektenabundanz in Abhängigkeit von meteorologischen Parametern wurden die Daten der Sensoren verwendet, die an den Messmasten im Windtestfeld installiert sind. Aufgrund von Ausfällen an den Messmasten, liegen nicht zu allen Daten der Insektenfotofallen Wetterdaten vor. Entsprechend konnten nicht alle erhobenen Daten der Insektenfotofallen berücksichtigt werden.

Für die Analyse der Fledermausaktivität im Hinblick auf die Insektenabundanz wurden die Daten aus dem AP 3 Fledermäuse herangezogen. Um die Vergleichbarkeit der Datensätze zu wahren, wurde lediglich die Fledermausaktivität innerhalb von 10 Minuten zum Zeitpunkt der Insektenerfassung (einmal pro Stunde) berücksichtigt.

In der Auswertung wurde nicht unterschieden, ob die FWEA in Betrieb waren oder nicht. Diese Analyse wurde aufgrund der vergleichsweise wenigen und heterogenen Betriebsphasen der FWEA sowie dem Ausfall von Sensoren (vgl. AP 1) nicht durchgeführt. Die Analyse ist für die laufenden Erfassungen (2025) geplant.

4.2.4.1 Deskriptive Analyse

Die deskriptive Analyse bietet eine gute Möglichkeit, sich einen grundsätzlichen Überblick zur Datenzusammensetzung verschaffen zu können und mögliche Hinweise auf Zusammenhänge abzuleiten. Dazu wurde die Insektenabundanz im Hinblick auf die quantitativen Nachweise (Insektenanzahl) und qualitativen Nachweise (Insektengröße) analysiert, wobei die Daten getrennt nach Erfassungszeit (Tag bzw. Nacht), nach den Erfassungsstrukturen (Messmast- und FWEA) sowie nach der Erfassungshöhe betrachtet wurden. Außerdem wurde der Einfluss der meteorologischen Parameter Temperatur und Windgeschwindigkeit sowie saisonale Effekte untersucht.

Die Auswertung der Daten erfolgte mit dem Statistik-Programm R (R Core Team 2024), Grafiken wurden mit dem Package ggplot2 erstellt (Wickham 2016).

4.2.4.2 Statistische Modellierung der Einflussparameter

Die Präsenz bzw. Absenz von Insekten wurde mit GLMMs (General Linear Mixed-effects Models) aus dem Paket *lme4* (Bates et al. 2014) modelliert. Diese Modelle berücksichtigen sowohl feste als auch zufällige Effekte. Vor der Modellierung wurden alle Variablen mithilfe des Pakets R-Paket *Corrgram* (Wright 2021) auf Kollinearität getestet, basierend auf einer Spearman-Korrelation.

Insektenabundanz-Modelle

Die Insektendaten der Nacht wurden getrennt von den Tagesdaten modelliert. Ein Modell wurde für die zusammengefassten Nachtdaten und ein weiteres für die zusammengefassten Tagesdaten der Erfassungssaison (09.06.24 – 30.10.24) erstellt. Die Modelle hatten folgende Struktur (Tagesmodelle enthielten den Tageszehntelwert, Nachtmodelle den Nachtzehntelwert):

Insekten präsenz/absenz \sim Temperatur + Windgeschwindigkeit + Höhe + Struktur + Tage seit Beginn + Nachtzehntel bzw. Tageszehntelwert + (1 | Geräte-ID)

Das Insektenvorkommen war binär kodiert: entweder Präsenz (1) oder Absenz (0). Die Variablen Temperatur, Windgeschwindigkeit, Höhe, Tage seit Beginn und Nacht- (bzw. Tages-) zehntel wurden für die Modellkonvergenz skaliert. Die Variablen „Tage seit Beginn“ und „Nacht- bzw. Tageszehntel“ wurden auch in quadratischer Form in das Modell aufgenommen, da keine linearen Zusammenhänge erwartet wurden. Die Variable Struktur (Messmast Nordost,

Messmast Nordwest, Messmast Südost, Messmast Südwest, WEA N, WEA S) wurde als fester Faktor berücksichtigt, die Geräte-ID der Fotofalle als zufälliger Effekt, um Unterschiede zwischen den einzelnen Geräten zu berücksichtigen. Die Modellanpassung wurde manuell überprüft, indem Residuen und Vorhersagewerte betrachtet sowie AIC-Werte verschiedener Modellversionen verglichen wurden.

Rotorblattbereich-Modelle

Der Bereich der Rotorblätter ist innerhalb des Windtestfelds von besonderem Interesse, da hier potenzielle Kollisionen mit Fledermäusen stattfinden könnten. Zu diesem Zweck wurden zwei weitere GLMMs erstellt, basierend ausschließlich auf den Messwerten der beiden höchsten Messpositionen jeder Struktur, welche den Rotorblattbereich abdecken. Hier wurde die Insektenaktivität für Tag und Nacht jeweils separat modelliert, um herauszufinden, welche Faktoren die Insektenaktivität in der Nacht bzw. am Tag in diesem Bereich beeinflussen. Die Modellstruktur entsprach der vorherigen, auf aggregierten Daten basierenden Modellstruktur.

Fledermausarten-Insekten-Modelle

Zur Untersuchung, ob die Fledermausaktivität durch Insektenaktivität in der Nacht oder durch die Insektenaktivität während des vorausgehenden Tages beeinflusst wird, wurden GLM-Modelle (General Linear Models) mit dem Paket *stats* (R Core Team 2024) erstellt. Die Fledermausaktivität wurde als Summe aller Fledermausdetektionen während der ersten 10 Minuten jeder Stunde (genau derselbe Zeitraum wie bei der Insektenerfassung) über den ganzen Tag aufsummiert. Die Insektenaktivität wurde entweder als Insektenaktivität in der Nacht oder am Tag als erklärende Variable verwendet. Um eine vergleichbare Maßzahl aus den Insekten- und Fledermausdaten zu generieren, wurde die maximale Anzahl an Insekten pro Bild für eine Erfassungsrunde ermittelt, und diese Werte pro Tag oder Nacht aufsummiert. Die Modellvariablen wurden vor der Modellierung auf Kollinearität geprüft. Ein separates Modell wurde jeweils für folgende Arten oder Artengruppen erstellt:

Pipistrellus pipistrellus, *Nyctalus noctula*, Ruftypgruppe *Nyctaloid*, *Pipistrellus nathusii* und Arten der Gattung *Myotis*. Im AP 3 finden sich weitere Informationen zur Zusammensetzung der Fledermausdaten.

Alle Modelle verwendeten dieselbe Modellstruktur:

Summe Fledermausdetektionen pro Nacht \sim max insekten pro Erfassungsrunde Tag/Nacht + mittlere Nachttemperatur + mittlere Nachtwindgeschwindigkeit

Die Variable „Summe Fledermausdetektionen pro Tag“ wurde ebenso wie die Variable „Max Insekten pro Erfassungsrunde Tag/Nacht“ logarithmisch transformiert. Die übrigen Variablen „mittlere Nachttemperatur“ und „mittlere Nachtwindgeschwindigkeit“ wurden skaliert, um die Modellkonvergenz zu erleichtern. Modellannahmen wurden manuell überprüft, unter anderem durch Betrachtung der Residuen und Vorhersagewerte sowie durch Vergleich der AIC-Werte unterschiedlicher Modellstrukturen.

Fledermaus-Insektenpräsenz Modell

Zur Untersuchung des möglichen Einflusses des Insektenvorkommens auf die Aktivität von Fledermäusen wurde ein sehr ähnliches GLMM wie in AP 3 von Statistikexperte Pius Korner-Nievergelt vom Büro Oikostat GmbH (Schweiz) erstellt. Dieses Modell hat prinzipiell dieselbe Struktur wie das dort beschriebene Modell, wurde jedoch um die Variable Insektenpräsenz/-

absenz erweitert und ist somit direkt vergleichbar. Das Modell wurde mit dem Paket *brms* (Bürkner 2017) erstellt.

In diesem Modell wird die Fledermausaktivität als binäre Variable modelliert (vorhanden = 1, nicht vorhanden = 0), mit folgenden erklärenden Variablen: Temperatur, Windgeschwindigkeit, Windunterstützung, Niederschlag, Datum, relative Nachtzeit, Höhe und Struktur sowie Insektenpräsenz/-absenz und Interaktionen von Nachtzeit und Windunterstützung. Als Zufallsfaktoren wurden Nacht und Messstruktur berücksichtigt. Die Temperatur wurde sowohl linear als auch quadratisch modelliert. Windunterstützung hatte verschiedene Komponenten für den Herbst. Der Niederschlag wurde in drei Kategorien eingeteilt. Die Jahreszeit wurde mit 8 Polynomen und die relative Nachtzeit mit 4 Polynomen abgebildet, um mehrere zeitliche Aktivitätsgipfel modellieren zu können, die bei diesen Werten erwartet wurden.

4.2.5 Radar-Daten

4.2.5.1 Prinzip & Ziel

In AP 2 findet sich eine ausführliche Erklärung, wie die Radar-Daten im vorliegenden Projekt erhoben und weiterverarbeitet wurden, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird. Ziel war es, die mit Hilfe von Radar ermittelten Insektenabundanzen (AP 2) mit den ermittelten Insektenabundanzen durch die Insektenfotofalle abzugleichen, um zu prüfen, inwieweit beide Methoden vergleichbar sind.

4.2.5.2 Auswertung

Für die Analyse wurde die durchschnittliche Anzahl an Insekten pro Tag verglichen, die einerseits vom Radargerät und andererseits von den im Windtestfeld installierten Insektenfotofallen erfasst wurde. Es flossen nur Daten aus der Erfassungssaison 2024 ein.

Die Radar-Messungen beginnen in 50 m Höhe über dem Boden und reichen bis in 540 m Höhe (vgl. AP 2). Für die Vergleichsanalyse wurden die Radardaten aus Höhen zwischen 50 m und 100 m verwendet und die Insektenfotofallendaten der Messpunkte aus 47 m bis 96 m Höhe. Die gewählten Höhenbereiche decken cirka den Rotorblattbereich der Windenergieanlagen ab. Für den Vergleich wurden die Insektenzahlen der Radardaten in 10 m-Höhenintervallen zwischen 50 m und 100 m gemittelt, und zwar jeweils für ein Datum und für die Tageszeit (Tag oder Nacht). Wobei die Nacht definiert wurde von Sonnenuntergang bis zum Sonnenaufgang am nächsten Tag. Die Insektenfotofallendaten – mittlere Anzahl an Insekten pro Bild für jede Erfassungsrunde – wurden jeweils auf den gleichen Zeitraum zugeschnitten und für Tag und Nacht aufsummiert.

Um die Korrelation zwischen den beiden Messmethoden zu bewerten, wurde eine lineare Regression getrennt für die Tag- und Nachtdaten durchgeführt und visualisiert. Die linearen Regressionsmodelle wurden mit dem *stats*-Paket (R Core Team 2024) berechnet und folgten der folgenden Formel:

mittlere Radar-Insekten pro Tageszeit und Datum ~ mittlere Kamerafallen-Insekten pro Tageszeit und Datum

4.2.6 DNA-Barcoding

4.2.6.1 Prinzip & Ziel

DNA-Barcoding ist eine standardisierte Methode zur taxonomischen Artbestimmung, bei der ein definierter, kurzer DNA-Abschnitt (der „DNA-Barcode“) analysiert wird. Im Anschluss wird

dieser Barcode mit einer Referenzbibliothek verglichen, um die Art zu bestimmen. Hier findet sich auch die größte Einschränkung der Methode, da nur solche Arten eindeutig und fehlerfrei zugeordnet werden können, deren Barcode-Sequenzen in der Referenzdatenbank korrekt hinterlegt sind. Weiter muss berücksichtigt werden, dass auf der Basis von Mischproben zwar Arten, aber keine Individuenzahlen bestimmt werden können. Außerdem kann es zu Fehlbestimmungen kommen, beispielsweise im Zusammenhang mit blutsaugenden Insekten. Hier kann die DNA des aufgenommenen Blutes ebenfalls zu einem (ungewollten) Nachweis führen.

Ziel der DNA-Untersuchungen im vorliegenden Projekt war es, zusätzlich zu den Insektenfotofallen auch einen Eindruck über die Zusammensetzung der Insektenarten zu gewinnen, die mit den Rotorblättern der FWEA kollidierten. Dazu wurden DNA-Proben an den Rotorblättern gesammelt und mittels DNA-Barcoding analysiert.

4.2.6.2 Durchführung & Auswertung

Die Beprobung der Rotorblätter, die bereits für das Jahr 2023 geplant war, wurde aufgrund der Verzögerung der Inbetriebnahme der FWEA in das Jahr 2024 verschoben. Von den ursprünglich zwei Beprobungsterminen konnte, bedingt durch die äußerst aufwendigen Vorkehrungen zu Probenahme (Einsatz der Befahranlage und Stillstand der Rotoren), nur ein Termin umgesetzt werden. Dieser erfolgte am 30.08.2024 an einem der Rotorblätter der südlichen FWEA.

Vor der Probenahme war die FWEA in Betrieb. Das Wetter in den Tagen unmittelbar vor der Probenahme (3 Tage) war mit durchschnittlich 23 °C, wenig Bewölkung und keinem Niederschlag sowie Windgeschwindigkeiten mit im Mittel 12 km/h günstig (Proben konnten durch Niederschlag nicht abgewaschen werden, Insektenflug wurde angenommen). Die Proben wurden im Bereich von 6 m ab Rotorblattspitze von der Vorderkante des Rotorblatts genommen. 6 Stellen wurden im Abstand von ca. 1 m beprobt. Dazu wurde für jede Probe eine Fläche von 20x5 cm mit einem in 80 %-iger Ethanol-Lösung getränkten Mulltuch abgestrichen. Die gesammelten Proben wurden getrocknet und an das Genetik-Labor (AIM Advanced Identification Methods GmbH Leipzig) zur DNA-Barcoding Analyse geschickt. Die Analyse erfolgte mittels COI-DNA-Barcoding gemäß dem Metabarcoding Manual V6.0_COI Juli 2023 der AIM GmbH. Die Extraktion der DNA, Amplifikation der COI-Region (mit universellen Primern) und Hochdurchsatz-Sequenzierung folgten den Standardprotokollen des Manuals. Anschließend wurden Sequenz-Reads zu Operational Taxonomic Units (OTUs) geclustert und taxonomisch mit Referenzdatenbanken verglichen. Es wurden folgende drei Referenzdatenbanken zum Abgleich verwendet: BOLD (Barcode of Life Database), NCBI Genbank und RDP Classifier (Ribosomal Database Project Classifier). Alle Sequenzen wurden mit einem „Konsensus-Score“ versehen, welcher die Übereinstimmung zwischen den drei Datenbanken angibt. Ein „A-Treffer“ zeigt eine Übereinstimmung (Konsensus) in allen drei Datenbanken an, bei einem „B-Treffer“ stimmen nur zwei Datenbanken überein, bei einem „C-Treffer“ findet sich eine Übereinstimmung nur in einer Datenbank. Die Ergebnisse des DNA-Barcoding wurden uns von der AIM GmbH in Form von Tabellen übermittelt und rein deskriptiv ausgewertet.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Erfassungsjahr 2023

Im Erfassungsjahr 2023 waren insgesamt 8 Insektenfotofallen installiert (jeweils 4 an Windmessmast NE und NW in je vier unterschiedlichen Höhen; vgl. Kapitel 4.2.2.6). Ab der Installation der Geräte Mitte Juli (18./19.07.2023) wurden in Summe 53.610 Aufnahmen erstellt.

Abb. 136 gibt einen Überblick über die Anzahl an erstellten Aufnahmen pro Insektenfotofalle. In dieser Ansicht werden Erfassungslücken aufgrund der beschriebenen Stromausfälle und Probleme mit der Internetverbindung deutlich. Trotzdem konnten insgesamt 10.966 Aufnahmen ausgewertet werden (manuell), wobei sich die Auswertung auf die Daten bis zum 31.10.2023 beschränkt, da aufgrund der Witterungsbedingungen in den Wintermonaten (November, Dezember) von keiner relevanten Insektenaktivität ausgegangen werden kann.

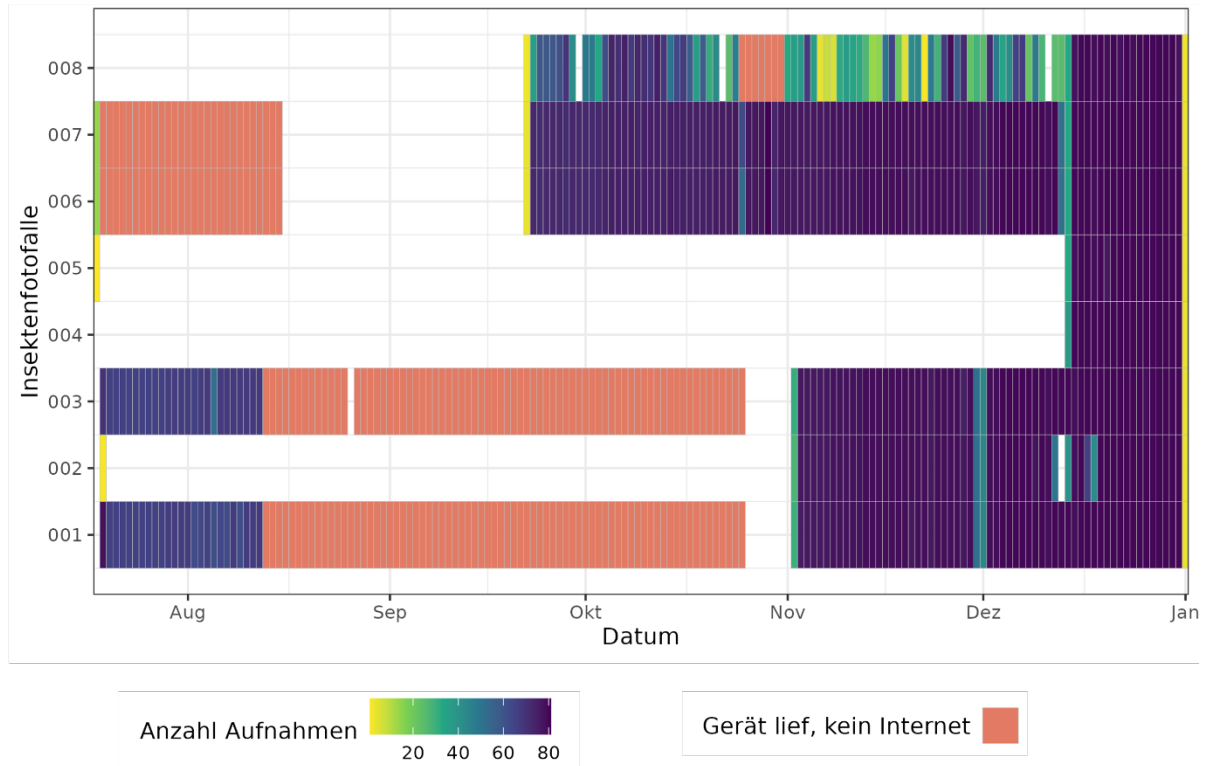


Abb. 136: Überblick über die Laufzeiten der 2023 installierten Insektenfotofallen und die Anzahl der jeweils erstellten Aufnahmen. Aufgrund von Stromausfällen im Windtestfeld kam es zu kompletten Geräteausfällen (weiße Lücken). Probleme mit der Internetverbindung führten teilweise zu Datenverlusten, da keine korrekten Zeitstempel mehr vergeben werden konnten (orange gefärbt).

In Summe wurden 196 Insekten erfasst. Davon wurden 195 Insekten, in die Größenklasse „klein“ (0-10 mm) eingeordnet. Nur ein weiteres Insekt wurde der Größenklasse „mittel“ (10-20 mm) zugeordnet. Die Größenklasse „groß“ (>20 mm) wurde gar nicht vergeben.

In Abb. 137 ist dargestellt, an welchem Tag und an welcher Insektenfotofalle Insekten nachgewiesen werden konnten. Statistisch fundierte phänologische Ableitungen sind aufgrund der geringen Datenbasis nicht möglich, jedoch wird auch bereits bei dieser Datenbasis deutlich, dass die Anzahl erfasster Insekten pro Tag und Nacht im Oktober insgesamt geringer wird und sich auf wenige Erfassungsereignisse an ausgewählten Tagen beschränkt. Im August werden hingegen regelmäßiger Insekten erfasst. In Abb. 138 wird die Anzahl nachgewiesener Insekten je nach Erfassungshöhe dargestellt. Dabei wird deutlich, dass Insekten vor allem in geringeren Höhen (10 m bis 35 m) erfasst wurden, einige Nachweise gab es jedoch auch in bis zu 95 m Höhe (SN 008). Unterschiede zwischen der Anzahl erfasster Insekten tagsüber und nachts in Bezug auf die verschiedenen Erfassungshöhen sind in Abb. 138 nur in geringem Maß erkennbar und werden durch die heterogene Datenbasis wahrscheinlich verzerrt.

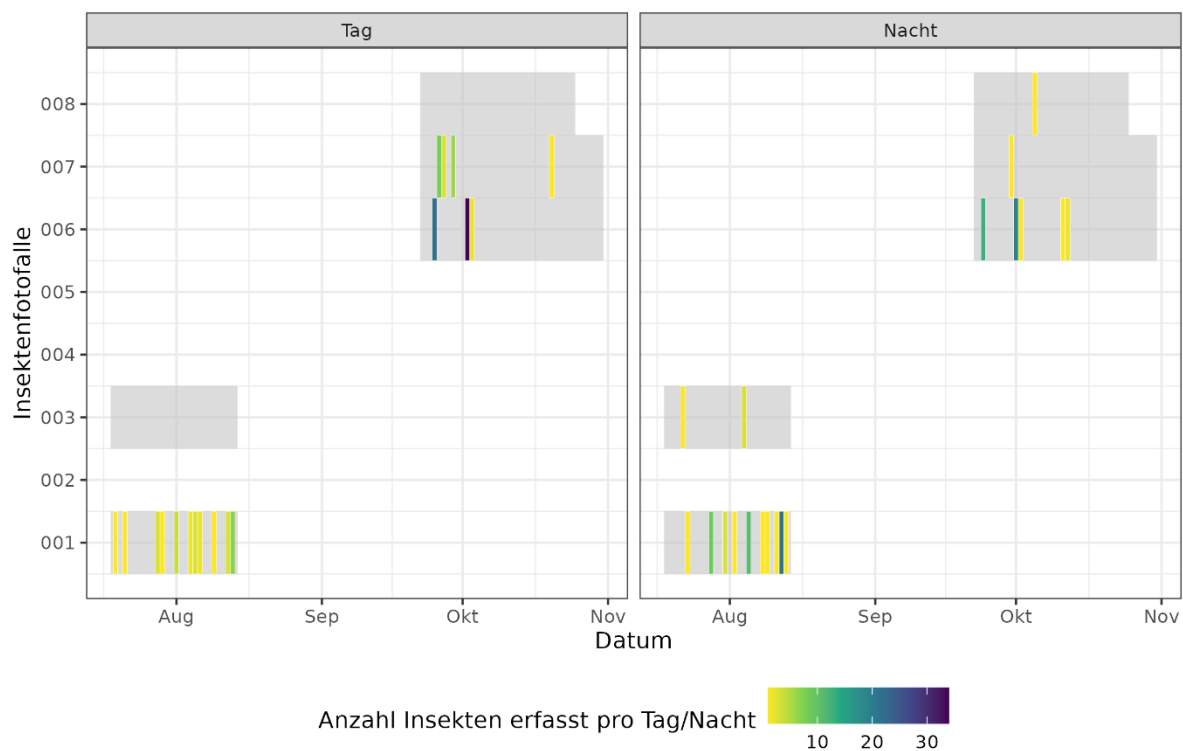


Abb. 137: Anzahl erfasster Insekten tagsüber und nachts pro Insektenfotofalle. Grau hinterlegt sind die Zeiträume, die ausgewertet werden konnten (vgl. Abb. 136). Die Anzahl an Insektennachweisen ist farblich codiert – je dunkler die Farbe, desto mehr Insekten wurden nachgewiesen.

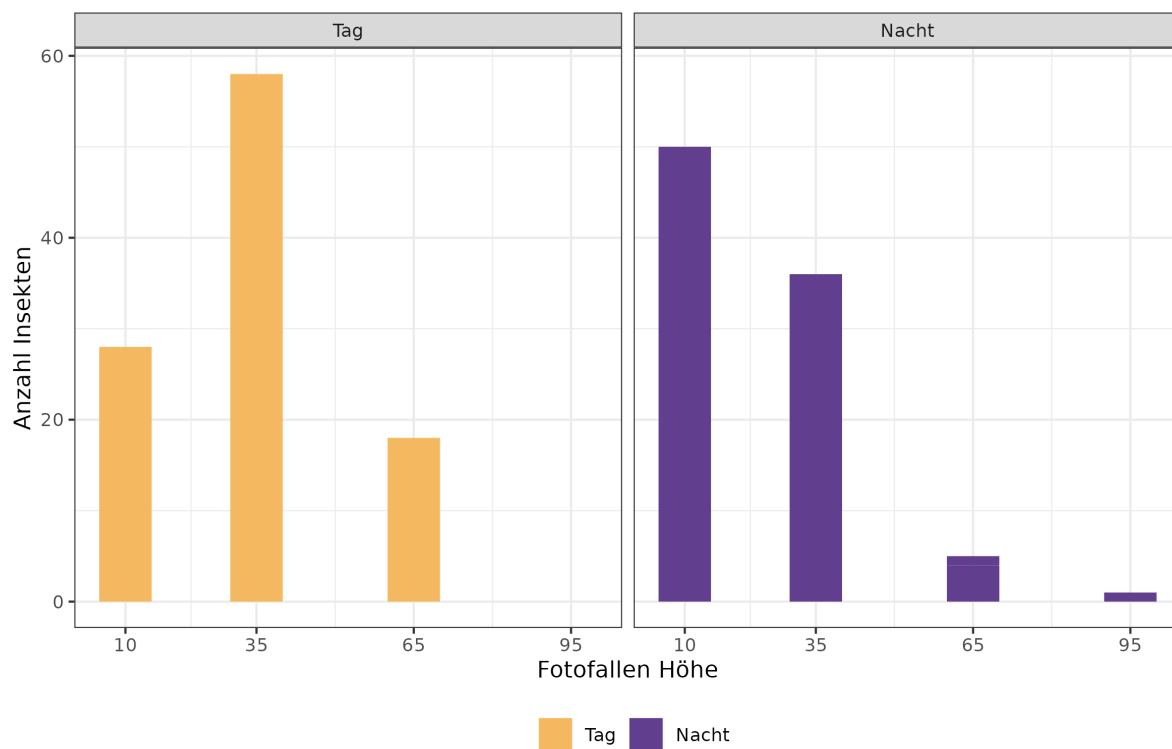


Abb. 138: Anzahl nachgewiesener Insekten in den unterschiedlichen Erfassungshöhen tagsüber und nachts.

4.3.2 Erfassungsjahr 2024

4.3.2.1 Datenlage Insektenfotofalle

Im Laufe des Erfassungsjahres 2024 wurden alle geplanten Insektenfotofallen installiert, sodass in Summe 24 Geräte im Einsatz waren (vgl. Kapitel 4.2.2.6). Abb. 137 gibt einen Überblick zu den Laufzeiten der Insektenfotofallen und generierten Bildern pro Insektenfotofalle. In dieser Abbildung sind die Zeitpunkte der Installation auch gut ableitbar. Besonders deutlich wird die Änderung des Aufnahmeregimes mit dem 09.06.2024. Ab diesem Zeitpunkt wurden deutlich mehr Bilder generiert (vgl. Kapitel 4.2.2.4). Umfang und Zeitpunkt aufgetretener Ausfälle aufgrund von Störungen der Stromversorgung oder fehlender Internetverbindung sind ebenfalls in Abb. 139 ablesbar.

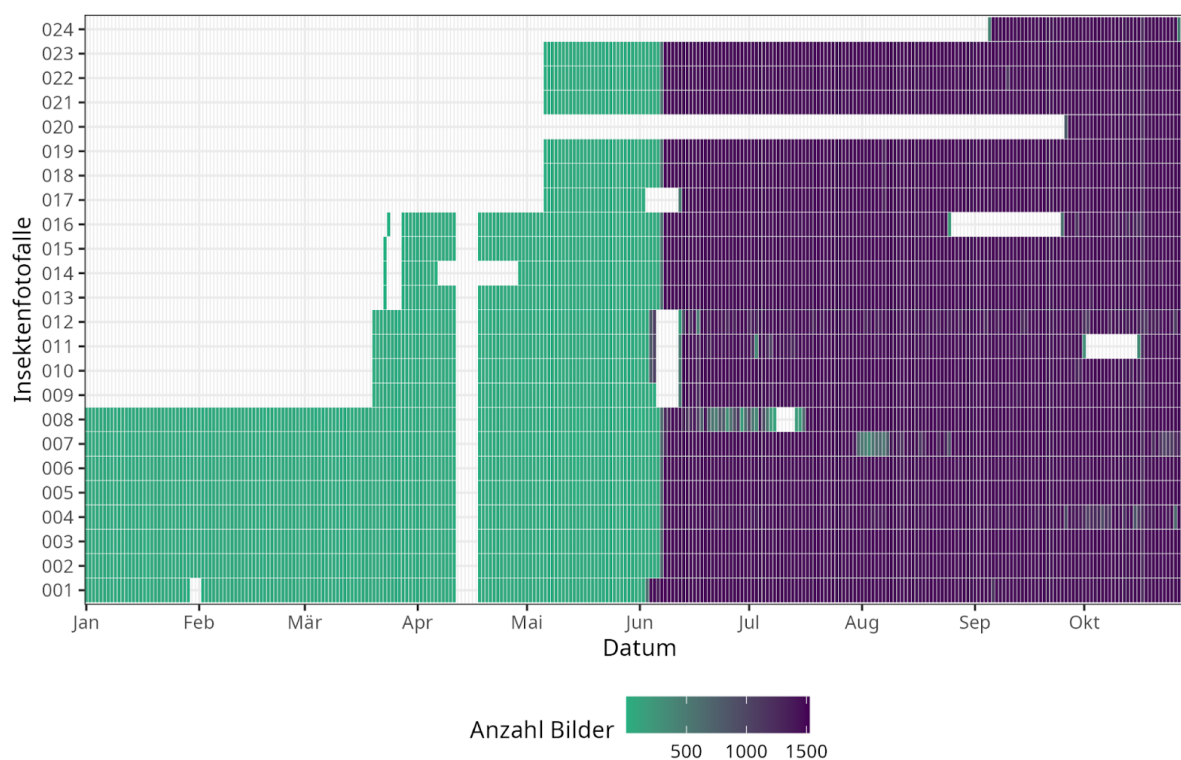


Abb. 139: Überblick über die Laufzeiten der 2024 installierten Insektenfotofallen und die Anzahl der jeweils erstellten Aufnahmen. Der Installationszeitpunkt lässt sich gut herleiten; Lücken nach bereits erfolgten Aufnahmen entstanden aufgrund von Stromausfällen im Windtestfeld oder durch Probleme mit der Internetverbindung. Die Änderung des Aufnahmeregime Anfang Juni wird besonders deutlich, da ab diesem Zeitpunkt mehr Bilder generiert wurden.

Im ausgewerteten Erfassungszeitraum (01.03.24 bis 31.10.24) wurden in Summe 30.251 Aufnahmen mit Insektendetektionen automatisiert festgestellt (nach Anwendung aller Post-Processing Filter, vgl. Kapitel 4.2.3). Davon entfielen 20.546 Detektionsnachweise auf die Erfassungen tagsüber und 9.705 Detektionsnachweise auf die Erfassungen während der Nacht. Je nach Struktur und Erfassungshöhe wurden unterschiedlich viele Detektionsnachweise erbracht. Die meisten Insektennachweise wurden in einer Höhe von 10 m (Höhenklasse 1) bis 35 m (Höhenklasse 2) an den Strukturen im Westen des Windtestfelds erfasst. In Tab. 26 sind die detektierten Insektennachweise tagsüber bzw. nachts getrennt für jede Struktur und Erfassungshöhe gelistet. Diese Insektennachweise bilden die Datengrundlage für alle folgenden Auswertungen.

Tab. 26: Alle detektierten Insektennachweise während der Nacht (N) und über den Tag (T) pro Struktur und Erfassungshöhe. Da sich die Erfassungshöhen je nach Struktur (FWEA oder Messmast) unterscheiden, sind die Höhen in Klassen gegliedert. Sie entsprechen auch der Auswahl bei der späteren Auswertung. Klasse 1 = 10 m Höhe, Klasse 2 = 35 m Höhe, Klasse 3 = 65 m Höhe (Messmast) bzw. 47 m Höhe (FWEA), Klasse 4 = 95 m Höhe (Messmast) bzw. 75 m Höhe (FWEA). Dargestellt sind die Insektennachweise nach der Anwendung aller Post-Processing Filter (vgl. Kapitel 4.2.3.2). MM = Messmast

Höhenklasse	MM_NW	FWEA_N	MM_NE	MM_SW	FWEA_S	MM_SE	Σ
4 (T)	158	38	51	214	120	126	707
4 (N)	405	2	18	45	NA	20	490
3 (T)	242	598	91	166	1435	152	2684
3 (N)	18	154	122	122	133	112	661
2 (T)	764	941	237	545	1205	149	3841
2 (N)	840	148	62	233	166	124	1573
1 (T)	3233	1847	1044	2198	3795	1197	13314
1 (N)	2349	522	629	2194	845	442	6981
Σ (T)	4397	3424	1423	3123	6555	1624	20546
Σ (N)	3612	826	831	2594	1144	698	9705
						GESAMT	30251

4.3.2.2 Insektenabundanz nach Körpergröße

Im Fokus der Untersuchung steht die quantitative Auswertung der Insektenabundanz, weshalb qualitative Untersuchungen nur in einem geringen Maß durchgeführt worden sind.

In Abb. 140 ist dargestellt, wie groß die Insekten im Mittel waren, die in den unterschiedlichen Erfassungshöhen, an den verschiedenen Strukturen (Messmast oder FWEA) tagsüber und nachts innerhalb der Erfassungsrunden (10 min pro Stunde) nachgewiesen werden konnten. Dabei zeigt sich, dass generell kleinere Insekten dominierten (5-10 mm). Zusätzlich nimmt die Körpergröße mit zunehmender Erfassungshöhe überwiegend deutlich ab. Tagsüber wurden tendenziell größere Insekten erfasst als während der Nacht.

Auffällig ist, dass Unterschiede in den Erfassungsergebnissen zwischen den Strukturtypen und in Bezug auf die Himmelsrichtung der Standorte bestehen. Tagsüber wurden an den FWEA tendenziell größere Insekten nachgewiesen als an den Messmasten (MM). Zwischen den Messmasten wiederum sind Unterschiede in Bezug auf die Himmelsrichtung erkennbar: So wurden an den südwestlichen Masten (MM_SW) tagsüber tendenziell größere Insekten erfasst als an nordöstlichen (MM_NE) oder südöstlichen (MM_SE) Strukturen. Nachts waren die Unterschiede zwischen den Standorten deutlich geringer – die Insektengrößenverteilungen lagen dort insgesamt enger beieinander.

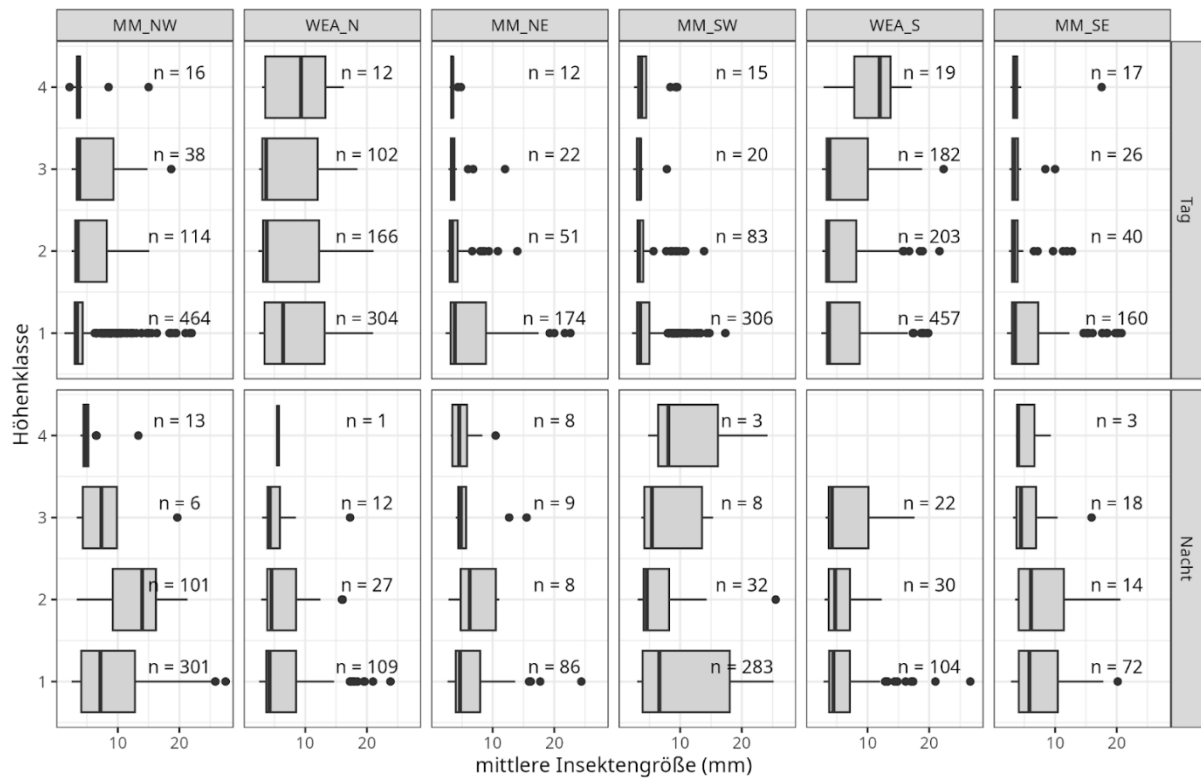


Abb. 140: Mittlere Größe nachgewiesener Insekten je Erfassungsrunde (10 min pro Stunde) in Abhängigkeit von der Erfassungshöhe und der Struktur (Messmast = MM und FWEA) unterschieden nach Tag- und Nachterfassungen. Die Erfassungshöhen sind in Höhenklassen aufgetragen: Klasse 1 = 10 m Höhe, Klasse 2 = 35 m Höhe, Klasse 3 = 65 m Höhe (Messmast) bzw. 47 m Höhe (FWEA), Klasse 4 = 95 m Höhe (Messmast) bzw. 75 m Höhe (FWEA)

4.3.2.3 Insektenpräsenz im Jahresverlauf

In Abb. 141 ist die Insektenpräsenz (mindestens ein Insekt wurde nachgewiesen) über die gesamte Erfassungssaison 2024 aufgetragen, wobei nicht unterschieden wird, ob der Insektennachweis tagsüber oder nachts erfolgte. Außerdem wurden die Erfassungshöhe und die Struktur (Messmast /FWEA) nicht berücksichtigt. Abb. 141 gibt damit einen ersten Gesamteindruck zur erfassten Insektenabundanz im Windtestfeld.

Deutlich wird, dass Insektennachweise tendenziell häufiger tagsüber – und hier ab ca. 2 h nach Sonnenaufgang – als nachts erbracht werden konnten. Auch lässt sich ein gewisser saisonaler Trend erkennen, wobei Insektennachweise ab Ende Mai/Anfang Juni deutlich häufiger wurden und zum Ende der Erfassungssaison wieder leicht abnehmen. Hier muss jedoch berücksichtigt werden, dass im Mai auch die Insektenfotofallen an den Türmen der FWEA installiert wurden. In den Herbstmonaten Oktober und November fallen einige Tage auf, an denen mehr Insektenpräsenz nachgewiesen werden konnte als am Vortag oder am Tag danach. Hier werden Effekte der Tagestemperatur vermutet und es wird von einzelnen warmen Tagen in dieser Zeit ausgegangen.

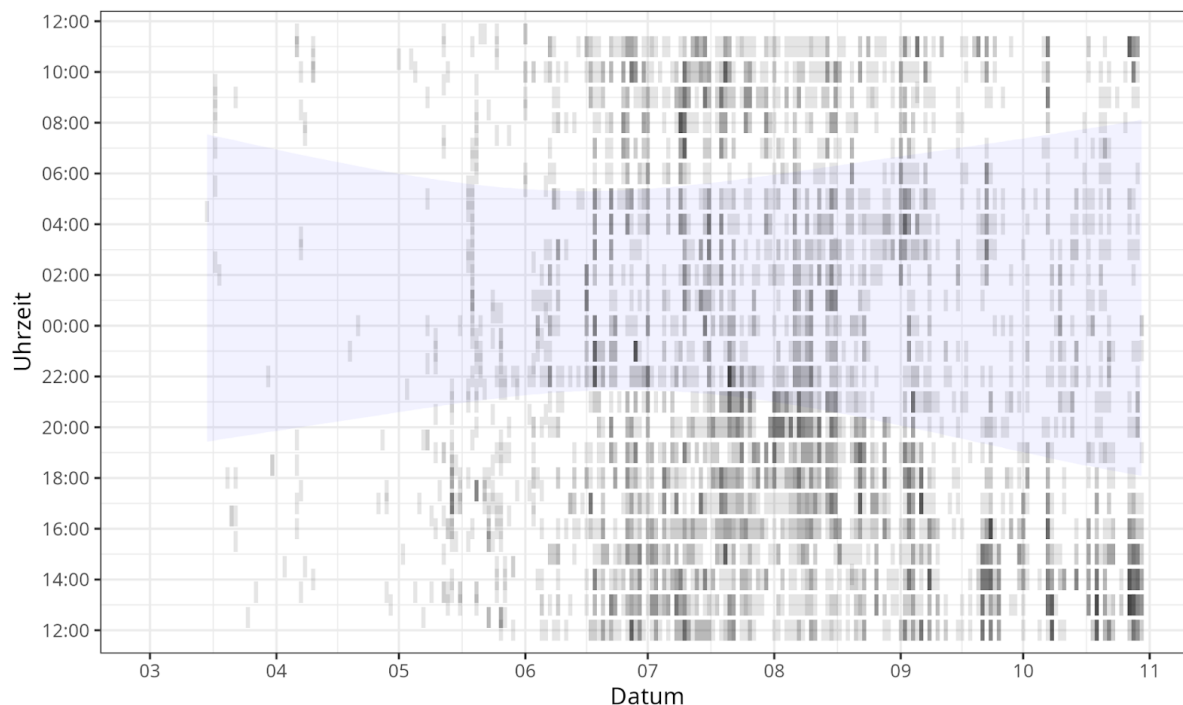


Abb. 141: Insektenpräsenz im Jahresverlauf. Jeder graue Balken stellt eine Erfassungsrunde (10 min pro Stunde) mit Insektennachweis dar (mindestens 1 Insekt wurde nachgewiesen). Je dunkler die Farbe, desto mehr Insektenfotofallen gab es mit Insektenpräsenz. Die Insektenpräsenz ist unabhängig von der Struktur (Messmast oder FWEA) und Erfassungshöhe dargestellt.

4.3.2.4 Insektenabundanz im Jahresverlauf in Abhängigkeit der Erfassungshöhe & Struktur

Einen detaillierten Einblick in die erfasste Insektenaktivität geben Abb. 142 und Abb. 143. Hier wird aufgeschlüsselt für jede Insektenfotofalle die mittlere Anzahl nachgewiesener Insekten pro Erfassungsrunde (10 min pro Stunde, vgl. Kapitel 4.2.2.4) über den jeweiligen Erfassungszeitraum hinweg dargestellt. Durch diese Aufschlüsselung ergibt sich zwangsläufig eine Unterscheidung hinsichtlich der Erfassungshöhe und Struktur (Messmast/ FWEA). Dabei werden zusätzlich zu den bereits in Abb. 141 deutlich gewordenen tendenziellen tageszeitlichen und saisonalen Effekten, weitere Tendenzen deutlich: Zum einen lässt sich erkennen, dass die mittlere Anzahl nachgewiesener Insekten mit zunehmender Erfassungshöhe stark abnahm. Zum anderen wird auch deutlich, dass an den östlich gelegenen Strukturen (Messmast NE und SE) tendenziell weniger Insekten nachgewiesen werden konnten als an den westlichen gelegenen Strukturen. Außerdem zeigt sich, dass an den FWEA jeweils in 47 m mehr Insektennachweise erbracht werden konnten als in der Referenzhöhe (65 m) an den Messmasten.

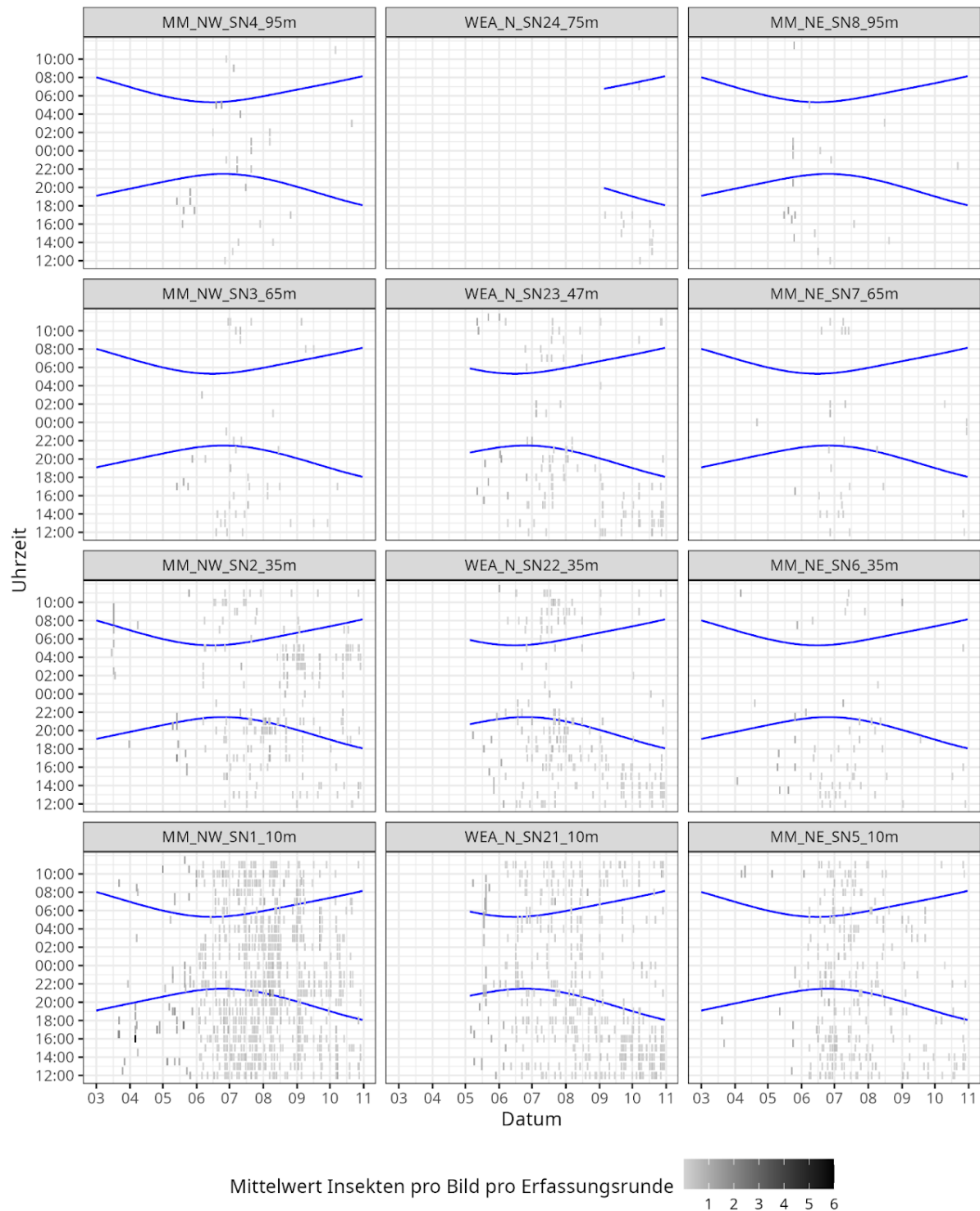


Abb. 142: Insektenabundanz im Jahresverlauf pro Erfassungshöhe an den nördlichen Strukturen. Dargestellt ist die mittlere Anzahl nachgewiesener Insekten, die innerhalb der 10-minütigen Aufnahmezeit pro Stunde (Erfassungsrunde) erfasst wurden (in Graustufen). Blaue Linien zeigen den Sonnenaufgang bzw. -untergang an; gleichzeitig markieren sie für jede Insektenfotofalle auch den Erfassungsbeginn. Am westlichen Messmast (MM) sowie an der FWEA wurden mehr Insektennachweise erbracht als am östlichen Messmast. In Erfassungshöhen bis 35 m wurden häufiger Insekten nachgewiesen als oberhalb dieser Höhe, wobei an der FWEA in 47 m Höhe noch mehr Insektennachweise erbracht wurden als in der Referenzhöhe (65 m) an den Messmasten.

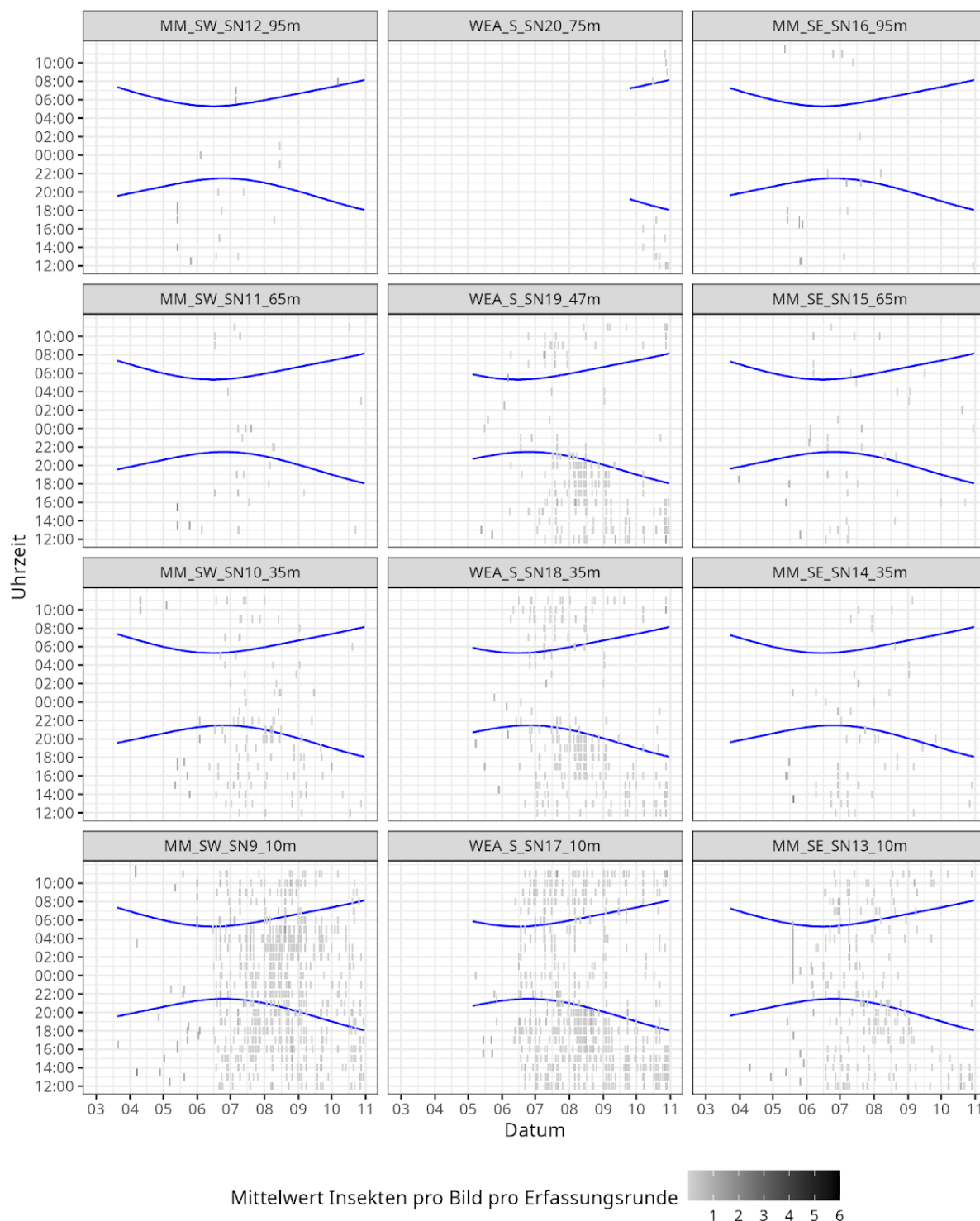


Abb. 143: Insektenabundanz im Jahresverlauf pro Erfassungshöhe an den südlichen Strukturen. Dargestellt ist die mittlere Anzahl nachgewiesener Insekten, die innerhalb der 10-minütigen Aufnahmezeit pro Stunde (Erfassungsrunde) erfasst wurden (in Graustufen). Blaue Linien zeigen den Sonnenaufgang bzw. -untergang an; gleichzeitig markieren sie für jede Insektenfotofalle auch den Erfassungsbeginn. Die Ergebnisse sind ähnlich zu den nördlichen Strukturen (Abb. 142): Am westlichen Messmast (MM) sowie an der FWEA wurden mehr Insektennachweise erbracht als am östlichen Messmast. In Erfassungshöhen bis 35 m wurden häufiger Insekten nachgewiesen als oberhalb dieser Höhe, wobei an der FWEA in 47 m Höhe noch mehr Insektennachweise erbracht wurden als in der Referenzhöhe (65 m) an den Messmasten.

4.3.2.5 Insektenpräsenz in Abhängigkeit von meteorologischen Parametern

In Abb. 144 ist die Insektenpräsenz (Erfassungsrunden mit mindestens einem Insektennachweis) getrennt für Tag und Nacht in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und der vorherrschenden Windgeschwindigkeit dargestellt. Dabei wird deutlich, dass tagsüber ab Temperaturen oberhalb von 5 °C und Windgeschwindigkeit unter 5 m/s häufiger Insektenpräsenz nachgewiesen werden konnte als außerhalb dieses Bereichs. Dieses Muster zeichnet sich auch bei den Daten ab, die über die Nacht erhoben worden sind.

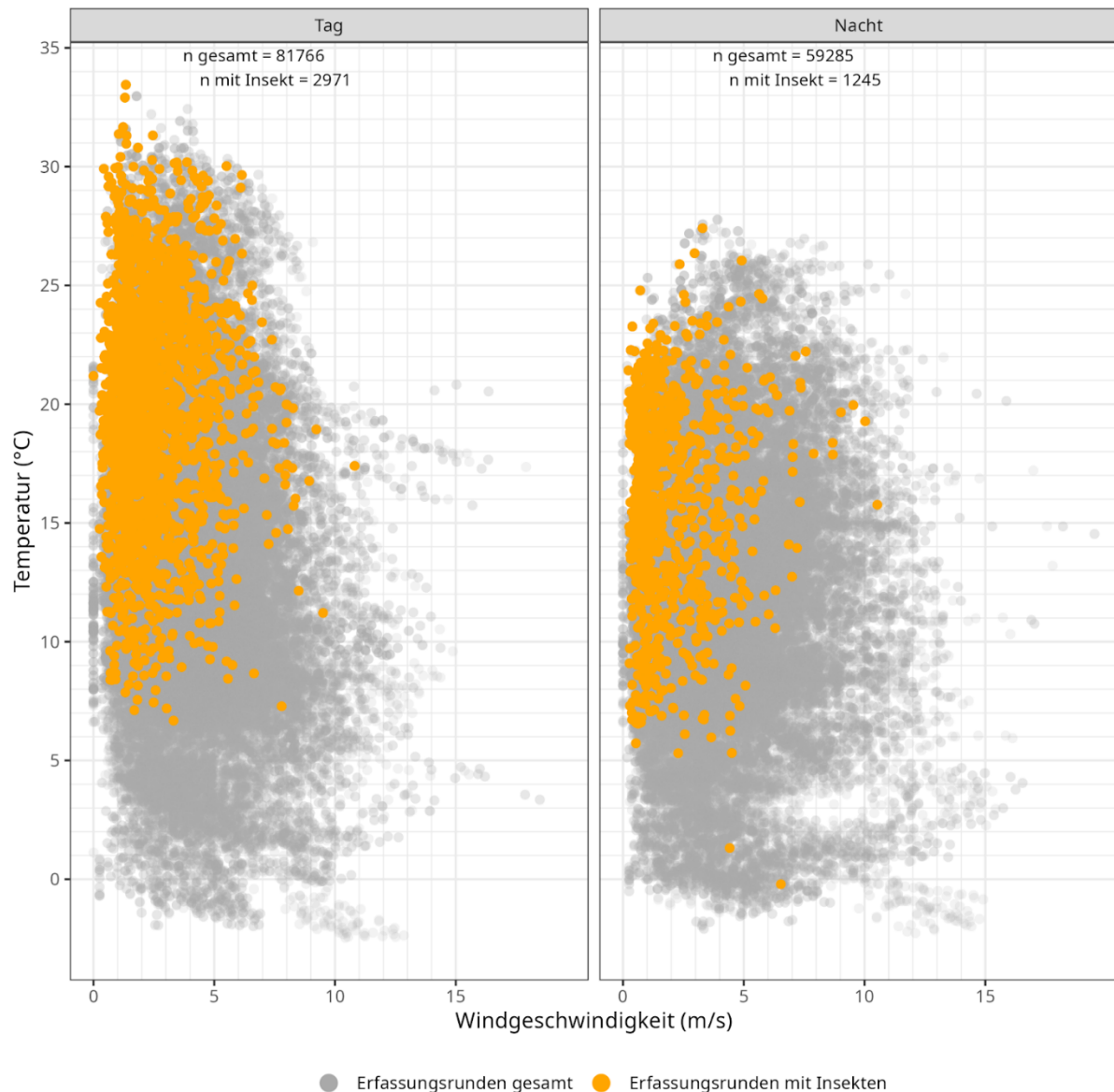


Abb. 144: Absolute Anzahl an Erfassungsrunden mit Insektenpräsenz (orange) nachts und tagsüber an allen Insektenfotofallen zusammen in Abhängigkeit zur vorherrschenden Temperatur und Windgeschwindigkeit. Die grauen Punkte geben die Anzahl an Erfassungsrunden wieder, die zu den jeweiligen Bedingungen erhoben wurden; die Datenlage ist umso größer, je dunkler die grauen Punkte sind. Sowohl tagsüber als auch nachts wurden Insekten vor allem bei Windgeschwindigkeiten <5 m/s und bei Temperaturen >5 °C erfasst.

In Abb. 145 ist die Insektenpräsenz jeweils einzeln für die beiden Parameter Temperatur und Windgeschwindigkeit aufgetragen. Dabei wird die Verteilung der Insektenpräsenz über den

gemessenen Temperatur- bzw. Windgeschwindigkeitsbereich nochmal deutlicher. Sowohl tagsüber als auch nachts konnten bei Temperaturen um 20 °C prozentual am häufigsten Insekten nachgewiesen werden, bei niedrigen Temperaturen fällt die Kurve deutlich ab. Ein Abfall der Kurve ist auch bei höheren Temperaturen erkennbar, jedoch muss berücksichtigt werden, dass hier insgesamt auch nur wenige Daten erhoben werden konnten. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit zeigt sich, dass prozentual am meisten Insektenpräsenz bei etwa 0 m/s bis 2 m/s erfasst werden konnte. Bei Windgeschwindigkeiten oberhalb von 5 m/s flacht die Kurve stark ab.

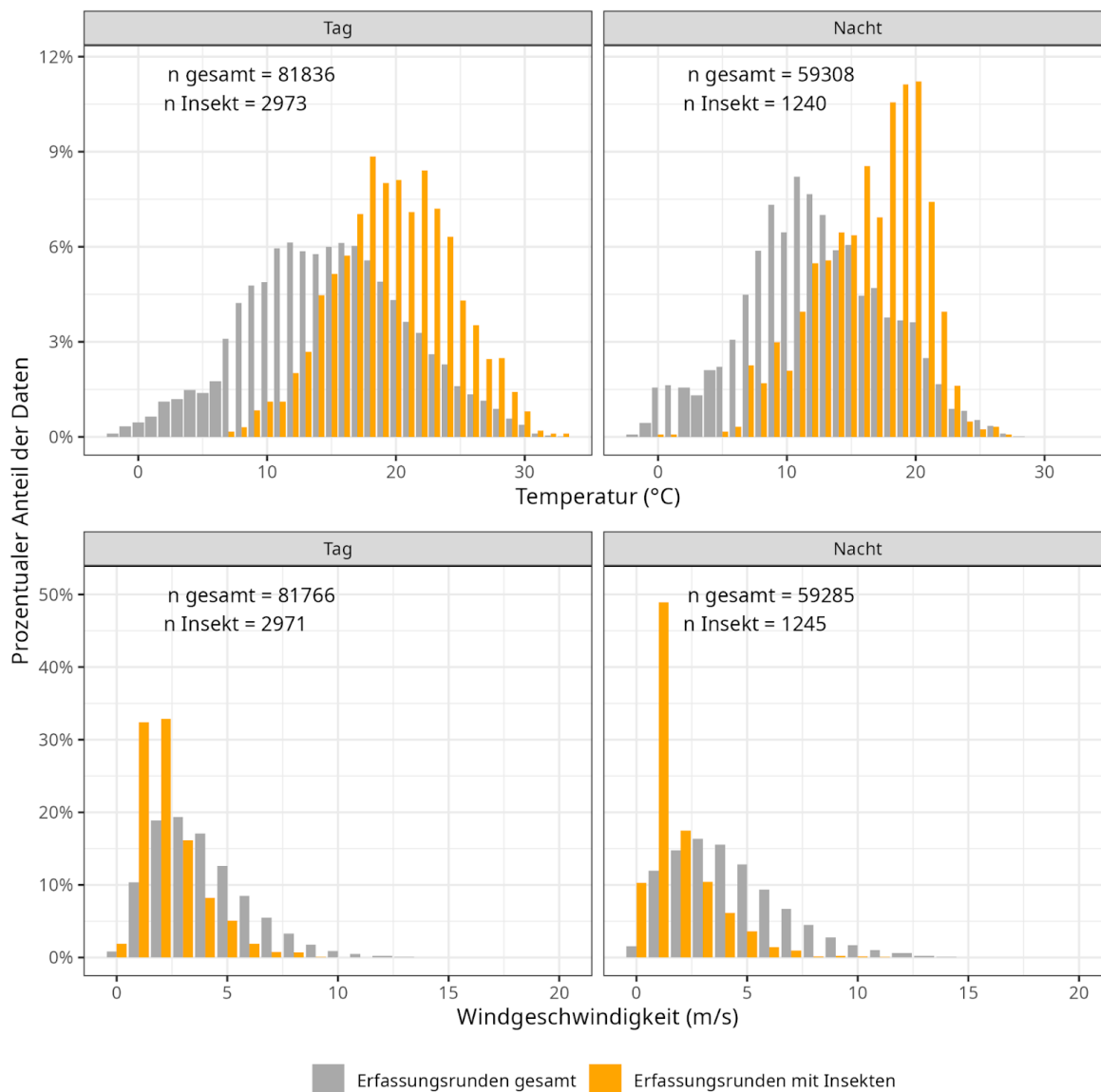


Abb. 145: Prozentualer Anteil an Erfassungsrunden mit Insektenpräsenz (orange) in Abhängigkeit zur Temperatur (oben) und Windgeschwindigkeit (unten) tagsüber und nachts für alle Insektenfotofallen zusammen. Die relative Gesamtzahl an Erfassungsrunden ist in Grau dargestellt. Die Verteilung für die Parameter lässt deutliche Peaks erkennen, die sich tagsüber und nachts kaum unterscheiden: bei Temperaturen um 20 °C und Windgeschwindigkeiten bis 2 m/s waren am häufigsten Insekten präsent.

4.3.2.6 Insektenpräsenz und Fledermausaktivität

In Abb. 146 und Abb. 147 ist die Insektenpräsenz zusammen mit der gemessenen Fledermausaktivität pro Insekten-Erfassungsrunde (10 min pro Stunde) pro Struktur und Erfassungshöhe ab der Änderung des Aufnahmeregimes (09.06.24) bis zum Ende der Erfassungszeitraums (31.10.24) dargestellt. Die Daten innerhalb dieses Zeitraums bilden die Grundlage für die statistische Auswertung (Kapitel 4.3.3), weshalb in Abb. 146 und Abb. 147 zur besseren Vergleichbarkeit ebenfalls dieser Zeitraum gewählt wurde.

Es wird deutlich, dass die Fledermausaktivität – ähnlich wie die nachgewiesene Insektenpräsenz – mit zunehmender Erfassungshöhe abnimmt. Auch findet sich bei der Fledermausaktivität der gleiche Trend hinsichtlich eines Aktivitätsschwerpunkts im westlichen Bereich des Windtestfelds, der auch schon bei der in Abb. 142 und Abb. 143 dargestellten Insektenabundanz erkennbar war und sich in der hier dargestellten Insektenpräsenz ebenfalls spiegelt. Außerdem lässt sich erkennen, dass sich die Fledermausaktivität – auch wie die Insektenabundanz (vgl. Abb. 142 und Abb. 143) – im Jahresverlauf ändert und zum Jahresende hin abnimmt, wobei einzelne Peaks im September auffallen, die auf erhöhte Aktivität des Großen Abendseglers zurückzuführen sind (vgl. AP 3 Fledermäuse).

Offensichtlichen Zusammenhänge in den Nachweismustern von Fledermäusen und Insekten lassen sich in Abb. 146 und Abb. 147 jedoch nicht erkennen.

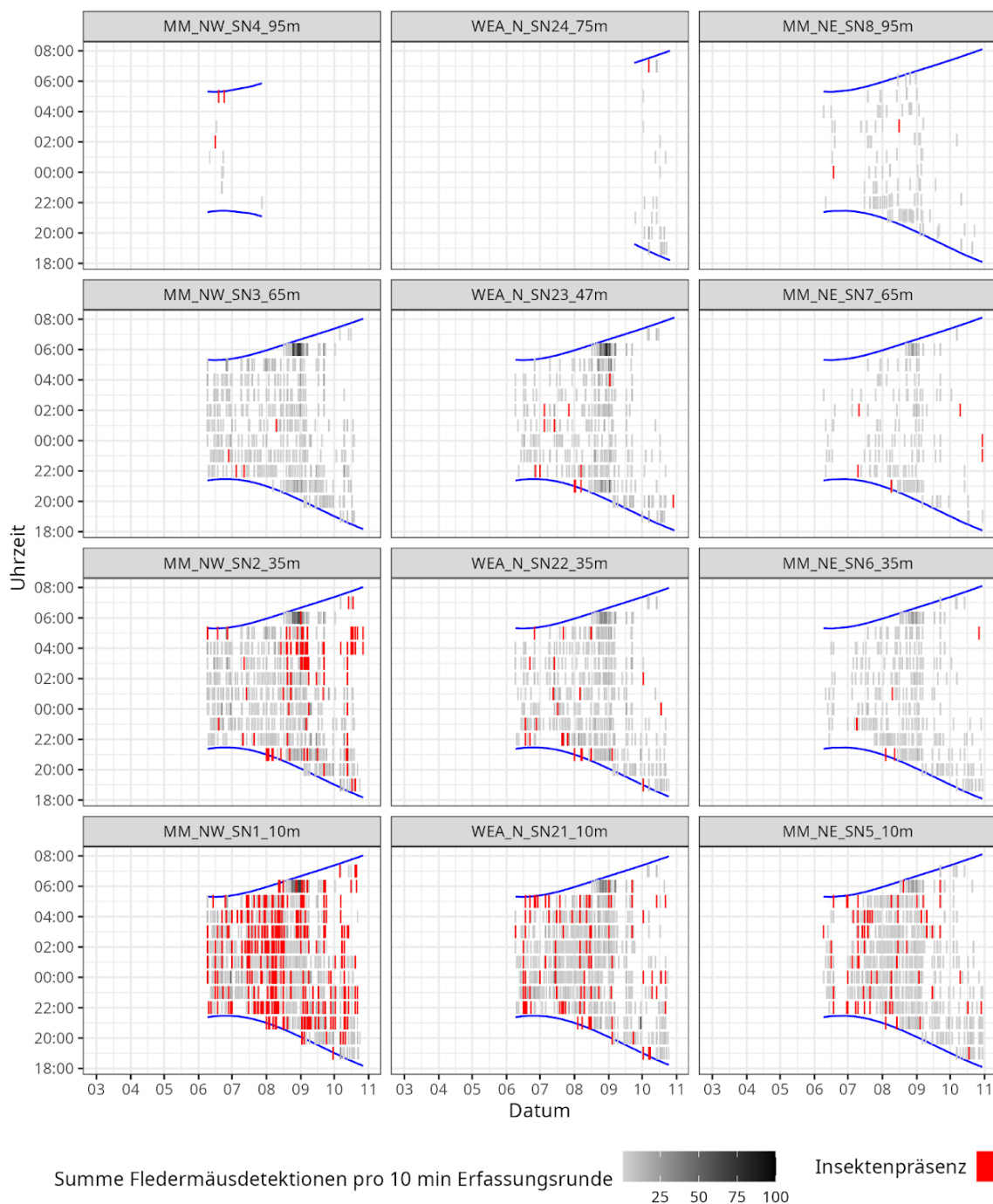


Abb. 146: Fledermausaktivität und Insektenpräsenz im Jahresverlauf ab Änderung des Aufnahmeregimes pro Erfassungshöhe an den nördlichen Strukturen. Dargestellt ist die Summe an Fledermausdetektionen, die innerhalb der 10-minütigen Insektenerfassung pro Stunde (Erfassungsrunde) aufgezeichnet wurden (in Graustufen). Wurde Insektenpräsenz in den Erfassungsrunden nachgewiesen sind sie zusätzlich rot gefärbt. Blaue Linien zeigen den Sonnenaufgang bzw. -untergang an; gleichzeitig markieren sie für jede Insektenfotofalle auch den Erfassungsbeginn. Wie schon für Insekten in Abb. 142 und Abb. 143 gezeigt sind gleiche Trends für Fledermäuse erkennbar: weniger Nachweise mit zunehmender Erfassungshöhe und mehr Nachweise an den westlichen Messmast (MM) sowie an der FWEA; zusätzlich saisonale Peaks im September. Muster zwischen Insektenpräsenz und Fledermausdetektionen sind nicht erkennbar.

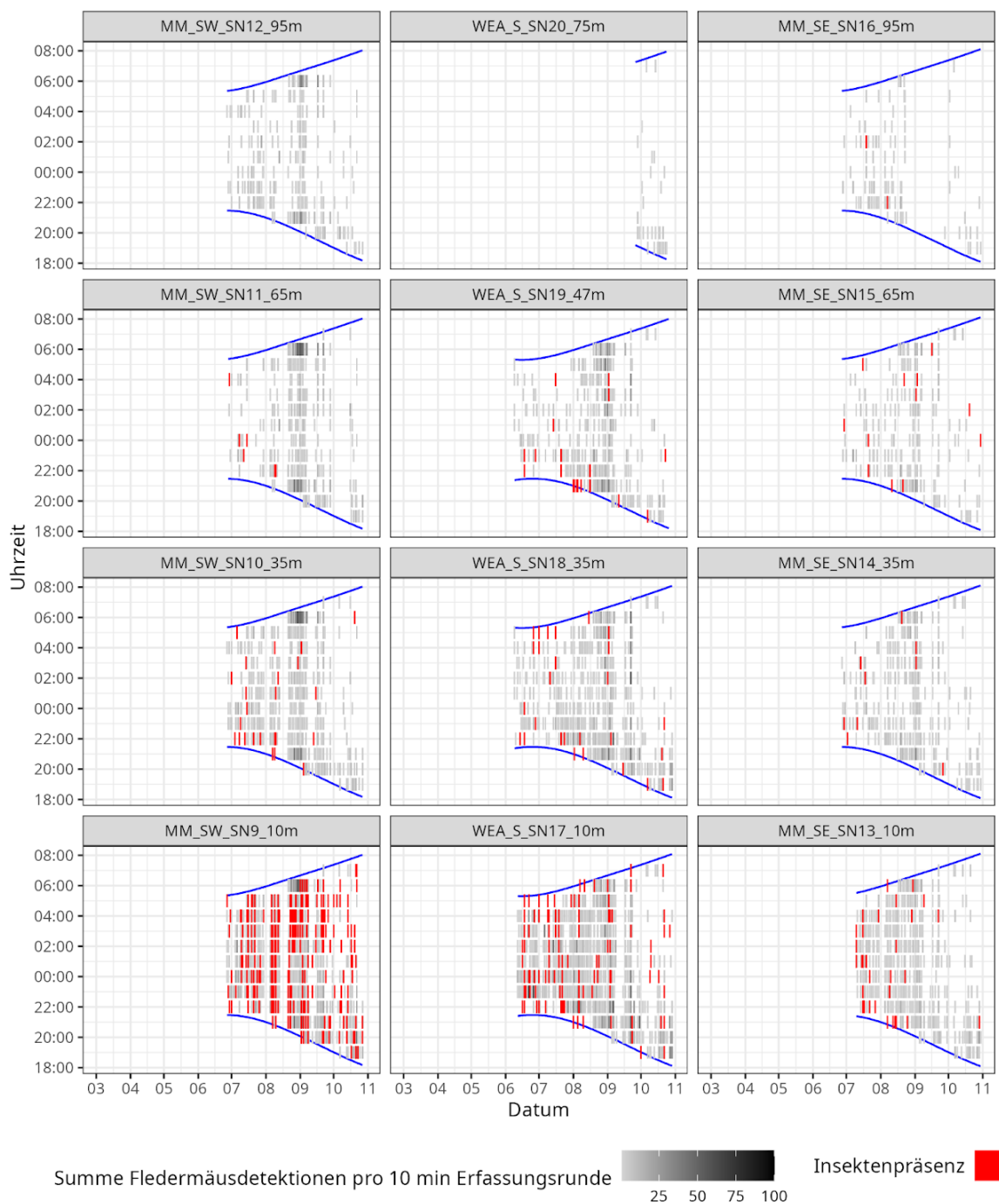


Abb. 147: Fledermausaktivität und Insektenpräsenz im Jahresverlauf ab Änderung des Aufnahmeregimes pro Erfassungshöhe an den südlichen Strukturen. Dargestellt ist die Summe an Fledermausdetektionen, die innerhalb der 10-minütigen Insektenerfassung pro Stunde (Erfassungsrunde) aufgezeichnet wurden (in Graustufen). Wurde Insektenpräsenz in den Erfassungsrunden nachgewiesen sind sie zusätzlich rot gefärbt. Blaue Linien zeigen den Sonnenaufgang bzw. -untergang an; gleichzeitig markieren sie für jede Insektenfotofalle auch den Erfassungsbeginn. Die Ergebnisse sind ähnlich zu den nördlichen Strukturen (Abb. 147): weniger Fledermausnachweise und Insektenpräsenz mit zunehmender Erfassungshöhe und jeweils mehr an den westlichen Messmast (MM) sowie an der FWEA; zusätzlich saisonale Peaks im September für die Fledermäuse. Muster zwischen Insektenpräsenz und Fledermausdetektionen sind nicht erkennbar.

4.3.2.7 Methodentest – Einfluss der Insektenfotofalle auf Fledermäuse

Eine immer wiederkehrende Frage im Rahmen der Projektbesprechungen war, ob die Insektenfotofalle durch ihre regelmäßigen Leuchtphasen einen Einfluss auf das Fledermausverhalten in der unmittelbaren Umgebung hat.

In Abb. 148 ist ein Vergleich der gemessenen Fledermausaktivität 10 min vor dem Beginn der Lockphase der Insektenfotofalle mit der Fledermausaktivität während der 10-minütigen Lockphase der Insektenfotofalle dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass die Fledermausaktivität annähernd gleichbleibend ist und sich nur minimal verändert (die Standardfehler überlappen einander).

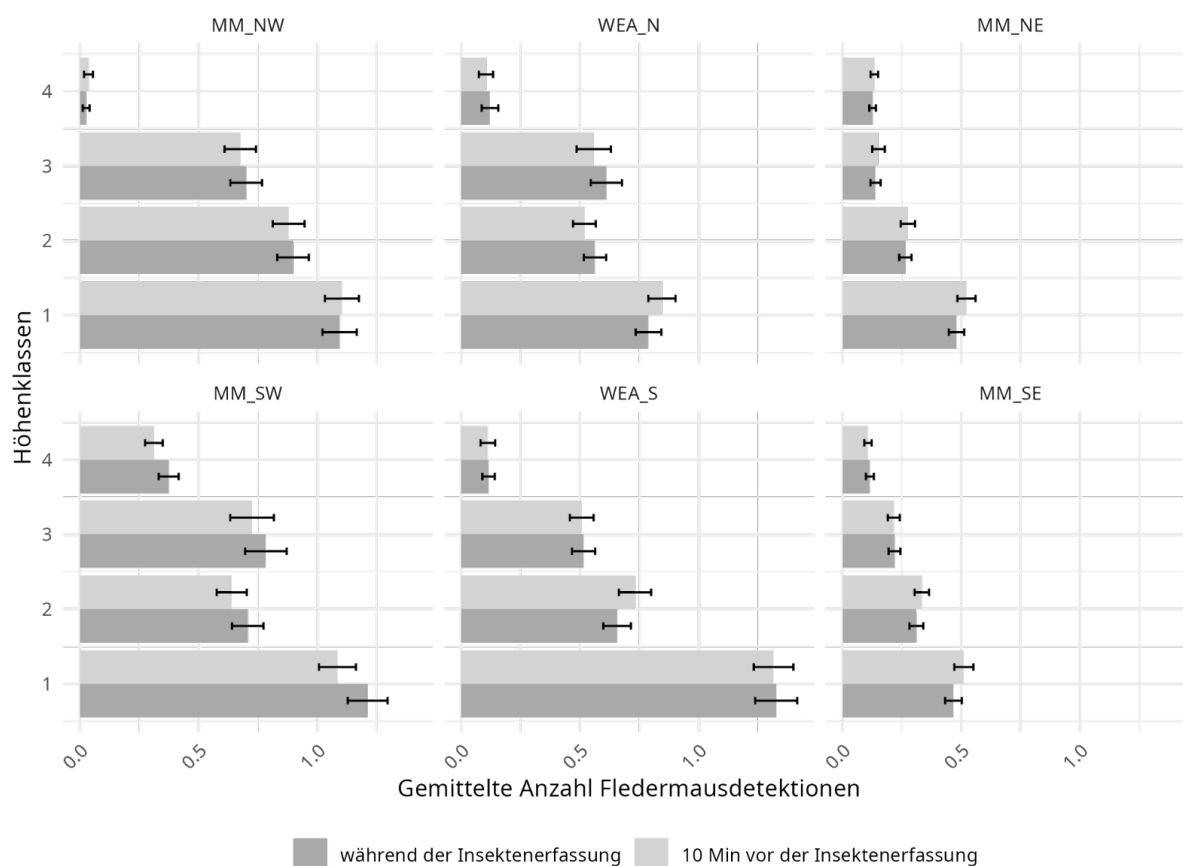


Abb. 148: Durchschnittliche Fledermausaktivität vor und während der Insektenlockphase. Dargestellt sind die mittleren Fledermausdetektionen ± 1 Standardfehler, die 10 min vor der Insektenlockphase und während der 10-minütigen Lockphase erfasst wurden, getrennt nach Struktur (Messmast (=MM) und FWEA) sowie den Erfassungshöhen (Klasse 1 = 10 m Höhe, Klasse 2 = 35 m Höhe, Klasse 3 = 65 m Höhe (Messmast) bzw. 47 m Höhe (FWEA), Klasse 4 = 95 m Höhe (Messmast) bzw. 75 m Höhe (FWEA)). Unterschiede in der Fledermausaktivität vor und während der Insektenlockphase sind nur geringfügig erkennbar und liegen innerhalb des Standardfehlers.

4.3.3 Statistische Modellierung der Einflussparameter

Für die Interpretation der folgenden Abbildungen muss beachtet werden, dass es sich bei der Modellierung um eine Form der Regressionsanalyse handelt (vgl. Kapitel 4.2.4.2). Das bedeutet, mit Hilfe der statistischen Modellierung soll analysiert werden, wie gut die

Insektenabundanz bzw. die Fledermausaktivität durch die untersuchten Parameter vorhergesagt werden können. Folglich werden in den Grafiken Schätzungen und ihre Unsicherheiten (Konfidenzintervalle) dargestellt. Die Stärke des Zusammenhangs zwischen der abhängigen Variablen (Insektenabundanz/ Fledermausaktivität) und den untersuchten Parametern wird durch unterschiedliche Werte beschrieben. Angegeben wird der p-Wert (Signifikanz) und Beta-Wert (β). Der Beta-Wert zeigt neben der Stärke des Zusammenhangs (je größer, desto stärker der Effekt) auch an, in welche Richtung eine Variable mit der Zielgröße zusammenhängt. Ein positiver Beta-Wert bedeutet: Wenn die Variable steigt, steigt auch die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses. Ein negativer Beta-Wert bedeutet: Wenn die Variable steigt, sinkt die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses.

Die nachfolgenden Ergebnisse zeigen die statistische Analyse basierend auf den Daten ab 09.06.2024 bis 31.10.2024 (vgl. Kapitel 4.2.4.2).

4.3.3.1 Insektenabundanzen nachts

Betrachtet man nur die nachts erfassten Insektenabundanzen, so zeigt sich im Modell, dass die Nachweiswahrscheinlichkeit von Insekten während der nächtlichen Erfassungen signifikant von den meteorologischen und zeitlichen Parametern sowie der Erfassungshöhe und den beprobten Strukturen beeinflusst wird (Abb. 149).

Ein starker positiver Effekt ging von der Temperatur aus ($\beta = 0.812$, $p < 2e-16$), d.h. die Nachweiswahrscheinlichkeit steigt mit zunehmender Temperatur stark an. Windgeschwindigkeit ($\beta = -1.493$, $p < 2e-16$) und Erfassungshöhe ($\beta = -0.938$, $p < 0.001$) zeigten einen negativen Effekt, das bedeutet, dass die Nachweiswahrscheinlichkeit für ein Insekt mit zunehmender Windgeschwindigkeit bzw. Erfassungshöhe abnahm. Für den zeitlichen Verlauf innerhalb der Erfassungsperiode ($\beta = 0.145$, $p < 0.001$) sowie innerhalb der Nacht ($\beta = 0.538$, $p < 0.001$) wurden signifikante quadratische Zusammenhänge festgestellt, was auf nichtlineare Muster der Aktivität hinweist. Hinsichtlich des Strukturtyps wurde ein signifikant niedrigerer Insektennachweis an den östlichen Messmasten im Vergleich zu den Messmasten im Westen beobachtet ($\beta = -0.862$, $p = 0.009$), während der Unterschied zur WEA-Struktur nicht signifikant war. Insekten wurden an den östlichen Messmasten folglich signifikant seltener nachgewiesen als an den westlichen Messmasten.

Die Konfidenzintervalle (95 %-KI) zeigen, dass die Unsicherheit der Modellschätzungen insbesondere bei niedrigen und sehr hohen Prädiktorwerten – etwa bei extremen Temperaturen – größer ist, was auf eine geringere Datenbasis in diesen Bereichen hinweist. In gut belegten Bereichen (z. B. bei mittleren Windgeschwindigkeiten oder Temperaturen) sind die Schätzungen entsprechend präziser und die Konfidenzintervalle schmaler.

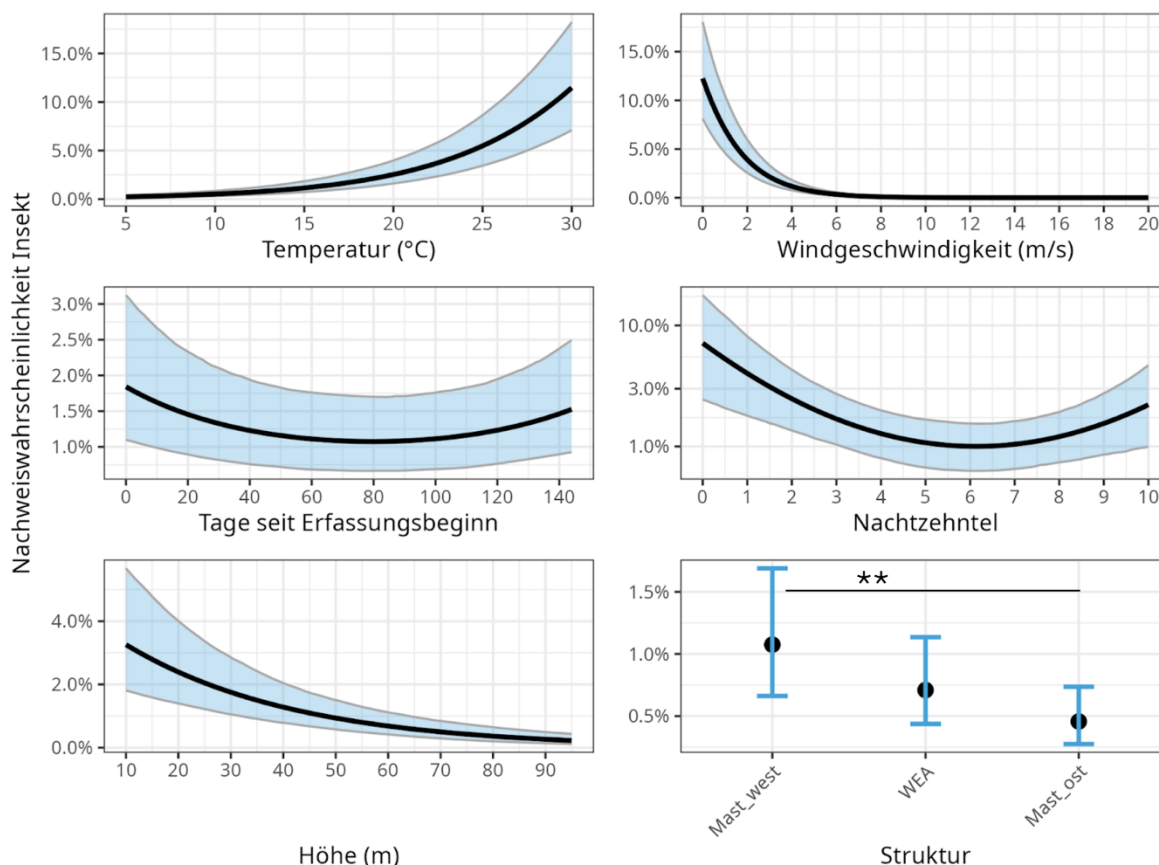


Abb. 149: Modellierte Nachweiswahrscheinlichkeit von Insekten während der Nacht in Abhängigkeit von Temperatur, Windgeschwindigkeit, Tage seit Erfassungsbeginn (Jahresverlauf), Nachtzehntel (Nachtzeit), Erfassungshöhe und Strukturtyp. Dargestellt sind die vorhergesagten Modell-Wahrscheinlichkeiten (schwarze Linien) mit 95 %-Konfidenzintervallen (hellblau). Ein signifikanter positiver Effekt zeigt sich für die Temperatur, während Windgeschwindigkeit und Erfassungshöhe negativ mit der Nachweiswahrscheinlichkeit zusammenhängen. Quadratische Zusammenhänge wurden für den Erfassungszeitraum und die Nachtzeit identifiziert. Strukturbedingt tritt bei den Messmasten im Osten (Mast_ost) eine signifikant niedrigere Wahrscheinlichkeit im Vergleich zu den Messmasten im Westen (Mast_West) auf ($p < 0.01$). Höhere Unsicherheiten treten bei Randbereichen der Prädiktoren auf.

4.3.3.2 Insektenabundanzen nachts im Rotorbereich

In Abb. 150 wird die während der Nacht erfasste Insektenabundanz nur für den Rotorbereich (> 47 m Höhe, d.h. Höhenklasse 3 & 4) modelliert.

Temperatur ($\beta = 0.744$, $p < 0.001$) und Windgeschwindigkeit ($\beta = -0.770$, $p < 0.001$) haben erneut einen signifikanten Einfluss auf die Nachweiswahrscheinlichkeit eines Insekts. Mit steigender Temperatur nimmt die Wahrscheinlichkeit des Nachweises zu, während sie bei zunehmender Windgeschwindigkeit abnimmt. Für den zeitlichen Verlauf seit Beginn der Erfassung zeigt sich ein signifikanter negativer linearer Effekt ($\beta = -0.343$, $p = 0.006$). Das weist auf eine insgesamt abnehmende Nachweiswahrscheinlichkeit im Erfassungsverlauf hin. Die Nachtzeit hat einen starken negativen Effekt ($\beta = -1.259$, $p < 0.001$), der quadratische Term ist nicht signifikant. Das deutet auf eine abnehmende Aktivität im späteren Verlauf der Nacht hin, ohne U-förmigen Zusammenhang (verglichen zum vorherigen Modell). Die Effekte der

Erfassungshöhe sowie der Strukturtypen sind statistisch nicht signifikant, was auf keine klar nachweisbaren Unterschiede zwischen den FWEA und Messmasten hinweist.

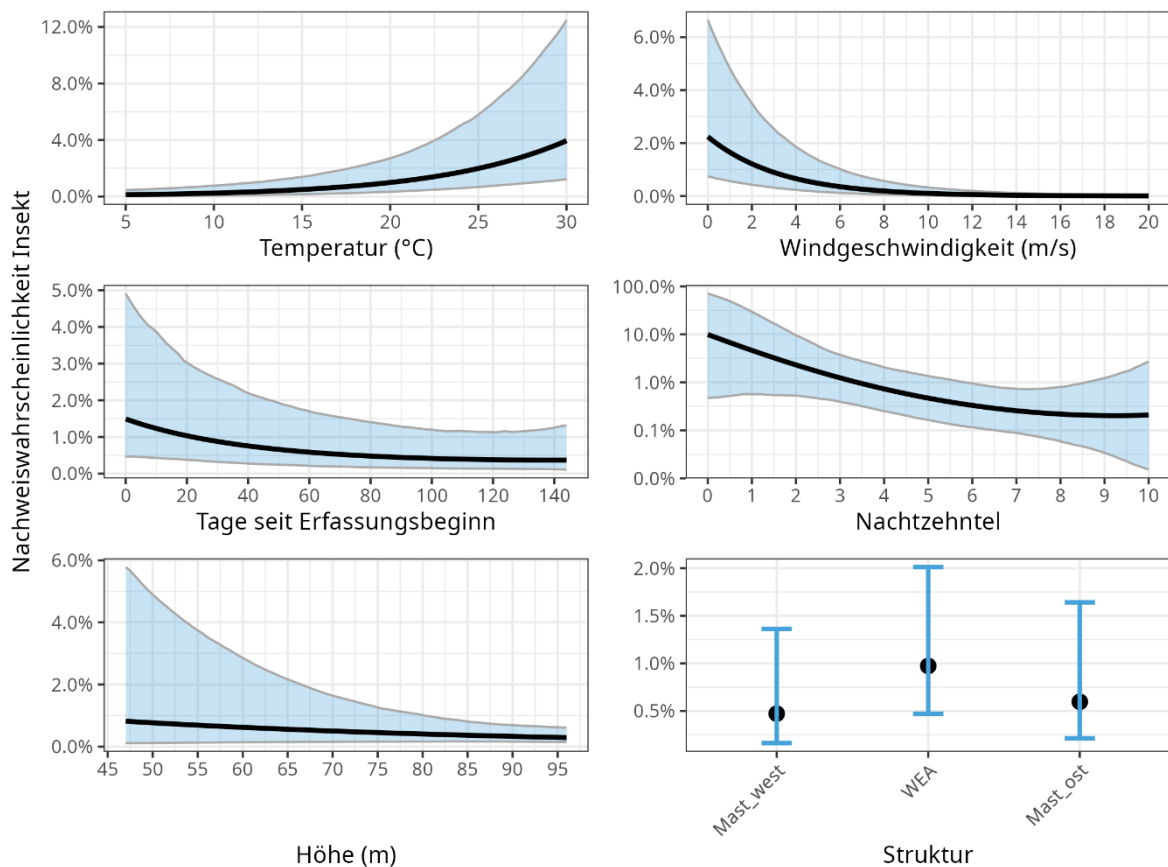


Abb. 150: Modellierte Nachweiswahrscheinlichkeit von Insekten während der Nacht im Rotorbereich (> 47 m) in Abhängigkeit von Temperatur, Windgeschwindigkeit, Tage seit Erfassungsbeginn (Jahresverlauf), Nachtzehntel (Nachtzeit), Erfassungshöhe und Strukturtyp. Dargestellt sind die vorhergesagten Modell-Wahrscheinlichkeiten (schwarze Linien) mit 95 %-Konfidenzintervallen (hellblau). Temperatur wirkt sich positiv, Windgeschwindigkeit und Nachtzeit negativ auf die Nachweiswahrscheinlichkeit aus. Ein abnehmender Trend zeigt sich auch im Erfassungsverlauf. Strukturelle Merkmale (Strukturtyp, Erfassungshöhe) weisen keine signifikanten Effekte auf. Höhere Unsicherheiten treten bei Randbereichen der Prädiktoren auf.

4.3.3.3 Insektenabundanzen tagsüber

Ebenso wie für die Insektenabundanzen nachts (Abb. 149) konnte auch für die Insektenabundanz tagsüber (Abb. 151) ein positiver Effekt der Temperatur festgestellt werden ($\beta = 0.468$, $p < 0.001$), was auf eine Zunahme der Insektenaktivität bei höheren Temperaturen hinweist. Außerdem wiesen die Windgeschwindigkeit ($\beta = -1.135$, $p < 0.001$) und die Erfassungshöhe ($\beta = -0.813$, $p < 0.001$) wiederum einen stark negativen Effekt auf. Die Nachweiswahrscheinlichkeit nahm also bei stärkerem Wind und mit zunehmender Höhe deutlich ab.

Bezüglich der Strukturtypen ergaben sich ebenfalls signifikante Unterschiede: Die Wahrscheinlichkeit eines Insektennachweises war an WEA-Strukturen höher als an den Messmasten (Messmast West $\beta = 0.833$, $p < 0.001$; Messmast Ost $\beta = 1.405$, $p < 0.001$). Zwischen den Messmasten bestanden auch signifikante Unterschiede und die Wahrscheinlichkeit eines Insektennachweises war an den östlichen Messmasten geringer als an den westlichen

Messmasten ($\beta = -0.572, p = 0.001$). Auch zeitliche Effekte waren signifikant. Der Erfassungsverlauf zeigte einen positiven quadratischen Effekt (linear: $\beta = 0.200, p < 0.001$; quadratisch: $\beta = 0.277, p < 0.001$), was auf eine erhöhte Aktivität zum Ende der Erfassungen hinweist. Die Tageszeit hatte einen glockenförmigen Einfluss auf die Nachweiswahrscheinlichkeit, mit einem Maximum in den frühen Nachmittagsstunden (linear: $\beta = 0.704, p < 0.001$; quadratisch: $\beta = -0.781, p < 0.001$).

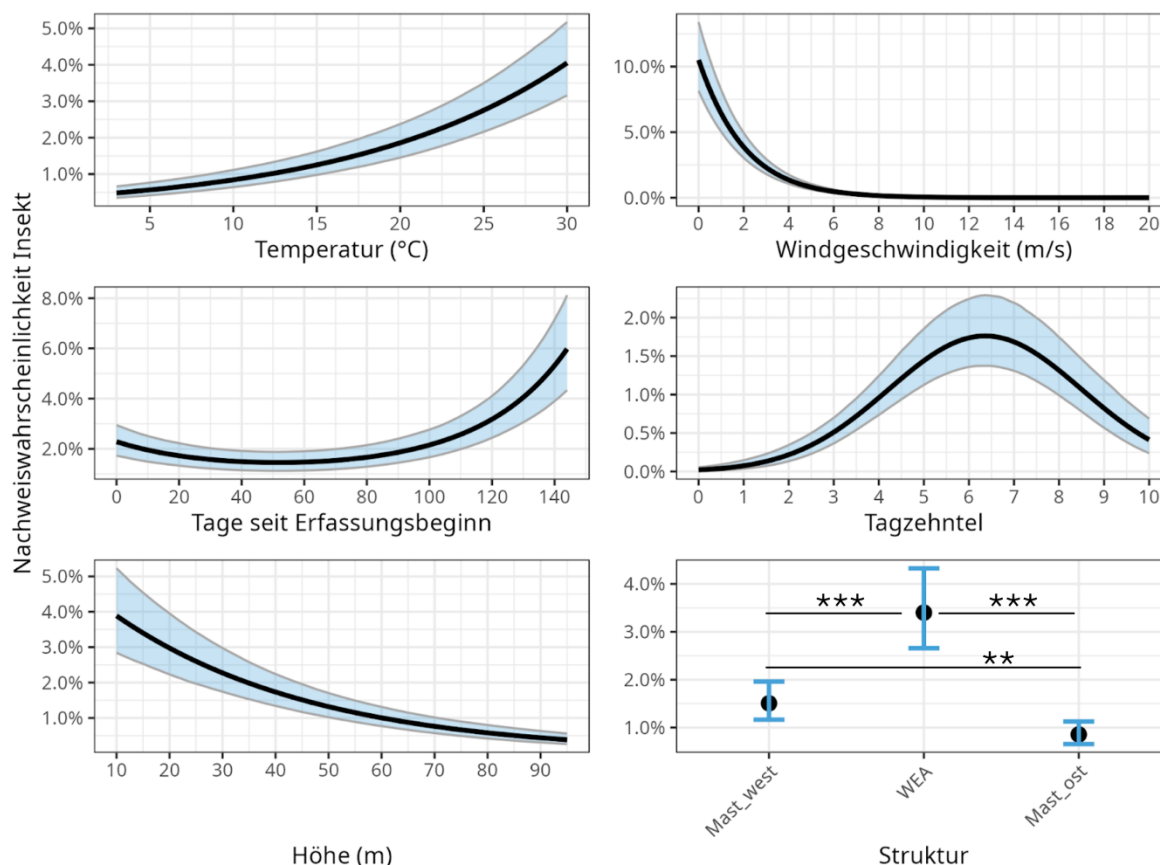


Abb. 151: Modellierte Nachweiswahrscheinlichkeit von Insekten während des Tages in Abhängigkeit von Temperatur, Windgeschwindigkeit, Tage seit Erfassungsbeginn (Jahresverlauf), Tageszehntel (Tageszeit), Erfassungshöhe und Strukturtyp. Dargestellt sind die vorhergesagten Modell-Wahrscheinlichkeiten (schwarze Linien) mit 95 %-Konfidenzintervallen (hellblau). Temperatur, Erfassungszeit und Tageszeit zeigen signifikante positive oder nichtlineare Zusammenhänge. Windgeschwindigkeit und Erfassungshöhe wirken sich negativ aus. Strukturbedingt tritt an den FWEA eine signifikant höhere Nachweiswahrscheinlichkeit im Vergleich zu den Messmasten auf ($p < 0.001$) und an den östlichen Messmasten ist die Nachweiswahrscheinlichkeit geringer als an den westlichen ($p = 0.001$). Höhere Unsicherheiten treten zu meist bei Randbereichen der Prädiktoren auf.

4.3.3.4 Insektenabundanzen tagsüber im Rotorbereich

Beschränkt man sich nur auf den Rotorbereich (> 47 m, d.h. Höhenklasse 3 & 4) so zeigt sich für die tagsüber erfassten Insekten erneut ein signifikant positiver Einfluss der Temperatur auf die Nachweiswahrscheinlichkeit ($\beta = 0.600, p < 0.001$), während die Windgeschwindigkeit ($\beta = -1.026, p < 0.001$) und die Erfassungshöhe ($\beta = -0.535, p = 0.0066$) wiederum einen signifikanten negativen Effekt hatten.

Bei den Strukturtypen fiel die Nachweiswahrscheinlichkeit an FWEA signifikant höher aus als an den Messmasten ($\beta = 1.357, p < 0.001$), während der Unterschied zwischen den Messmasten nicht signifikant war ($\beta = -0.287, p = 0.26$). Der zeitliche Verlauf im Jahr hatte ebenfalls einen positiven, nichtlinearen Effekt auf die Nachweise (linear: $\beta = 0.228, p < 0.001$; quadratisch: $\beta = 0.376, p < 0.001$). Darüber hinaus wurde wiederum ein glockenförmiger Verlauf der Insektenaktivität über den Tageszeitraum festgestellt, mit einem Maximum am frühen Nachmittag (linear: $\beta = 0.934, p < 0.001$; quadratisch: $\beta = -0.977, p < 0.001$).

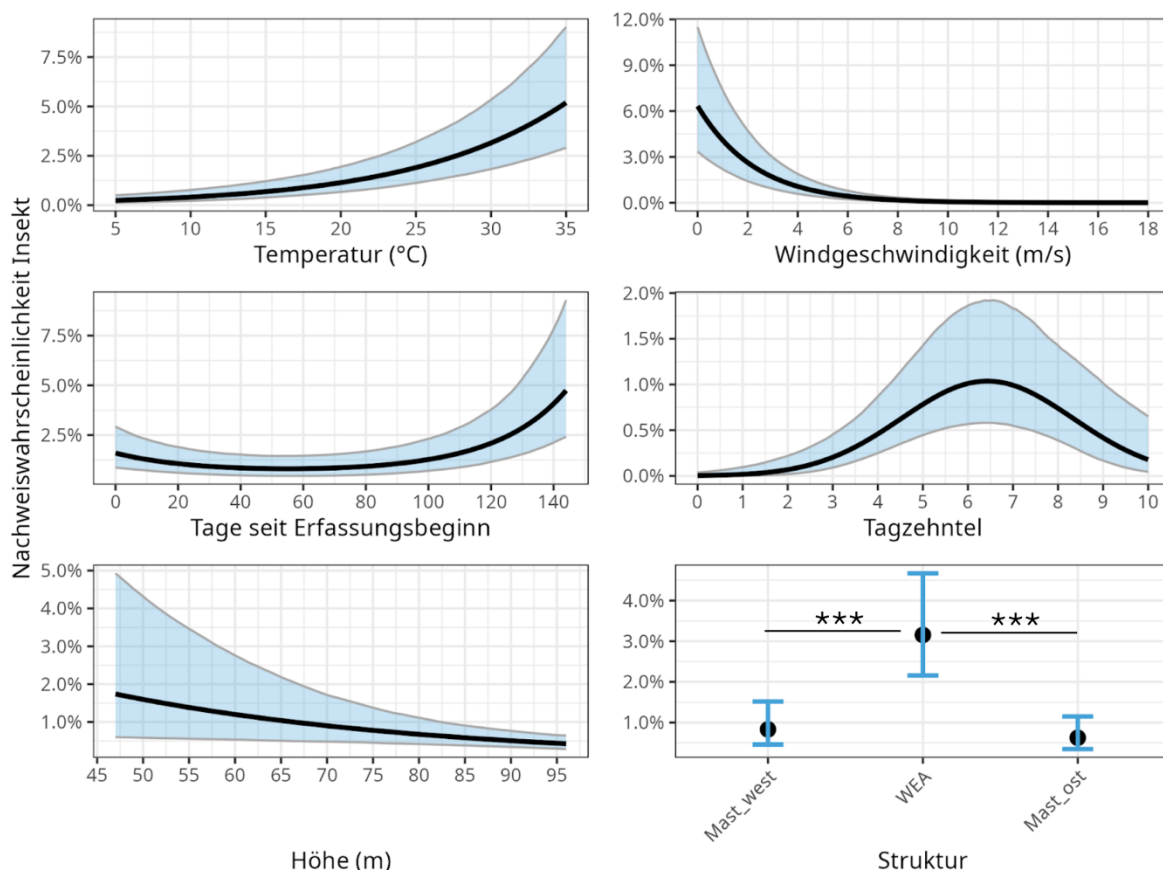


Abb. 152: Modellierte Nachweiswahrscheinlichkeit von Insekten während des Tages im Rotorbereich (> 47 m) in Abhängigkeit von Temperatur, Windgeschwindigkeit, Tage seit Erfassungsbeginn (Jahresverlauf), Tageszehntel (Tageszeit), Erfassungshöhe und Strukturtyp. Dargestellt sind die vorhergesagten Modell-Wahrscheinlichkeiten (schwarze Linien) mit 95 %-Konfidenzintervallen (hellblau). Temperatur und Erfassungsverlauf zeigen positive, teils nichtlineare Effekte. Windgeschwindigkeit und Erfassungshöhe wirken sich negativ aus. Strukturbedingt tritt an den FWEA eine signifikant höhere Nachweiswahrscheinlichkeit im Vergleich zu den Messmasten auf ($p < 0.001$), die Messmasten unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Höhere Unsicherheiten treten zumeist bei Randbereichen der Prädiktoren auf.

4.3.3.5 Fledermausaktivität pro Art und Insektenabundanz

Im Folgenden wurde – bezogen auf das ganze Windtestfeld und über einen gesamten Tag bzw. Nacht – der Zusammenhang zwischen der tagsüber gemessenen Insektenabundanz (Modell 1) bzw. der der nachts gemessenen Insektenabundanz (Modell 2) mit der nächtliche Fledermausaktivität untersucht. Dabei wurden auch die nächtliche Temperatur und Windgeschwindigkeit berücksichtigt. Dieser Zusammenhang wurde einzeln für verschiedene Fledermausarten (Zwergfledermaus, Großer Abendsegler und Raufhautfledermaus) untersucht sowie für die Ruftypgruppe Nyctaloid und die Gattung Myotis.

Die Insektenabundanz wurde hier aus der Summe der maximal detektierten Insekten pro Erfassungsrunde (10 min pro Stunde) gebildet, die im Laufe des Tages bzw. der Nacht erfasst wurden. Die nächtlichen Fledermausdetektionen wurden aufsummiert.

Zwergfledermaus (*Pipistrellus pipistrellus*)

Für die Zwergfledermaus (Ppip) zeigte sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen Insektenabundanz und Fledermausdetektionen (Abb. 153). Sowohl die Insektenaktivität am Tag (Modell 1) als auch die nächtliche Insektenaktivität (Modell 2) beeinflussten die nächtliche Aktivität von Ppip signifikant (Modell 1 $\beta = 0.393$, $p < 0.001$; Modell 2 $\beta = 0.459$, $p < 0.01$). Zusätzlich wirkte sich die Nachttemperatur in beiden Modellen signifikant positiv (Modell 1 $\beta = 0.665$, $p < 0.001$; Modell 2 $\beta = 0.626$, $p < 0.001$), die Windgeschwindigkeit signifikant negativ (Modell 1 $\beta = -0.387$, $p < 0.001$; Modell 2 $\beta = -0.263$, $p < 0.05$) auf die Aktivität von Ppip aus.

Damit zeigt sich, dass neben der gleichzeitigen Insektenverfügbarkeit während der Nacht auch die tageszeitlich vorausgehende Insektenabundanz ein Prädiktor für das nächtliche Verhalten der Zwergfledermaus ist. Außerdem ist die nächtliche Aktivität von Ppip stark von den gegebenen meteorologischen Parametern beeinflusst.

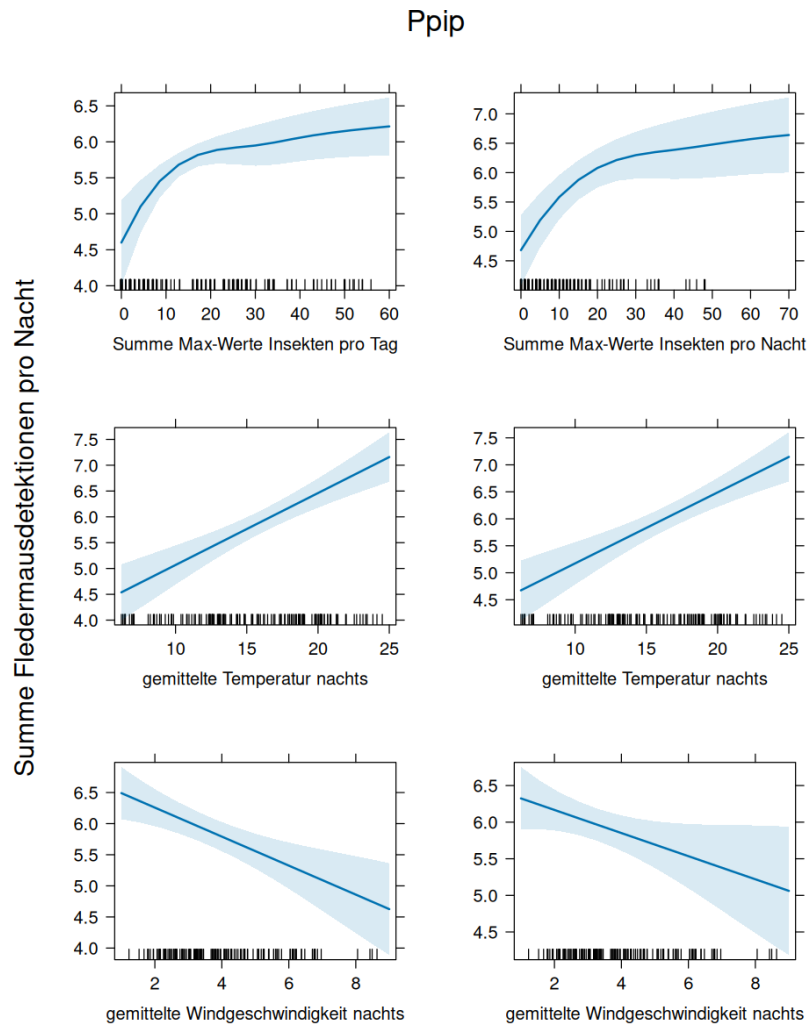


Abb. 153: Zusammenhang zwischen der Aktivität der Zwergfledermaus (Ppip) und der Insektenabundanz am Tag bzw. während der Nacht sowie den nächtlichen Umweltbedingungen (Temperatur und Windgeschwindigkeit). Die blauen Linien zeigen die vorhergesagten Effekte, die hellblauen Bereiche geben die 95 %-Konfidenzintervalle an. Die Datenlage ist durch schwarze Striche auf der X-Achse gekennzeichnet. Links: Modell 1 mit der Insektenabundanz am Tag; Rechts: Modell 2 mit der Insektenabundanz in der Nacht. In beiden Modellen zeigt sich ein signifikanter positiver Zusammenhang zwischen Insektenaktivität und Fledermausdetektionen. Die Nachttemperatur wirkt sich ebenfalls signifikant positiv, die Windgeschwindigkeit signifikant negativ auf die nächtliche Fledermausaktivität aus.

Großer Abendsegler (*Nyctalus noctula*)

Für den Großen Abendsegler (Nnoc) zeigte sich, dass die tagsüber gemessene Insektenaktivität keinen signifikanten Einfluss auf die Aktivität dieser Fledermausart in der Nacht hat (Modell 1 $\beta = -0.112$, $p = 0.493$). Auch in Modell 2 war der Zusammenhang mit der nächtlichen Insektenabundanz nur tendenziell positiv und nicht signifikant ($\beta = 0.382$, $p = 0.074$) (Abb. 154). In beiden Modellen war jedoch die Nachttemperatur ein starker signifikanter positiver Prädiktor für die Aktivität (Modell 1 $\beta = -0.112$, $p < 0.001$; Modell 2 $\beta = 0.928$, $p < 0.001$), während die Windgeschwindigkeit nur im Modell 1 einen schwachen signifikanten negativen Effekt zeigte ($\beta = -0.330$, $p < 0.05$), im Modell 2 war der Effekt nicht signifikant ($\beta = -0.063$, $p = 0.75$).

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die nächtliche Aktivität des Großen Abendseglers weniger eng mit der zeitgleich während der Nacht oder über den Tag gemessenen Insektenabundanz verknüpft ist, dafür aber empfindlich auf Temperaturänderungen reagiert.

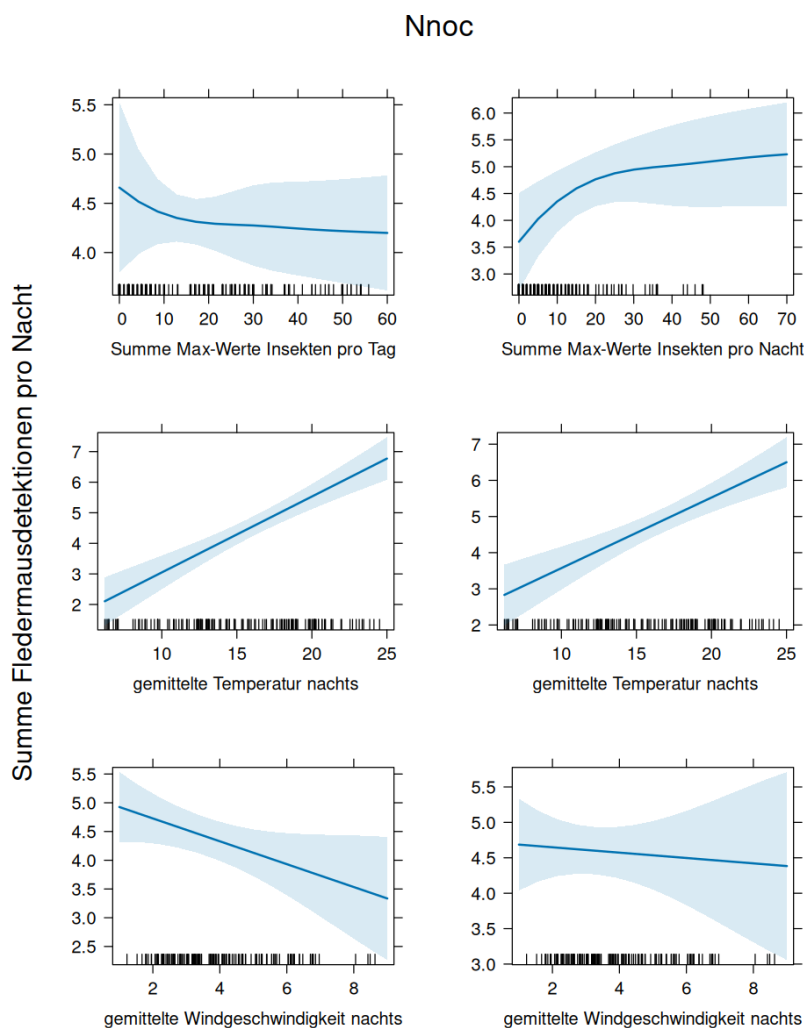


Abb. 154: Zusammenhang zwischen der Aktivität des Großen Abendseglers (Nnoc) und der Insektenabundanz am Tag bzw. während der Nacht sowie den nächtlichen Umweltbedingungen (Temperatur und Windgeschwindigkeit). Die blauen Linien zeigen die vorhergesagten Effekte, die hellblauen Bereiche geben die 95 %-Konfidenzintervalle an. Die Datenlage ist durch schwarze Striche auf der X-Achse gekennzeichnet. Links: Modell 1 mit der Insektenabundanz am Tag; Rechts: Modell 2 mit der Insektenabundanz in der Nacht. In beiden Modellen zeigte sich kein signifikanter Zusammenhang zur Insektenabundanz. Die Nachttemperatur hatte dagegen in beiden Fällen einen signifikant positiven Effekt, während die Windgeschwindigkeit nur in Modell 1 einen schwach signifikant negativen Effekt hatte und Modell 2 nicht signifikant war.

Nyctaloid

Bei der Ruftypgruppe Nyctaloid zeigte sich in Modell 1 ein negativer Zusammenhang zwischen der Insektenabundanz am Tag und der nächtlichen Fledermausaktivität ($\beta = -0.244$, $p = 0.046$). Im Gegensatz dazu war die nächtliche Insektenabundanz in Modell 2 signifikant positiv mit der Aktivität dieser Fledermausgruppe assoziiert ($\beta = 0.652$, $p < 0.001$) (Abb. 155). In beiden Modellen wurde ein positiver Effekt der Nachttemperatur festgestellt, wobei dieser in Modell 1 stärker ausgeprägt war (Modell 1 $\beta = 0.781$, $p < 0.001$; Modell 2 $\beta = 0.326$, $p < 0.01$). Während

die Windgeschwindigkeit in Modell 1 negativ wirkte ($\beta = -0.436$, $p < 0.001$), zeigte sie in Modell 2 keinen signifikanten Einfluss ($\beta = 0.067$, $p = 0.63$).

Insgesamt deutet dies darauf hin, dass die Insektenabundanz während der Nacht für die Nyctaloid-Gruppe eine größere Rolle spielt als die tagsüber gemessene Insektenabundanz.

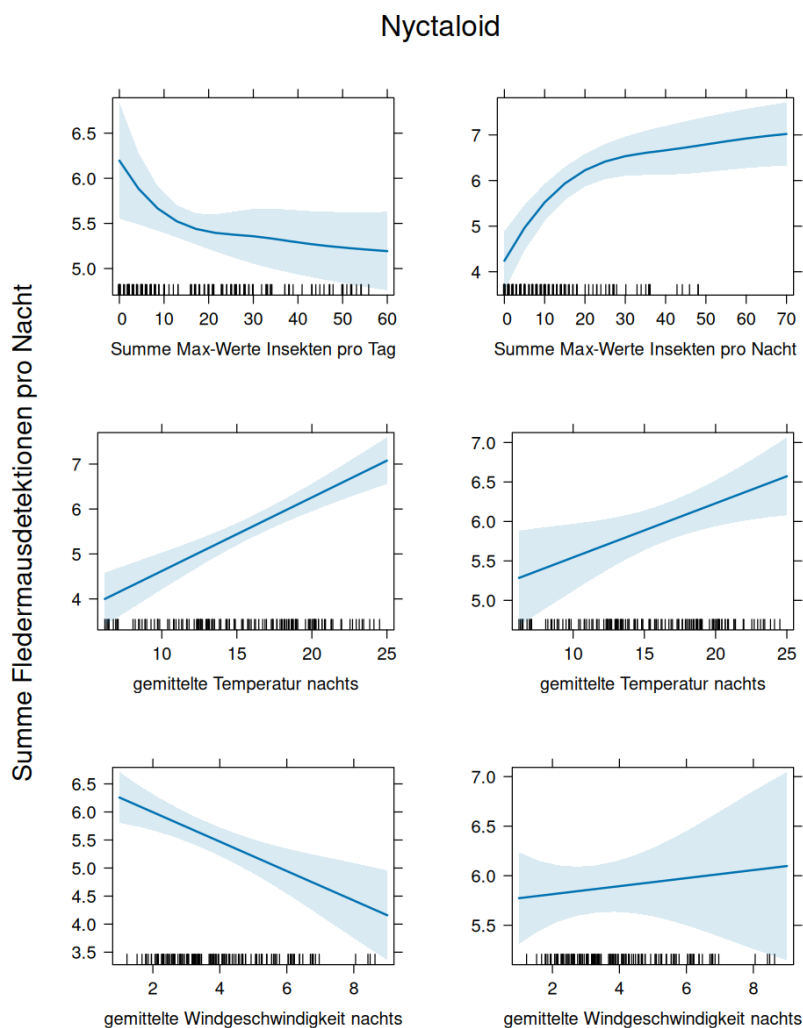


Abb. 155: Zusammenhang zwischen der Aktivität der Artengruppe Nyctaloid und der Insektenabundanz am Tag bzw. während der Nacht sowie den nächtlichen Umweltbedingungen (Temperatur und Windgeschwindigkeit). Die blauen Linien zeigen die vorhergesagten Effekte, die hellblauen Bereiche geben die 95 %-Konfidenzintervalle an. Die Datenlage ist durch schwarze Striche auf der X-Achse gekennzeichnet. Links: Modell 1 mit der Insektenabundanz am Tag; Rechts: Modell 2 mit der Insektenabundanz in der Nacht. In Modell 1 wurde ein signifikanter negativer Zusammenhang zur tagsüber gemessenen Insektenabundanz festgestellt, während in Modell 2 ein signifikanter positiver Effekt der nächtlichen Insektenaktivität erkennbar ist. Die Nachttemperatur beeinflusste die Fledermausaktivität in beiden Modellen positiv. Windgeschwindigkeit wirkte sich nur im ersten Modell negativ aus.

Rauhautfledermaus (*Pipistrellus nathusii*)

Für die Rauhautfledermaus (Pnath) ergab Modell 1 keine signifikanten Effekte: Weder die tagsüber gemessene Insektenabundanz ($\beta = -0.211$, $p = 0.223$) noch die Temperatur ($\beta = -0.111$, $p = 0.545$) oder die Windgeschwindigkeit ($\beta = 0.148$, $p = 0.390$) in der Nacht zeigten einen Zusammenhang mit der nächtlichen Aktivität der Rauhautfledermaus (Abb. 156). In

Modell 2 hingegen zeigte sich ein signifikanter positiver Zusammenhang mit der nächtlichen Insektenaktivität ($\beta = 0.697$, $p = 0.0018$). Darüber hinaus zeigte sich ein unerwartet negativer Zusammenhang mit der Nachttemperatur ($\beta = -0.563$, $p = 0.0025$) sowie ein positiver Effekt der Windgeschwindigkeit ($\beta = 0.678$, $p = 0.0010$).

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich die nächtliche Aktivität von *Pnath* stärker an der zeitgleichen vorherrschenden Insektenabundanz orientiert als an Bedingungen des Vortages. Außerdem reagiert sie auch artspezifisch anders auf Temperatur und Wind als andere Arten.

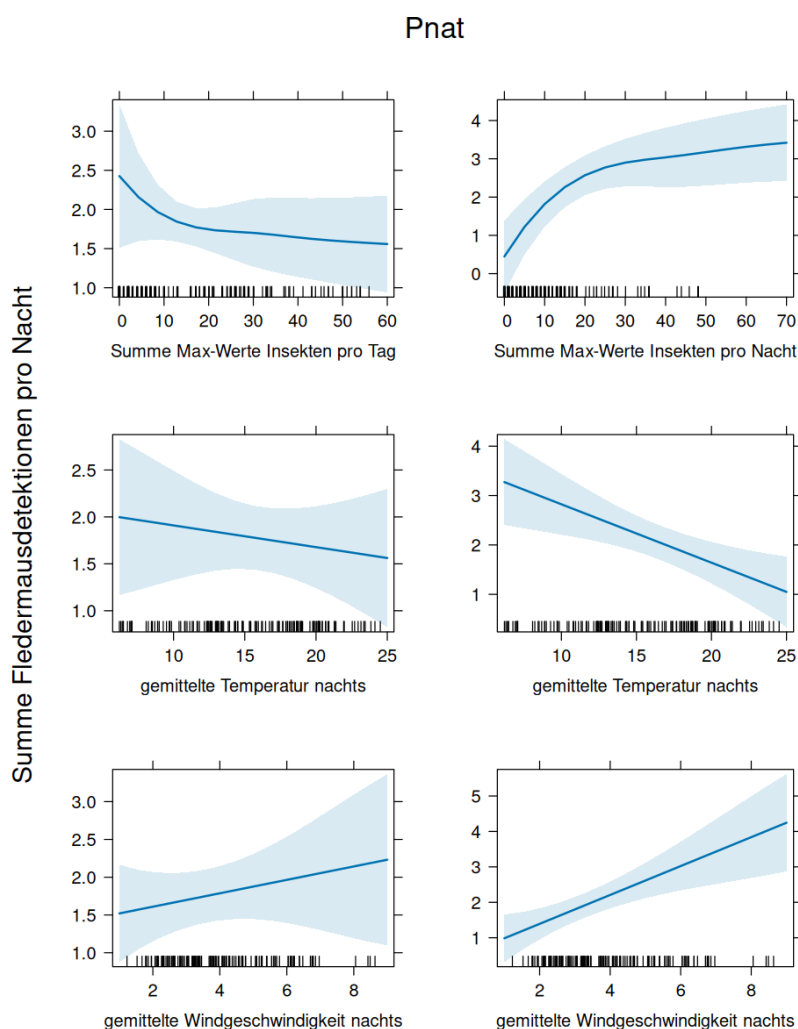


Abb. 156: Zusammenhang zwischen der Aktivität der Rauhaufledermaus (*Pnath*) und der Insektenabundanz am Tag bzw. während der Nacht sowie den nächtlichen Umweltbedingungen (Temperatur und Windgeschwindigkeit). Die blauen Linien zeigen die vorhergesagten Effekte, die hellblauen Bereiche geben die 95 %-Konfidenzintervalle an. Die Datenlage ist durch schwarze Striche auf der X-Achse gekennzeichnet. Links: Modell 1 mit der Insektenabundanz am Tag; Rechts: Modell 2 mit der Insektenabundanz in der Nacht. Während Modell 1 keine signifikanten Effekte zeigte, ergab Modell 2 einen signifikanten positiven Zusammenhang mit der Insektenaktivität, sowie überraschende Effekte von Temperatur (negativ) und Wind (positiv).

Myotis

Für die Gattungsgruppe *Myotis* ergab Modell 1 keinen Zusammenhang mit der tagsüber gemessenen Insektenabundanz ($\beta = -0.008$, $p = 0.921$). Auch in Modell 2 war der Zusammenhang mit der nächtlichen Insektenabundanz nicht signifikant, zeigte aber eine positive Tendenz ($\beta = 0.133$, $p = 0.187$) (Abb. 157). In beiden Modellen war die Nachttemperatur ein starker positiver Prädiktor für die Aktivität von *Myotis*-Arten (Modell 1 $\beta = 0.917$, $p < 0.001$; Modell 2 $\beta = 0.842$, $p < 0.001$), während höhere Windgeschwindigkeiten mit einer signifikant geringeren Aktivität verbunden war – besonders deutlich in Modell 1 (Modell 1 $\beta = -0.273$, $p < 0.001$; Modell 2 $\beta = -0.197$, $p < 0.05$).

Diese Ergebnisse legen nahe, dass *Myotis*-Arten stärker auf Umweltparameter reagieren als auf die hier gemessene Insektenabundanz.

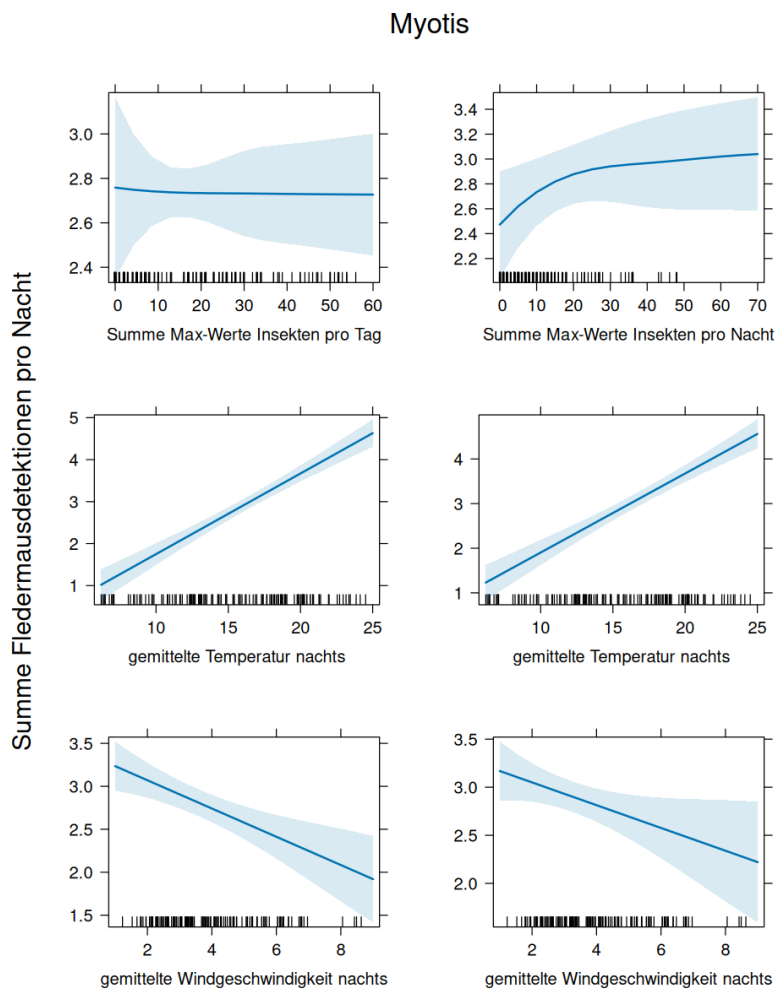


Abb. 157: Zusammenhang zwischen der Aktivität der Gattungsgruppe *Myotis* und der Insektenabundanz am Tag bzw. während der Nacht sowie den nächtlichen Umweltbedingungen (Temperatur und Windgeschwindigkeit). Die blauen Linien zeigen die vorhergesagten Effekte, die hellblauen Bereiche geben die 95 %-Konfidenzintervalle an. Die Datenlage ist durch schwarze Striche auf der X-Achse gekennzeichnet. Links: Modell 1 mit der Insektenabundanz am Tag; Rechts: Modell 2 mit der Insektenabundanz in der Nacht. In beiden Modellen war die Insektenaktivität kein signifikanter Prädiktor. Die Nachttemperatur hatte einen ausgeprägt positiven Einfluss, während die Windgeschwindigkeit in beiden Modellen negativ mit der Fledermausaktivität assoziiert war.

Vergleich zwischen den Fledermausarten

Insgesamt deutet sich beim Vergleich der fünf betrachteten Fledermausarten bzw. -gruppen an, dass gleichzeitige Insektenverfügbarkeit in der Nacht für die meisten Arten bedeutsamer ist als die Insektenabundanz tagsüber (Tab. 27). Die meteorologischen Parameter Temperatur und Wind beeinflussen die Fledermausaktivität zum Teil stark, wobei Temperatur ein konsistenter signifikant positiver Prädiktor ist, mit Ausnahme der Raufhautfledermaus.

Tab. 27: Vergleich der Modellergebnisse zum Einfluss der Insektenabundanz tagsüber und während der Nacht auf die Aktivität der verschiedenen Fledermausarten/-artengruppen. Ppip = Zwergfledermaus, Nnoc = Großer Abendsegler, Pnath = Raufhautfledermaus. Bei den Parametern Temperatur und Wind sind zwei Werte angegeben, wenn sich die Ergebnisse zwischen den beiden Modellen unterschieden (Modell 1/Modell 2).

Art / Artengruppe	Insektenaktivität (tagsüber)	Insektenaktivität (nachts)	Temperatur (nachts)	Wind (nachts)
Ppip	+ (***)	+ (**)	+ (***)	- (***) / - (*)
Nnoc	n. s.	(+) (p = 0.074)	+ (***)	- (*) / n. s.
Nyctaloid	- (*)	+ (***)	+ (***) / + (**)	- (***) / n. s.
Pnath	n. s.	+ (**)	n.s./ - (**)	n.s./ + (***)
Myotis	n. s.	n. s.	+ (***)	- (***) / - (**)

Erklärung: +/- = signifikanter positiver/negativer Effekt; (+) = Tendenz (p<0.1), n.s. = nicht signifikant; * p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001

4.3.3.6 Fledermausaktivität und Insektenpräsenz

Wird die Fledermausaktivität unabhängig von der Art und nur bezogen auf Insektenpräsenz (Insekten vorhanden ja oder nein) innerhalb des 10-minütigen Erfassungsfensters untersucht, so zeigt sich keine signifikante Korrelation (Abb. 158). Unabhängig davon, ob Insekten präsent waren oder nicht, lag die geschätzte Nachweiswahrscheinlichkeit einer Fledermaus bei etwa 65–70 %. Die 95 %-Konfidenzintervalle der beiden Bedingungen überlappen weitgehend, was auf keinen signifikanten Einfluss der Insektenpräsenz auf die Fledermausaktivität in diesem Modell hinweist.

Wird das Modell auf den Rotorbereich (> 47 m Höhenklasse 3 und 4) eingeschränkt, ergibt sich ebenfalls kein signifikanter Einfluss der Insektenpräsenz auf die Wahrscheinlichkeit, dass Fledermäuse detektiert werden. Die geschätzten Nachweiswahrscheinlichkeiten für eine Fledermaus lagen bei beiden Bedingungen („Insekten vorhanden“ vs. „nicht vorhanden“) bei rund 25 % und zeigten stark überlappende Konfidenzintervalle (Abb. 158).

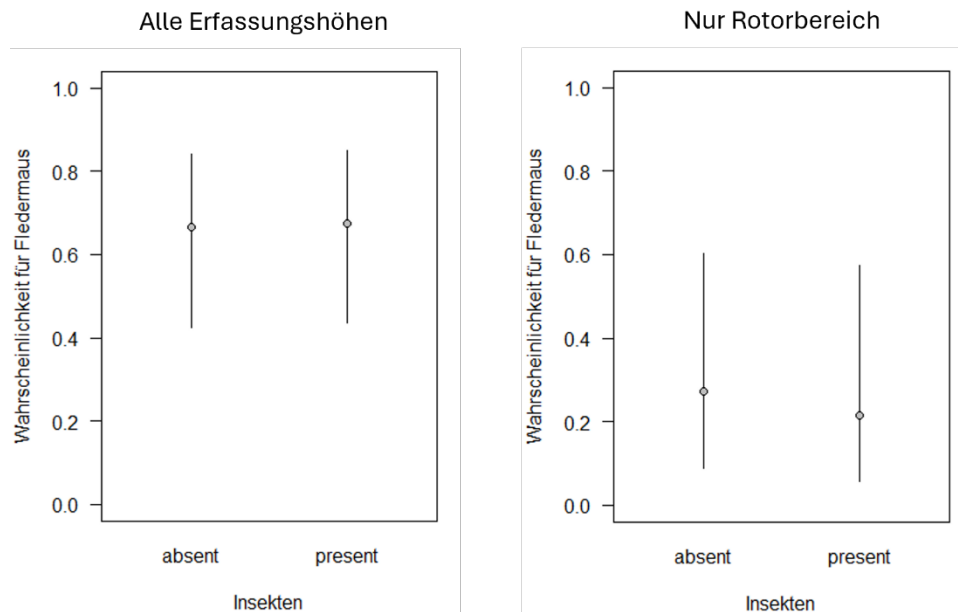


Abb. 158: Modellierte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Fledermäusen pro 10-Minuten-Intervall in Abhängigkeit von der Insektenpräsenz/- absenz über alle Erfassungshöhen sowie im Rotorbereich. Dargestellt sind die vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten mit 95 %-Konfidenzintervallen. Ein Effekt von Insektenpräsenz auf die Nachweiswahrscheinlichkeit einer Fledermaus ist in beiden Modellen nicht erkennbar.

4.3.4 Radar-Daten

Um die gemessene Insektenabundanz mit jener per Radar festgestellten zu vergleichen und auf Übereinstimmungen zu prüfen, wurde modelliert, wie die mittlere, mit den Insektenfotofallen pro Stunde erfasste Insektenanzahl, mit den entsprechenden Radarwerten (getrennt für Tag und Nacht) zusammenhängt (Abb. 148).

Hierbei zeigte sich sowohl tagsüber als auch nachts ein positiver Zusammenhang zwischen der per Insektenfotofalle und der per Radar erfassten Insektenabundanz (Abb. 148), d.h. stieg die Anzahl nachgewiesener Insekten per Radar, dann stieg auch die Anzahl nachgewiesener Insekten per Insektenfotofalle.

Während für die tagsüber erfasste Insektenabundanz ein tendenziell positiver, aber nicht signifikanter Zusammenhang zwischen beiden Methoden bestand ($\beta = 145.2$, $p = 0.067$, $R^2 = 0.024$), zeigte sich für die Nacht ein deutlich signifikanter positiver Zusammenhang ($\beta = 372.7$, $p < 0.001$), wobei auch hier der Erklärungswert¹ deutlich höher war ($R^2 = 0.14$).

¹ R^2 gibt an, wie gut das Modell die Streuung der Daten erklärt. Der Wert liegt zwischen 0 (= das Modell erklärt gar nichts der beobachteten Streuung) und 1 (= das Modell erklärt die Streuung komplett).

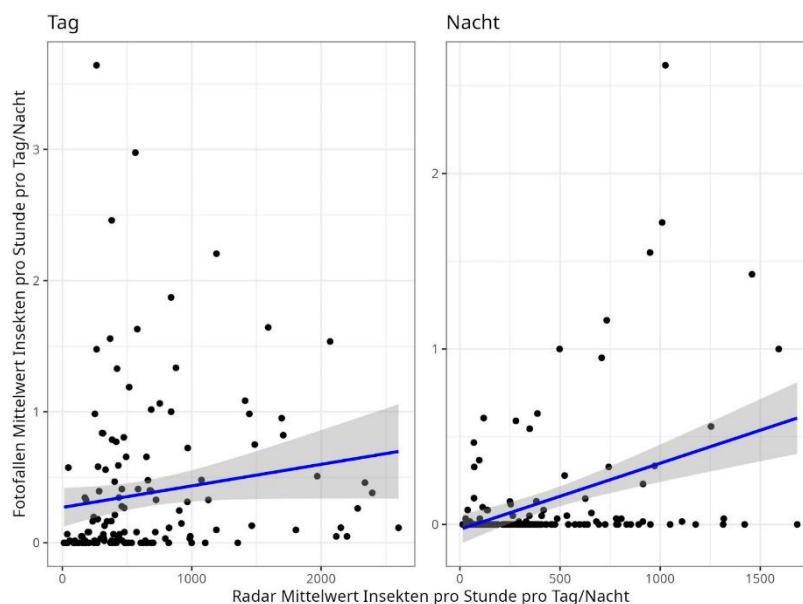


Abb. 159: Zusammenhang zwischen der per Radar und per Fotofalle erfassten mittleren stündlichen Insektenaktivität, getrennt für Tag und Nacht. Die blauen Linien zeigen lineare Regressionsmodelle mit 95 %-Konfidenzintervallen (grau). Es zeigt sich ein positiver Zusammenhang. Dieser ist für die Erfassungen während der Nacht signifikant ($p < 0.001$); für die Erfassungen tagsüber als Tendenz nachweisbar ($p = 0.067$).

4.3.5 DNA-Barcoding

Insgesamt konnten 1.109 OTUs² aus 603.033 Reads identifiziert werden. Die überwiegende Mehrheit (99,5 % aller Reads) wurde den Arthropoden zugeordnet, die gleichzeitig auch taxonomisch am diversesten waren (94 % aller OTUs) (Tab. 28). Innerhalb der Arthropoda entfällt der überwiegende Anteil auf die Klasse Insecta (98,2 % der Arthropoda-Reads), die auch die artenreichste Klasse darstellen (94,5 % der Arthropoda-OTUs) (Tab. 29).

Bei den Insecta wiederum dominieren anteilig (88 % der Insecta-Reads) und taxonomisch (83,7 % der Insecta-OTUs) die Diptera (Fliegen). Taxonomisch bedeutend waren zudem auch die Hemiptera (Wanzen) und Hymenoptera (Bienen/Wespen) (Tab. 30).

Innerhalb der Diptera waren die drei häufigsten (in Summe knapp 70 % der Diptera-Reads) und artenreichsten Familien die Cecidomyiidae (Gallmücken), Ephydriidae (Uferfliegen) und Chironomidae (Zuckmücken) (Tab. 31). Die häufigsten auf Artniveau bestimmbaren Arten waren *Nostima picta*, *Schoenomyza litorella* und *Tanytarsus heusdensis*.

Innerhalb der Hemiptera dominierten mit in Summe ca. 90 % der Hemiptera-Reads die Adelgidae (Tannen-Gallenläuse), die Delphacidae (Reiszikaden) und Aphalaridae (Schaumzikaden) (Tab. 32). Die häufigsten auf Artniveau bestimmbaren Arten waren *Laodelphax striatellus* (Reiskernzikade), *Aphalara avicularis* (Schaumzikade) und *Rhopalosiphum maidis* (Maisblattlaus).

Innerhalb der Hymenoptera konnten mit in Summe knapp 80 % der Hymenoptera-Reads am häufigsten Vertreter der folgenden drei Schlupfwespen-Familien nachgewiesen werden:

² OTU = Einheit, mit der man in DNA-basierten Studien Sequenzenreads zu Gruppierungen zusammenfasst. D.h. sie gibt einen Proxy für Art-Level an, jedoch entspricht eine OTU nicht zwangsläufig einer taxonomischen Art, da von einer Art auch mehrere Sequenzen in einer Referenzdatenbank hinterlegt sein können

Mymaridae, Eulophidae und Pteromalidae (Tab. 33). Die häufigsten auf Artniveau bestimm-
baren Arten waren *Diglyphus isaea* (Gallmücken-Schlupfwespe), *Anagrus atomus* (Ei-Parasito-
idwespe) und *Trichogramma cacaeciae* (Schlupfwespe).

Andere aufschlussreiche Funde in den eDNA sind Nachweise von *Thaumetopoea processionea*
(Eichen-Prozessionsspinner) sowie von *Micrambe abietis*, einer Käferart, die in Fichtenwäl-
dern vorkommt. Außerdem konnte *Meconema meridionale* (Eichenschrecke), ein Vertreter
der Orthoptera, und als einzige Ameisenart *Lasius niger* (Schwarze Wegameise) am Rotorblatt
nachgewiesen werden. Ameisen wurden häufig im Sommer an den unteren Insektenfotofallen
aufgezeichnet.

Tab. 28: Taxonomische Zusammensetzung der Phylum-Nachweise.

Phylum	OTUs	Reads	Bemerkung
Arthropoda	1 013 (94 %)	600 194 (99,5 %)	Gliedertiere
Ascomycota	44 (4 %)	917 (0,15 %)	Pilze (Umweltkontami- nation)
Nematoda	8 (0,7 %)	68 (0,01 %)	Fadenwürmer
Chordata	4 (0,4 %)	290 (0,05 %)	v.a. Blutmahltiere/Kon- tamination
Oomycota, Annelida, Mollusca, Basidiomy- cota, Mucoromycota	je 1–4 (≤ 0,4 %)	≤ 20 (≤ 0,01 %)	geringe Signale

Tab. 29: Taxonomische Nachweise innerhalb des Phylums der Arthropoda.

Klasse	OTUs	Reads	Deutscher Name
Insecta	957 (94,5 %)	591 040 (98,4 %)	Insekten
Arachnida	40 (4,0 %)	8 772 (1,5 %)	Spinnentiere
Collembola	5 (0,5 %)	332 (0,06 %)	Springschwänze
Branchiopoda	2 (0,2 %)	7 (0,001 %)	Wasserfloh-Verwandte

Tab. 30: Taxonomische Nachweise innerhalb der Klasse der Insecta.

Ordnung	OTUs	Reads	Deutscher Name
Diptera	801 (83,7 %)	525 321 (88,8 %)	Fliegen
Hymenoptera	43 (4,5 %)	1 350 (0,2 %)	Bienen, Wespen
Hemiptera	35 (3,7 %)	45 347 (7,7 %)	Wanzen
Thysanoptera	8 (0,8 %)	2 127 (0,4 %)	Thripse
Psocoptera	7 (0,7 %)	7 124 (1,2 %)	Buch- & Staubfloh-ähn- lich
Coleoptera, Lepidoptera, Orthoptera u. a. jeweils < 0,1 % Reads			

Tab. 31: Taxonomische Nachweise innerhalb der Ordnung der Diptera (Fliegen).

Familie	OTUs	Reads	Deutscher Name
Cecidomyiidae	193 (25,9 %)	168 220 (32,8 %)	Gallmücken
Ephydriidae	104 (14,0 %)	50 544 (9,9 %)	Uferfliegen
Chironomidae	97 (13,0 %)	132 237 (25,8 %)	Zuckmücken

Tab. 32: Taxonomische Nachweise innerhalb der Ordnung der Hemiptera (Wanzen)

Familie	OTUs	Reads	Deutscher Name
Adelgidae	6 (20,0 %)	19 055 (42,5 %)	Tannen-Gallenläuse
Delphacidae	1 (3,3 %)	15 684 (35,0 %)	Reiszikaden
Aphalaridae	3 (10,0 %)	5 673 (12,6 %)	Schaumzikaden

Tab. 33: Hymenoptera Anteil aller Insecta Reads 0,2% (33 OTUs, 528 Reads)

Familie	OTUs	Reads	Deutscher Name
Mymaridae	8 (24,2 %)	187 (35,4 %)	Ei-Schlupfwespen
Eulophidae	8 (24,2 %)	160 (30,3 %)	Gallmücken-Schlupfwespen
Pteromalidae	8 (24,2 %)	73 (13,8 %)	Schlupfwespen

4.4 Diskussion

4.4.1 Insektenfotofalle

Bereits in der ersten Projektphase (Musiol et al. 2023) konnte gezeigt werden, dass mit der Insektenfotofalle ein Gerät entwickelt wurde, das den gestellten Anforderungen gerecht wird. Die Insektenfotofalle ist grundsätzlich wetterfest und robust, wie unter anderem auch der problemlose Betrieb in den Wintermonaten 2023/24 demonstrierte. Lediglich die Konstruktion der Lockfläche stellte eine Herausforderung hinsichtlich der extremen Sonnenexposition dar und musste nochmals überarbeitet werden. Hier konnte jedoch eine vielversprechende Lösung gefunden werden, die ein Ablösen und Ausbleichen der Lockflächen verhindert und bei den derzeitigen Erfassungen 2025 zum Einsatz kommt.

Darüber hinaus wurde die in Phase 1 (Musiol et al. 2023) etablierte Funktionskontrolle per Fernzugriff weiter ausgebaut und eine App mit verschiedenen Überwachungs- und Kontrollmöglichkeiten programmiert. Geräteausfälle konnten auf diese Weise schnell identifiziert und die Problembehebung eingeleitet werden. Außerdem war es durch den Fernzugriff möglich, die generierten Daten bereits während den laufenden Erfassungen zu sichten. So konnte bspw. festgestellt werden, dass der Kamera-Arm der Insektenfotofalle gern als Sitzwarte von Greifvögeln genutzt wurde, was teilweise zu Verschmutzungen der Lockfläche führte und die automatisierte Auswertung der Daten erschwerte. Dieses Problem konnte noch innerhalb der Erfassungssaison behoben werden, indem die Insektenfotofallen entsprechend mit Abwehr-Spikes ausgestattet wurden.

Neben den Optimierungen konnte außerdem im Hinblick auf die Methodeneignung basierend auf den Daten der vorliegenden Untersuchung gezeigt werden, dass die lichtintensiven Lockphasen der Insektenfotofallen keinen nachweisbaren Effekt auf die Fledermausaktivität im Windtestfeld hatten und ein derartiger Einfluss auf die erzielten Untersuchungsergebnisse im Projekt ausgeschlossen werden kann. Zudem konnte mit dem Vergleich der Radar-Daten dargestellt werden, dass beide Methoden die allgemein vorherrschende Insektenabundanz gleichermaßen abbilden.

Im Zuge der vorliegenden Untersuchung konnte außerdem die automatisierte Auswertung basierend auf einem KI-Modell zur Objekterkennung etabliert werden. Dieser Schritt war nötig, um die enorme generierte Datenmenge analysierbar zu machen. Falschdetektionen konnten durch die angewendeten Post-Processing-Filter weitestgehend minimiert werden und die Vorhersagegenauigkeit des Modelles betrug 80 %. Damit wurde ein durchaus gängiger Wert erreicht, der auch in anderen Modellen zur Anwendung kommt (z.B. BirdNet (Wood, Kahl 2024)). Für die zukünftige Auswertung wird angestrebt, das Potenzial der automatisierten Auswertung im Hinblick auf eine qualitative Analyse weiter auszuschöpfen, um letztlich eine automatisierte Klassifizierung des detektierten Insekts direkt auf den Geräten zu realisieren.

Die Konstruktionsoptimierungen sowie die Etablierung der automatisierten Auswertung machen die Insektenfotofalle insgesamt zu einer innovativen, nicht-invasiven Alternative gegenüber anderen gängigen Methoden zur Insekten Erfassung. Im Besonderen, da bereits in der ersten Projektphase (Musiol et al. 2023) dargestellt werden konnte, dass vergleichbare Ergebnisse wie mit Klebefallen, Trichterfallen (Trusch et al. 2020) oder Saugfallen (De Jong et al. 2019) bei ähnlichen Untersuchungen an WEA erzielt wurden.

4.4.2 Insektenabundanz

Die Ergebnisse der aktuellen Untersuchungsphase zeigen deutliche saisonale Schwankungen in der Insektenabundanz. Ab Mitte Mai konnten Insekten häufiger nachgewiesen werden, wobei hier berücksichtigt werden muss, dass ab Mai zusätzlich auch die Insektenfotofallen an den Türmen der FWEA installiert waren und den Effekt verzerren könnten. Die meisten Nachweise wurden zwischen Juli und September erbracht. Vereinzelt konnten zudem auch Aktivitätspeaks im Oktober festgestellt werden, wobei hierfür vermutlich vor allem günstige Temperaturbedingungen ursächlich sind. Insgesamt scheinen die Daten plausibel und ein Höhepunkt der Insektenaktivität über die Sommermonate wurde erwartet. Die Abhängigkeit der Insektenabundanz von den meteorologischen Faktoren Temperatur und Windgeschwindigkeit konnte bereits in Phase 1 bestätigt werden, deckt sich mit den Vergleichsstudien an WEA (De Jong et al. 2019; Trusch et al. 2020) und ist ein in der Literatur allgemein vielfach beschriebenes Phänomen (z. B. Gilbert, Raworth 1996; Logan et al. 2006; Régnière et al. 2012; Ruczyński et al. 2020; Jonason et al. 2014). Trotzdem könnten mit den einheitlichen Erfassungen (alle Geräte sind installiert) der laufenden Saison 2025 jahreszeitliche Effekte ggf. besser und feiner differenziert abgebildet werden.

Vor dem Hintergrund der meteorologischen Faktoren lassen sich auch die festgestellten Unterschiede zwischen den Tag- und Nachterfassungen erklären sowie die Unterschiede der gemessenen Insektenabundanz im Tages- bzw. Nachtverlauf. Tagsüber wurden insgesamt häufiger Insekten festgestellt als während der Nachtstunden. Innerhalb des Tagesverlaufs erreichte die Insektenaktivität ihren Höhepunkt insbesondere am frühen Nachmittag; während der Nachtstunden hingegen zeigte sich erhöhte Aktivität vor allem zum Beginn und zum Ende der Nacht. Diese Beobachtungen lassen sich sehr wahrscheinlich auf Zusammenhänge mit der

vorherrschenden Umgebungstemperatur zurückführen, wobei die Umgebungstemperatur allein nicht alle Unterschiede erklärt und hier möglicherweise die Oberflächentemperaturen an den verschiedenen Strukturen einen Einfluss auf die Insektenaktivität haben.

Neben diesen meteorologischen Zusammenhängen konnte ebenfalls – wie schon in Phase 1 (Musiol et al. 2023) – erneut bestätigt werden, dass sich die Insektenabundanz mit zunehmender Erfassungshöhe reduzierte, was auch in den Vergleichsstudien von De Jong et al. (2019) als auch Trusch et al. (2020) festgestellt werden konnte.

Ein interessantes Ergebnis der vorliegenden zweiten Untersuchungsphase ist, dass sich die nachgewiesene Insektenabundanz sowohl räumlich innerhalb des Windtestfelds als auch zwischen den Strukturtypen unterscheidet. Sowohl tagsüber als auch nachts wurden an den westlich gelegenen Strukturen mehr Insektennachweise erbracht als an den östlichen Standorten. Zudem konnten während des Tages mehr Insektennachweise an den FWEA im Vergleich zu den Messmasten erbracht werden, wobei an den Messmasten tendenziell kleinere Insekten erfasst wurden als an den FWEA. Dieses Ergebnis ist auch vor dem Hintergrund interessant, dass der Vergleich mit den erhobenen Insektenabundanzen per Radar eine deutliche positive Korrelation zeigt. Dies lässt darauf schließen, dass allgemein eine höhere Insektenabundanz vorherrscht, wenn stationär auf den Insektenfotofallen an den verschiedenen Strukturen eine größere Insektenabundanz aufgezeichnet wird.

Als mögliche Ursachen sind verschiedene Faktoren denkbar: Mikrometeorologische Unterschiede, beispielsweise geringere Windgeschwindigkeiten oder bessere Windabschattung an den FWEA, könnten insbesondere für größere Insekten attraktiv sein. Standortabhängige Faktoren wie Vegetation und Relief könnten ebenfalls von Bedeutung sein, insbesondere da im Westen der Untersuchungsfläche eine ausgeprägte Waldstruktur sowie eine Abbruchkante vorliegen, welche die lokalen Bedingungen hinsichtlich Temperatur und Wind stark beeinflussen könnten. Außerdem könnten die vorhandenen Vegetationsunterschiede auch im Hinblick auf die bevorzugte Nutzung als Nahrungs- und Reproduktionshabitat eine Rolle spielen und so die Insektenabundanz in dieser Region positiv beeinflussen. Zudem spielen tageszeitabhängige Effekte wie Verschattung und Besonnung der Strukturen eine Rolle: Die hellen, weißen Oberflächen der FWEA könnten sich tagsüber schneller erwärmen und die Wärme länger halten, was möglicherweise attraktiv für wärmeliebende und größere Insekten ist. Auch ist denkbar, dass die weiße Farbgebung der FWEA von Bedeutung ist und speziell Fliegen-Arten stärker anziehen.

Hierzu liefern die Befunde des durchgeführten DNA-Barcoding erste Hinweise und bestätigen als dominierende nachgewiesene Insektenordnung die Diptera (Fliegen). Diese konnten auch auf den Bildern der an den FWEA installierten Insektenfotofallen vermehrt festgestellt werden – im Besonderen in den oberen beiden Erfassungshöhen – wie eine stichprobenhafte manuelle Sichtung ergab. Da sich die Ergebnisse des DNA-Barcoding auch insgesamt sehr gut mit vergleichbaren Studien (Weschler, Tronstad 2024) decken, in denen ebenfalls die dominierenden drei Ordnungen von den Diptera, Hymenoptera und Hemiptera gebildet wurden, kann auf eine vergleichsweise hohe Verlässlichkeit der Befunde geschlossen werden.

4.4.3 Insektenabundanz und Fledermausaktivität

Auch hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen der vorherrschenden Insektenabundanz und der gemessenen Fledermausaktivität konnten interessante Ergebnisse erzielt werden: Betrachtet man – unabhängig von der Struktur, der Erfassungshöhe sowie der saisonalen Erfassungszeit, jedoch unter Berücksichtigung von Temperatur und Windgeschwindigkeit –

einerseits die insgesamt vorherrschende Insektenabundanz über den Tag und die Fledermausaktivität in der darauffolgenden Nacht sowie andererseits die nächtliche Insektenabundanz und die zeitgleiche Fledermausaktivität, ergibt sich für verschiedene Fledermausarten bzw. Artengruppen ein differenziertes Bild.

Für die Zwergfledermaus (*Pipistrellus pipistrellus*) konnte sowohl tagsüber als auch nachts ein signifikanter positiver Einfluss der Insektenabundanz auf die Fledermausaktivität nachgewiesen werden. Ähnliche, wenn auch weniger ausgeprägte Effekte zeigten sich für die Arten der Nyctaloid-Ruftyppgruppe in der Nacht, während tagsüber hier überraschenderweise ein leicht negativer Zusammenhang vorlag. Für den Großen Abendsegler (*Nyctalus noctula*) deutete sich nachts lediglich eine Tendenz zu einem positiven Zusammenhang mit der Insektenabundanz an, während tagsüber kein signifikanter Zusammenhang festgestellt wurde. Die Myotis-Arten hingegen zeigten keinerlei signifikanten Zusammenhang zur Insektenabundanz, weder tags noch nachts. Bei der Rauhautfledermaus (*Pipistrellus nathusii*) ergab sich ein signifikanter positiver Effekt nur während der Nachtstunden.

Insgesamt legen diese Ergebnisse nahe, dass die Insektenaktivität nachts für die Fledermausaktivität bedeutender zu sein scheint als tagsüber. Wie jedoch bei der Zwergfledermaus gezeigt, kann die Insektenabundanz am Tag ein Proxy für die Fledermausaktivität in der darauffolgenden Nacht sein. Beobachtungen aus dem AP4 legen nahe, dass Fledermäuse an der Struktur Insekten absammeln. Dies könnte ein Hinweis auf den direkten Zusammenhang zwischen tagaktiven Insekten und der nächtlichen Fledermausaktivität sein.

Die Temperatur erwies sich für nahezu alle untersuchten Fledermausarten als maßgeblich, wie vielfach untersucht und in AP 3 umfassend dargelegt. Wobei hervorzuheben ist, dass die Rauhautfledermaus einen überraschend negativen Effekt der Temperatur zeigte, gleichzeitig aber eine positive Korrelation mit der Windgeschwindigkeit aufwies. Da die Rauhautfledermaus besonders häufig zur Zugzeit im Herbst nachgewiesen wird, wodurch ihre Aktivität bei niedrigen Temperaturen und höheren Windgeschwindigkeiten bedingt ist, gilt sie als besonders wetterrobuste Art (Brinkmann et al. 2011).

Eine Analyse der reinen Präsenz- oder Absenzdaten von Insekten über die kurzen Erfassungszeiträume (10 Minuten) ergab hingegen keinen signifikanten Zusammenhang zur Fledermausaktivität. Dies könnte mehrere Ursachen haben: Die hohe zeitliche Auflösung, bedingt durch die kurzen Beprobungszeiträume, führt zwangsläufig zu mehr „Null“-Nachweisen und maskiert dadurch möglicherweise bestehende Effekte. Weiterhin ist das Maß Präsenz/Absenz eventuell zu grob gewählt, da nicht berücksichtigt wird, wie viele Insekten tatsächlich vorhanden sind. Zudem könnte der Einfluss der Insektenpräsenz im statistischen Modell verloren gehen, da sehr viele Variablen berücksichtigt wurden. Eine weitere Erklärung könnte sein, dass durch das Poolen aller Fledermausarten, einschließlich der weitreichenden Rufe des Großen Abendseglers, feinere Effekte einzelner Arten verdeckt wurden. Aus diesen Gründen wäre eine detaillierte Betrachtung von Zählraten möglicherweise informativer. Jedoch wurde im Sinne der Vergleichbarkeit mit den Analysen aus AP 3 und der vorliegenden Datenlage bewusst an dem binomialen Modellansatz festgehalten. Für die zukünftigen Auswertungen wird aber angestrebt, bei ausreichender Datenlage die Zählraten zu berücksichtigen, um hier eine feinere Auflösung der Zusammenhänge - auch vor dem Hintergrund der verschiedenen Einflussfaktoren - zu erzielen.

4.4.4 Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in dieser Untersuchungsphase vorgenommenen methodischen Optimierungen sowie die umfassende Datenanalyse zu einem besseren Verständnis der Insektenabundanzmuster und ihrer Korrelation mit der Fledermausaktivität beigetragen haben. Die entwickelte Insektenfotofalle erwies sich als robuste und innovative Methode, deren Zuverlässigkeit und Funktionsfähigkeit mit der Etablierung der automatisierten Auswertung weiter gesteigert werden konnte.

Es bestätigten sich erneut wesentliche meteorologische Zusammenhänge mit der Insektenabundanz. Neu konnten Unterschiede der Abundanzmuster hinsichtlich der Struktur und der räumlichen Erfassungspositionen aufgezeigt werden. Hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Insekten- und artspezifischer Fledermausaktivität zeigte sich, dass vor allem nachts eine signifikante Beziehung besteht. Jedoch konnte für die Zwergfledermaus nachgewiesen werden, dass auch die Insektenabundanz am Tag im Zusammenhang mit der nächtlichen Aktivität dieser Art stand.

Die erzielten Ergebnisse liefern wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Untersuchungen und unterstreichen die Relevanz einer detaillierten Betrachtung von Einflussfaktoren. Jedoch ließe sich die Datenlage – und damit auch die Aussagekraft – mit weiteren Erfassungen deutlich verbessern, im Besonderen betrifft dies Daten aus dem Gondelbereich der FWEA, die in der vorliegenden Untersuchung nur über einen vergleichsweise kurzen Zeitraum vorliegen (ab September 2024). Darüber hinaus wird aus den angestrebten vergleichenden Untersuchungen an den FWEA während der Betriebs- und Nicht-Betriebsphasen ein wichtiger Beitrag zum vertiefenden Verständnis des Zusammenhangs zwischen Insektenabundanz und Fledermausaktivität erwartet.

Literaturverzeichnis

- Amarathunga D.C., Grundy J. et al. (2021): Methods of insect image capture and classification: A systematic literature review. *Smart Agricultural Technology* 1: 100023.
- American Meteorological Society (2025): Glossary of Meteorology. Gust. URL: <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Gust> (letzter Zugriff am: 09.05.2025).
- Aschwanden, J., Helm, B. (2024a): Erprobung BirdRecorder. Naturschutzbegleitforschung (NatFor-WINSENT-II) auf dem Testfeld des WindForS. Sempach: 22 S.
- Aschwanden, J., Helm, B. (2024b): Erprobung BPS Long-Range – Naturschutzbegleitforschung (NatFor-WINSENT-II) auf dem Testfeld des WindForS.
- Aschwanden, J., Stark, H., Liechti, F. (2024): Flight behaviour of Red Kites within their breeding area in relation to local weather variables: Conclusions with regard to wind turbine collision mitigation. *Journal of Applied Ecology* 2024.
- Bates D., Mächler M. et al. (2014): Fitting linear mixed-effects models using lme4. arXiv preprint arXiv:1406.5823
- Behr, O., Brinkmann, R., Hochradel, K., Hurst, J., Mages, J., Korner-Nievergelt, F., Reers, H., Simon, R., Stiller, F., Weber, N. & Nagy, M. (2018): Bestimmung des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen in der Planungspraxis - Endbericht des Forschungsvorhabens gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. –: 416 S.
- Behr, O., Brinkmann, R., Korner-Nievergelt, F., Nagy, M., Niermann, I., Reich, M. & Simon, R. (2016): Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore Windenergieanlagen (RENEBAT II): Ergebnisse eines Forschungsvorhabens. – Hannover (Repositorium der Leibniz Universität Hannover (Umwelt und Raum; 7)): 374 S.
- Bjerge K., Nielsen J.B. et al. (2021): An Automated Light Trap to Monitor Moths (Lepidoptera) Using Computer Vision-Based Tracking and Deep Learning. *Sensors* 21(2): 343. DOI: 10.3390/s21020343
- Braun, M. (2003): Raufhautfledermaus *Pipistrellus nathusii* (Keyserling & Blasius, 1839). – In: Braun, M. & Dieterlen, F. (Hrsg.): Die Säugetiere Baden-Württembergs. – Stuttgart (Ulmer-Verlag): 569-578.
- Braun, M. & Dieterlen, F. (2003): Die Säugetiere Baden-Württembergs. 1: Allgemeiner Teil, Fledermäuse (Chiroptera). – Stuttgart (Ulmer): 687 S.
- Braun, M. & Häußler, U. (2003): Kleiner Abendsegler *Nyctalus leisleri* (Kuhl, 1817). – In: Braun, M. & Dieterlen, F. (Hrsg.): Die Säugetiere Baden-Württembergs, Band 1. – Stuttgart (Ulmer-Verlag): 623-633.
- Brinkmann, R., Behr, O., Niermann, I. & Reich, M. (2011): Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen. – Göttingen (Cuvillier Verlag): 457 S.
- Bruderer, B., Peter, D., Boldt, A., Liechti, F. (2010): Wing-beat characteristics of birds recorded with tracking radar and cine camera. *Ibis* 152: 272-291.
- Bürkner, P.-C. (2017): brms. An R Package for Bayesian Multilevel Models Using Stan. *Journal of Statistical Software* 80 (1).
- Carpenter, B., Gelman, A., Hoffman, M., Lee, D., Goodrich, B., Betancourt, M., Brubaker, M., Guo, J., Li, P., Riddell, A. (2017): Stan. A Probabilistic Programming Language. *Journal of Statistical Software* 76.
- Cryan, P. M. (2008): Mating Behavior as a Possible Cause of Bat Fatalities at Wind Turbines. – *Journal of Wildlife Management* 72: 845-849.

- Cryan, P. M. & Barclay, R. M. R. (2009): Causes of bat fatalities at wind turbines: hypotheses and predictions. – *Journal of Mammalogy* 90: 1330-1340.
- Cryan, P. M., Gorresen, P. M., Hein, C. D., Schirmacher, M. R., Diehl, R. H., Huso, M. M. P., Hayman, D. T. S., Fricker, P. D., Bonaccorso, F. J. & Johnson, D. H. (2014): Behavior of bats at wind turbines. – *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111: 15126-15131.
- De Jong J., Håstad O. et al. (2019): Aktivitet av fladdermöss och insekter vid ett vindkraftverk Naturvårdsverket
- Dechmann, D. K. N., Wikelski, M., Ellis-Soto, D., Safi, K. & O'mara, M. T. (2017): Determinants of spring migration departure decision in a bat. – *Biology Letters* 13: 20170395.
- Deutscher Wetterdienst (2025): Wetterlexikon. Bö. URL: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/B/Boe.html;jsessionid=8C7F826E5ABC4AC0C7B1075064F23B3C.live11042> (letzter Zugriff am: 09.05.2025).
- Diestelhorst O., Maas Enriquez K. et al. (2014): Untersuchungen zur Attraktivität von mit Leuchtfarben lackierten Farbschalen. *Journal of the Kansas Entomological Society* 78: 373–380.
- Dietz, C., Von Helvesen, O. & Nill, D. (2007): *Handbuch der Fledermäuse Europas und Nordwestafrikas*. – Stuttgart (Kosmos-Verlag): 399 S.
- Dürr, T. (2025): Fledermausverluste an Windenergieanlagen in Deutschland. Dokumentation aus der zentralen Datenbank der Staatlichen Vogelschutzwarte im Landesamt für Umwelt Brandenburg. – URL: <https://lfu.brandenburg.de/lfu/de/aufgaben/natur/artenschutz/vogelschutzwarte/arbeits-schwerpunkt-entwicklung-und-umsetzung-von-schutzstrategien/auswirkungen-von-windenergieanlagen-auf-voegel-und-fledermaeuse/> (gesehen am 28.04.2025).
- Furmankiewicz, J. (2003): The vocal activity of *Pipistrellus nathusii* (Vespertilionidae) in SW Poland. – *Acta Chiropterologica* 5: 97-105.
- Gabry, J., Veen, D. (2022): shinytan: Interactive Visual and Numerical Diagnostics and Posterior Analysis for Bayesian Models. R package version 2.6.0. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=shinytan> (gesehen am: 22.06.2023).
- Geissmann Q., Abram P.K. et al. (2022): Sticky Pi is a high-frequency smart trap that enables the study of insect circadian activity under natural conditions. *PLoS biology* 20(7): e3001689.
- Gémard, C., Duriez, O., Chappe, O., Duclos, G., Besnard, A. (2025): Towards a better understanding of avian collision in wind energy facilities using automatic detection systems. *Journal of Applied Ecology* 2025.
- Gilbert N., Raworth D.A. (1996): Insects and temperature—a general theory. *The Canadian Entomologist* 128(1): 1–13.
- Guest, E., Stamps, B., Durish, N., Hale, A., Hein, C., Morton, B., . . . Fritts, S. (2022). An updated review of hypotheses regarding bat attraction to wind turbines. *Animals*, 12, 343.
- Häußler, U. & Nagel, A. (2003): Großer Abendsegler *Nyctalus noctula* (Schreber, 1774). – In: Braun, M. & Dieterlen, F. (Hrsg.): *Die Säugetiere Baden-Württembergs - Band 1*. – Stuttgart (Ulmer-Verlag): 591-622.
- Happ, C., Sutor, A., & Hochradel, K. (2021). Methodology for the Automated Visual Detection of Bird and Bat Collision Fatalities at Onshore Wind Turbines. *Journal of Imaging*, 7(12):272.
- Happ, C., Sutor, A., & Hochradel, K. (2024). UAV-Based 3D-Calibration of Thermal Cameras for Bat Flight Monitoring in Large Outdoor Environments. *Remote Sensing*, 16(24):4682.
- Harris B., Braman S., Pennisi S. (2017): Pan trap designs for monitoring pollinators and other beneficial insects in conservation gardens. *Journal of Entomological Science* 52(1): 9–14.

- Hochradel K, A. U. (2015). Wärmeoptische 3D-Erfassung von Fledermäusen im Rotorbereich von Windenergieanlagen. In R. B.-N. Oliver Behr, Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen (RENEBAT II) (pp. 81-100). Hannover: Schriftenreihe Institut für Umweltplanung, Leibniz Universität Hannover.
- Hurme, E., Lenzi, I., Wikelski, M., Wild, T. A. & Dechmann, D. K. N. (2025): Bats surf storm fronts during spring migration. – *Science* 387: 97-102.
- Hurme, E. R., Wild, T. A., Lenzi, I., Wikelski, M. & Dechmann, D. K. N. (2024). Common noctules migrate by surfing warm fronts ahead of bad weather. European Bat Research Symposium. Tarragona.
- Jahelková, H. & Horáček, I. (2011): Mating system of a migratory bat, *Nathusius' pipistrelle* (*Pipistrellus nathusii*): different male strategies. – *Acta Chiropterologica* 13: 123-137.
- Jahelková, H., Ihoráček, I. & Bartonicka, T. (2008): The advertisement song of *Pipistrellus nathusii* (Chiroptera, Vespertilionidae): a complex message containing acoustic signatures of individuals. – *Acta Chiropterologica* 10: 103-126.
- Jonason D., Franzén M., Ranius T. (2014): Surveying Moths Using Light Traps: Effects of Weather and Time of Year R. M. Brigham (Hrsg.): *PLoS ONE* 9(3): e92453. DOI: 10.1371/journal.pone.0092453
- Lagerveld, S., Wilkes, T., Van Puijenbroek, M. E., Noort, B. C. & Geelhoed, S. C. (2023): Acoustic monitoring reveals spatiotemporal occurrence of *Nathusius' pipistrelle* at the southern North Sea during autumn migration. – *Environmental Monitoring and Assessment* 195: 1016.
- Limpens, H. & Kapteyn, K. (1991): Bats, their behaviour and linear landscape elements. – *Myotis* 29: 39-48.
- Logan J.D., Wolesensky W., Joern A. (2006): Temperature-dependent phenology and predation in arthropod systems. *Ecological modelling* 196(3–4): 471–482.
- Marckmann, U. (2020): Bestimmung von Fledermausrufaufnahmen und Kriterien für die Wertung von akustischen Artnachweisen Teil 1 – Gattungen *Nyctalus*, *Eptesicus*, *Vespertilio*, *Pipistrellus* (nyctaloide und pipistrelloide Arten), Mopsfledermaus, Langohr-fledermäuse und Hufeisennasen Bayerns. – Augsburg (Bayerisches Landesamt für Umwelt).
- Marques, A., Batalha, H., Rodrigues, S., Costa, H., Pereira, M., Fonseca, C., Mascarenhas, M., Bernardino, J. (2014): Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation* 179: 40-52.
- Meschede, A., Schorcht, W., Karst, I., Biedermann, M., Fuchs, D., Bontadina, F. (2017): Wanderrouen der Fledermäuse. Abschlussbericht zum F+E-Vorhaben „Identifizierung von Fledermauswanderrouen und -korridoren“ (FKZ 3512 86 0200). BfN-Skripten 453.
- Musiol, F., Anger, J., Stark, H., Aschwanden, J., Liechti, F., Lütke, B., Hurst, J., Schauer-Weisshahn, H., Hochradel, K., Happ, C. (2023): Umsetzung der Naturschutzforschung am Windtestfeld an Land. NatForWINSSENT-II: Phase 1 – Vorher-Untersuchungen BfN-Schriften 649 - (Bundesamt für Naturschutz).
- P.M. Cryan, P. G. (2014). Behavior of bats at wind turbines. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 111 (42) 15126-15131.
- Panzeri, M., Tattoni, C., Pini, E., Preatoni, D. G., Martinoli, A. & Spada, M. (2024). Environmental factors driving bat migration through the Alps. European Bat Research Symposium. Tarragona.
- R Core Team (2024): R: A language and environment for statistical computing.
- Ramachandran, P. a. (2011). Mayavi: 3D Visualization of Scientific Data. *IEEE Computing in Science & Engineering*, 13 (2), pp. 40-51.

- Régnière J., Powell J. et al. (2012): Effects of temperature on development, survival and reproduction of insects: experimental design, data analysis and modeling. *Journal of Insect Physiology* 58(5): 634–647.
- Ruczyński I., Hałat Z. et al. (2020): Camera transects as a method to monitor high temporal and spatial ephemerality of flying nocturnal insects. *Methods in Ecology and Evolution* 11(2): 294–302. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13339>
- Santos, C., Ferraz, R., Muñoz, A.-R., Onrubia, A., Wikelski, M. (2021): Black kites of different age and sex show similar avoidance responses to wind turbines during migration. *Royal Society Open Science* 8 (1): 201933.
- Shi, X., Schmid, B., Tschanz, P., Segelbacher, G., Liechti, F. (2021): Seasonal trends in movement patterns of birds and insects aloft simultaneously recorded by radar. *Remote Sensing* 13 (9): 1839.
- Russ, J. (2012): *British Bat Calls: A Guide to Species Identification*. – Exeter, UK (Pelagic Publishing): 192 S.
- Sittinger M., Uhler J. et al. (2024): Insect detect: An open-source DIY camera trap for automated insect monitoring. *Plos one* 19(4): e0295474.
- Swild (2015): Performance of the real-time bat detection system DTBat at the wind turbine of Calandawind, Switzerland - Final report V2.2. – 29 S.
- Trusch R., Falkenberg M., Mörtter R. (2020): Anlockwirkung von Windenergieanlagen auf nachtaktive Insekten. 78: 73–128.
- Vallejo, G., Sawyer, D., Rodriguez, R., Quillen, J. & Denman, K. (2023): *Bat Smart Curtailment: Efficacy and Operational Testing - Final Technical Report*. – (Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, USA): 117 S.
- Verboom, B. & Huitema, H. (1997): The importance of linear landscape elements for the pipistrelle *Pipistrellus pipistrellus* and the serotine bat *Eptesicus serotinus*. – *Landscape Ecology* 12: 117-125.
- Wanner, S. (2017): *Flight behaviour of birds around a solitary wind turbine in a Swiss alpine valley*. Bern (Universität Bern): 35 S.
- Weschler M., Tronstad L. (2024): Wind energy and insects: reviewing the state of knowledge and identifying potential interactions. *PeerJ* 12: e18153. DOI: 10.7717/peerj.18153
- Westphal C., Bommarco R. et al. (2008): Measuring bee diversity in different European habitats and biogeographical regions. *Ecological monographs* 78(4): 653–671.
- Wickham H. (2016): *ggplot2-Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer International Publishing. Cham, Switzerland
- Wood C.M., Kahl S. (2024): Guidelines for appropriate use of BirdNET scores and other detector outputs. *Journal of Ornithology* 165(3): 777–782.
- Wright K. (2021): Package 'corrgram'. CRAN: Package corrgram (<https://CRAN.R-project.org/package=corrgram/>)

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Drohnenaufnahme des Windenergiefelds WINSENT; Quelle: ZSW.....	22
Abb. 2:	Saisonaler Verlauf der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Vögeln im Höhenbereich von 50 – 1.100 m ü.B.....	30
Abb. 3:	Saisonaler Verlauf der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Vögeln im Höhenbereich von 50 – 120 m ü.B.....	31
Abb. 4:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flügelschlagfrequenzen ziehender Vögel.....	36
Abb. 5:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flügelschlagfrequenzen ziehender Vögel.....	36
Abb. 6:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flügelschlagfrequenzen ziehender Vögel.....	37
Abb. 7:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-120 m ü.B. ermittelten Flügelschlagfrequenzen ziehender Vögel.....	38
Abb. 8:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-120 m ü.B. ermittelten Flügelschlagfrequenzen ziehender Vögel.....	38
Abb. 9:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-120 m ü.B. ermittelten Flügelschlagfrequenzen ziehender Vögel.....	39
Abb. 10:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen ziehender Vögel.	39
Abb. 11:	Verteilung der mittels Radar 50-120 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen ziehender Vögel.....	40
Abb. 12:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen ziehender Vögel.	40
Abb. 13:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-120 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen ziehender Vögel.	41
Abb. 14:	Höhenverteilung der mittels Radar ermittelten Flugaktivität ziehender Vögel zur Hauptzugzeit im Frühling (15.02. bis 15.05.).	42
Abb. 15:	Höhenverteilung der mittels Radar ermittelten Flugaktivität ziehender Vögel zur Hauptzugzeit im Herbst (15.08 bis 15.11.).....	43
Abb. 16:	Saisonaler Verlauf der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Insekten im Höhenbereich von 50 – 540 m ü.B.....	46
Abb. 17:	Saisonaler Verlauf der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Insekten im Höhenbereich von 50 – 120 m ü.B.....	47
Abb. 18:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-540 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen von Insekten.....	49
Abb. 19:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-120 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen von Insekten.....	49

Abb. 20:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-540 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen von Insekten.....	50
Abb. 21:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-120 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen von Insekten.....	51
Abb. 22:	Höhenverteilung der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Insekten im Frühling/Sommer (01.03. bis 15.08.)	52
Abb. 23:	Höhenverteilung der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Insekten im Herbst (15.08 bis 15.11.)	53
Abb. 24:	Saisonaler Verlauf der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Fledermäusen im Höhenbereich von 50 – 1.100 m ü.B.....	56
Abb. 25:	Saisonaler Verlauf der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Fledermäusen im Höhenbereich von 50 – 120 m ü.B.....	57
Abb. 26:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen von Fledermäusen im Frühling (01.04 bis 15.05.).....	58
Abb. 27:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen von Fledermäusen im Sommer (16.05. bis 31.07.).....	58
Abb. 28:	Verteilung der mittels Radar zwischen 50-1.100 m ü.B. ermittelten Flugrichtungen von Fledermäusen im Herbst (01.08. bis 31.10.).....	59
Abb. 29:	Höhenverteilung der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Fledermäusen im Frühling (01.04. bis 15.05.).....	59
Abb. 30:	Höhenverteilung der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Fledermäusen im Sommer (16.05. bis 31.07.)	60
Abb. 31:	Höhenverteilung der mittels Radar ermittelten Flugaktivität von Fledermäusen im Herbst (01.08. bis 31.10.)	61
Abb. 32:	Einfluss der Phase (a), der Methode (b), der Windgeschwindigkeit (c) und der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit (d) auf die Flughöhe ü.B. der Rotmilane.....	68
Abb. 33:	Einfluss der Phase (a), der Methode (b), der Windgeschwindigkeit (c) und der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit (d) auf die Fluggeschwindigkeit der Rotmilane.	69
Abb. 34:	Einfluss der Phase (a), der Methode (b), der Windgeschwindigkeit (c) und der Standardabweichung der Windgeschwindigkeit (d) auf die minimale radiale Annäherungsdistanz der Rotmilane bezüglich der Nabe der FWEA.....	70
Abb. 35:	Vogeldetektionssystem BirdRecorder (links; Quelle: J. Aschwanden) und BPS Long-Range von Bioseco; Quelle: Bioseco.	73
Abb. 36:	Verteilung der Anzahl der Aufnahmen pro Messnacht der verschiedenen Arten(-gruppen) in den verschiedenen Messhöhen an Messmast Nordwest im Jahr 2023.	81
Abb. 37:	Übersicht der Abendsegleraktivität an Messmast Nordwest im Jahr 2023.....	82
Abb. 38:	Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an Messmast Nordwest im Jahr 2023.	83

Abb. 39:	Übersicht der Gesamtaktivität an Messmast Nordwest im Jahr 2023.	83
Abb. 40:	Verteilung der Anzahl der Aufnahmen pro Messnacht der verschiedenen Arten(-gruppen) in den verschiedenen Messhöhen an den vier Messmasten sowie den Forschungs-WEA im Jahr 2024.....	89
Abb. 41:	Räumliche Darstellung für die Anzahl der Aufnahmen pro Messnacht der verschiedenen Arten(-gruppen) in den verschiedenen Messhöhen an den vier Messmasten sowie den Forschungs-WEA im Jahr 2024.....	90
Abb. 44:	Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an Messmast Nordwest im Jahr 2024.	92
Abb. 45:	Übersicht der Gesamtaktivität an Messmast Nordwest im Jahr 2024.	92
Abb. 46:	Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an Messmast Nordost im Jahr 2024.	93
Abb. 47:	Übersicht der Gesamtaktivität an Messmast Nordost im Jahr 2024.	93
Abb. 48:	Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an Messmast Südwest im Jahr 2024.	94
Abb. 49:	Übersicht der Gesamtaktivität an Messmast Südwest im Jahr 2024.	94
Abb. 50:	Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an Messmast Südost im Jahr 2024.	95
Abb. 51:	Übersicht der Gesamtaktivität an Messmast Südost im Jahr 2024.	95
Abb. 52:	Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an der FWEA Nord im Jahr 2024.....	96
Abb. 53:	Übersicht der Gesamtaktivität an der FWEA Nord im Jahr 2024.....	96
Abb. 54:	Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an der FWEA Süd im Jahr 2024.....	97
Abb. 55:	Übersicht der Gesamtaktivität an der FWEA Süd im Jahr 2024.....	97
Abb. 56:	Übersicht der Gesamtaktivität des Abendseglers an allen Messmasten und FWEA im Jahr 2024.....	99
Abb. 57:	Nächtliche Verteilung der Anzahl der Aufnahmen mit Abendseglern an allen Messstandorten im Jahr 2024.	99
Abb. 58:	Verteilung der Anzahl der Aufnahmen pro Messnacht der verschiedenen Arten(-gruppen) an den verschiedenen Standorten im Jahr 2023.	101
Abb. 59:	Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen (rote Zahl) pro Messnacht (blaue Zahl) an den Batcorder-Standorten im Jahr 2023.	103
Abb. 60:	Übersicht der Gesamtaktivität an den Waldbox-Standorten im Jahr 2023.....	104
Abb. 61:	Phänologische Verteilung der Anzahl der Aufnahmen pro Messnacht an den verschiedenen Standorten aufgeteilt nach den Arten(-gruppen) im Jahr 2020.....	106
Abb. 62:	Effektgrafiken zwischen der Temperatur und der relativen Nachtstunde für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Raufhautfledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts).....	109

Abb. 63:	Effektgrafiken des Niederschlags auf die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Raufhautfledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts).....	110
Abb. 64:	Effektgrafiken zwischen der Windgeschwindigkeit und der Windunterstützung für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Raufhautfledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts).....	111
Abb. 65:	Effektgrafiken zwischen der Saison und der Windunterstützung für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Artengruppe Nyctaloid (Mitte) und der Raufhautfledermaus (rechts).	112
Abb. 66:	Effektgrafiken der Batcorder-Standorte für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Raufhautfledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts).....	112
Abb. 67:	Effektgrafiken zwischen der Temperatur und der relativen Nachtstunde für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Raufhautfledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts).....	113
Abb. 68:	Effektgrafiken des Niederschlags auf die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Raufhautfledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts).....	114
Abb. 69:	Effektgrafiken zwischen der Windgeschwindigkeit und der Windunterstützung für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Raufhautfledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts) in der Umgebung des Testfelds.	115
Abb. 70:	Effektgrafiken zwischen der Saison und der Windunterstützung für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Artengruppe Nyctaloid (Mitte) und der Raufhautfledermaus (rechts).	115
Abb. 71:	Effektgrafiken der Erfassungshöhe für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Raufhautfledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts) vor und nach dem Bau der FWEA.	117
Abb. 72:	Interaktionsgrafik der Saison mit der Kombination aus Erfassungshöhe und Struktur für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Raufhautfledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts) nach dem Bau der FWEA.	117
Abb. 73:	Interaktionsgrafik der Nachtstunde mit der Kombination aus Erfassungshöhe und Struktur für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Raufhautfledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts) nach dem Bau der FWEA.....	117
Abb. 74:	Schätzwerte für den Zufallsfaktor Struktur (Messmast bzw. FWEA) im Modell der Artengruppe Nyctaloid, angegeben pro Erfassungshöhe sowie vor bzw. nach dem Bau der FWEA.	120
Abb. 75:	Effektgrafiken der Batcorder-Standorte für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Raufhautfledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts) vor und nach dem Bau der FWEA.	121

Abb. 76:	Effektgrafiken der Batcorder-Standorte für die Nachweiswahrscheinlichkeit der Zwergfledermaus (links), der Rauhautfledermaus (Mitte) und der Artengruppe Nyctaloid (rechts) vor und nach dem Bau der FWEA, für die Erfassungsjahre separat dargestellt.	121
Abb. 77:	Installation des Stereo-Wärmebild-Systems am nordwestlichen Messmast. ...	125
Abb. 78:	Die 3D Darstellungen zeigen die nächtlichen Flugbahnen in unterschiedlichen Farben.....	126
Abb. 79:	Montage des Wärmebildkamera-Systems am Messmast NW; Quelle: C. Happ, UMIT Tirol.	127
Abb. 80:	Kalibrierungsflug mit einer DJI Mavic 2 Drohne; Quelle: C. Happ, UMIT Tirol. .	127
Abb. 81:	Kreuzvalidierte Kalibriergenauigkeiten der Drohnenflüge 2024.	128
Abb. 82:	Aktive Messzeiten während der Nachstunden des Stereo-Wärmebildsystems im Erfassungsjahr 2024.	129
Abb. 83:	Sichtfeld der Kameras.....	130
Abb. 84:	Summe der nächtlich aufgezeichneten Flugbahnen in Sekunden.	130
Abb. 85:	Verteilung der Fluggeschwindigkeiten aller Flugbahnen und in den einzelnen Gruppen	132
Abb. 86:	Gesamtdistanz der Flugbahnen je geographischer Richtung und Monat.....	132
Abb. 87:	Gesamtdistanz der Flugbahnen je geographischer Richtung und Art/Gattung	133
Abb. 88:	Mittlere Flughöhe je Monat	133
Abb. 89:	Längere Flugbahnen (>160 m) von Tieren, die per Akustik als Ppip (links) und Nyctaloid (rechts) erkannt wurden	134
Abb. 90:	3D Flugpfad der in Abb. 91 dargestellten Ppip.	135
Abb. 91:	Flugpfad des als Ppip markierten Individuums aus Abb. 90	135
Abb. 92:	Als Ppip klassifiziertes Individuum, das möglicherweise Interesse für den Gondelbereich der Anlage zeigt.	136
Abb. 93:	Als Ppip klassifiziertes Individuum. Links und Mitte aus Sicht der Kamera, Rechts eine Seitenansicht.	136
Abb. 94:	Als Ppip klassifiziertes Individuum, das nahe an der Anlage an Höhe gewinnt.....	137
Abb. 95:	Als Nyctaloid klassifiziertes Individuum, das sich schleifenförmig an der WEA nach oben bewegt.	137
Abb. 96:	Weitere Beispiele für Nyctaloid-Flugbahnen (Gruppen Nyctaloid und Nnoc)...	138
Abb. 97:	Weitere Beispiele für als Ppip klassifizierte Tiere.....	139
Abb. 98:	Flugbahnen - Dauer über die Temperatur (links) und Flugbahnen-Dauer zwischen 4 und 7 °C zur Erklärung des lokalen Maximums.	140
Abb. 99:	Flugdauer je Windstärke (blau) und Dauer Windstärke, während des Messzeitraums des Thermographie-Systems (rot).	140

Abb. 101: An diesen Tagen weisen die Flugbahnen eine hohe Windunterstützung auf.....	141
Abb. 102: Radiale Zylinderschalen zur Dichteberechnung vor (gelb) und hinter (orange) der WEA.....	142
Abb. 103: Dichte der Flugbahnen-Punkte gemäß Abb. 102.	143
Abb. 104: Kugelschalen im Kamerakegel zur Dichteberechnung.	143
Abb. 105: Dichte der Flugbahnen – Punkte (blau) der jeweiligen Kugelschalen aus Abb. 104.....	144
Abb. 106: Für die Detektionswahrscheinlichkeit im Abstand zu den Kameras kompensierte Dichte aus Abb. 103.	144
Abb. 107: Kompensierte Dichte und Kurve (orange), die diesen Zusammenhang annähert.	145
Abb. 108: In der WEA eingebautes Schlagopfersystem: Ansicht Außen (links) und in der Gondel (rechts); Quelle: C. Happ, UMIT Tirol.....	146
Abb. 109: Sichtfenster der Schlagopferkameras: Tageslicht-Kamera (links), Wärmebildkamera (rechts), WEA Nord (oben), WEA Süd (unten)	147
Abb. 110: Vegetation (hier Gras und Blätter) reflektieren äußerst charakteristisch im Bereich des nahen Infrarots (ab ca. 700 nm). Graphik aus (Happ, Sutor, & Hochradel, 2021)	148
Abb. 111: Detektionen Schlagopferkameras	149
Abb. 112: Eindeutige Fehldetektion der Tageslichtkamera: Ein Kamerasystem, das auf dem Dach eines Baucontainers angebracht ist.....	150
Abb. 113: Falsch positive Detektionen der Tageslicht-Kamera	150
Abb. 114: Nicht eindeutig klassifizierbare Detektion der Wärmebildkamera.....	151
Abb. 115: Bewegungssequenz aus hochfrequenten Aufnahmen von falsch positiven Detektionen.....	151
Abb. 116: Konstruktion der Insektenfotofalle.	155
Abb. 117: Komponenten der Kamera-Box.	155
Abb. 118: Innenansicht der Hauptbox der Insektenfotofalle mit den darin enthaltenen Komponenten; Quelle: OekoFor.	156
Abb. 119: Die Lockfläche im alten Design (links) und im neuen Design (rechts).....	157
Abb. 120: Methodentest der Insektenfotofalle mit neuem Design (einfarbige Lockfläche).....	157
Abb. 121: Ausbleichen der gelben Lockfläche im Laufe der Erfassungssaison 2024.....	158
Abb. 122: Lockfläche 2024 und 2025 im Vergleich.....	158
Abb. 123: Schematische Funktionsweise der Insektenfotofalle.....	159
Abb. 124: Insektenfotofallen im Windtestfeld während der Wintermonate 2023.....	160
Abb. 125: Installierte Insektenfotofallen im Windtestfeld.....	161

Abb. 126: Überblick der installierten Insektenfotofallen jeweils in vier verschiedenen Höhen an den Messmasten (MW) sowie den FWEA.	162
Abb. 127:Luftbilder des Windtestfelds mit den Standorten der Messmasten (orange) und FWEA (gelb).	163
Abb. 128: Kontroll-App „Rekorder Status“.	164
Abb. 129: Kontroll-App „Letzte Bilder“.	164
Abb. 130: Schematisches Beispiel einer Bounding-Box.	165
Abb. 131: Beispiel Post-Processing Filter 1 – Zuschneiden des Auswertungsbereichs auf die Lockfläche.	166
Abb. 132: Beispiel 1 für Post-Processing Filter 2 – Ausschluss konstanter Detektionen innerhalb 10 Minuten.....	167
Abb. 133: Beispiel 2 für Post-Processing Filter 2 – Ausschluss konstanter Detektionen innerhalb 10 Minuten.....	168
Abb. 134: Beispiel für Post-Processing Filter 3 – Ausschluss konstanter Detektionen innerhalb eines Auswertungstags.	169
Abb. 135: Logistische Regression zur Vorhersagewahrscheinlichkeiten der Modell-Konfidenzwerte.	170
Abb. 136:Beispiel für Detektionen nach allen vier Post-Processing Filter Schritten.	171
Abb. 137: Überblick über die Laufzeiten der 2023 installierten Insektenfotofallen und die Anzahl der jeweils erstellten Aufnahmen.	176
Abb. 138: Anzahl erfasster Insekten tagsüber und nachts pro Insektenfotofalle.	177
Abb. 139: Anzahl nachgewiesener Insekten in den unterschiedlichen Erfassungshöhen tagsüber und nachts.....	177
Abb. 140: Überblick über die Laufzeiten der 2024 installierten Insektenfotofallen und die Anzahl der jeweils erstellten Aufnahmen.	178
Abb. 141: Mittlere Größe nachgewiesener Insekten je Erfassungsrunde (10 min pro Stunde) in Abhängigkeit von der Erfassungshöhe und der Struktur (Messmast = MM und FWEA) unterschieden nach Tag- und Nachterfassungen.....	180
Abb. 142: Insektenpräsenz im Jahresverlauf.	181
Abb. 143: Insektenabundanz im Jahresverlauf pro Erfassungshöhe an den nördlichen Strukturen.....	182
Abb. 144: Insektenabundanz im Jahresverlauf pro Erfassungshöhe an den südlichen Strukturen.....	183
Abb. 145: Absolute Anzahl an Erfassungsrunden mit Insektenpräsenz (orange) nachts und tagsüber an allen Insektenfotofallen zusammen in Abhängigkeit zur vorherrschenden Temperatur und Windgeschwindigkeit.	184
Abb. 146: Prozentualer Anteil an Erfassungsrunden mit Insektenpräsenz (orange) in Abhängigkeit zur Temperatur (oben) und Windgeschwindigkeit (unten) tagsüber und nachts für alle Insektenfotofallen zusammen.	185

Abb. 147: Fledermausaktivität und Insektenpräsenz im Jahresverlauf ab Änderung des Aufnahmeregimes pro Erfassungshöhe an den nördlichen Strukturen.	187
Abb. 148: Fledermausaktivität und Insektenpräsenz im Jahresverlauf ab Änderung des Aufnahmeregimes pro Erfassungshöhe an den südlichen Strukturen.	188
Abb. 149: Durchschnittliche Fledermausaktivität vor und während der Insektenlockphase.....	189
Abb. 150: Modellierte Nachweiswahrscheinlichkeit von Insekten während der Nacht in Abhängigkeit von Temperatur, Windgeschwindigkeit, Tage seit Erfassungsbeginn (Jahresverlauf), Nachtzehntel (Nachtzeit), Erfassungshöhe und Strukturtyp.....	191
Abb. 151: Modellierte Nachweiswahrscheinlichkeit von Insekten während der Nacht im Rotorbereich (> 47 m) in Abhängigkeit von Temperatur, Windgeschwindigkeit, Tage seit Erfassungsbeginn (Jahresverlauf), Nachtzehntel (Nachtzeit), Erfassungshöhe und Strukturtyp.	192
Abb. 152: Modellierte Nachweiswahrscheinlichkeit von Insekten während des Tages in Abhängigkeit von Temperatur, Windgeschwindigkeit, Tage seit Erfassungsbeginn (Jahresverlauf), Tageszehntel (Tageszeit), Erfassungshöhe und Strukturtyp.	193
Abb. 153: Modellierte Nachweiswahrscheinlichkeit von Insekten während des Tages im Rotorbereich (> 47 m) in Abhängigkeit von Temperatur, Windgeschwindigkeit, Tage seit Erfassungsbeginn (Jahresverlauf), Tageszehntel (Tageszeit), Erfassungshöhe und Strukturtyp.	194
Abb. 154: Zusammenhang zwischen der Aktivität der Zwergfledermaus (<i>Ppip</i>) und der Insektenabundanz am Tag bzw. während der Nacht sowie den nächtlichen Umweltbedingungen (Temperatur und Windgeschwindigkeit).	196
Abb. 155: Zusammenhang zwischen der Aktivität des Großen Abendseglers (<i>Nnoc</i>) und der Insektenabundanz am Tag bzw. während der Nacht sowie den nächtlichen Umweltbedingungen (Temperatur und Windgeschwindigkeit). ...	197
Abb. 156: Zusammenhang zwischen der Aktivität der Artengruppe <i>Nyctaloid</i> und der Insektenabundanz am Tag bzw. während der Nacht sowie den nächtlichen Umweltbedingungen (Temperatur und Windgeschwindigkeit).	198
Abb. 157: Zusammenhang zwischen der Aktivität der Rauhautfledermaus (<i>Pnath</i>) und der Insektenabundanz am Tag bzw. während der Nacht sowie den nächtlichen Umweltbedingungen (Temperatur und Windgeschwindigkeit). ...	199
Abb. 158: Zusammenhang zwischen der Aktivität der Gattungsgruppe <i>Myotis</i> und der Insektenabundanz am Tag bzw. während der Nacht sowie den nächtlichen Umweltbedingungen (Temperatur und Windgeschwindigkeit).	200
Abb. 159: Modellierte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Fledermäusen pro 10-Minuten-Intervall in Abhängigkeit von der Insektenpräsenz/- absenz über alle Erfassungshöhen sowie im Rotorbereich.	202

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Liste der berücksichtigten Zeitperioden für ziehende Vögel in Abhängigkeit der Phase, der Präsenz und des Betriebszustands der FWEA und der Jahre.	28
Tab. 2:	Anzahl stündliche Flugaktivitätswerte der ziehenden Vögel pro Phase und Betriebszustand der FWEA in Abhängigkeit der Zeitperiode (Frühling: 15.02. bis 15.05., Herbst: 15.08. bis 15.11.) und der Tageszeit.	28
Tab. 3:	Mittlere Flugaktivität aller Vögel (Anzahl ziehende Vögel pro km und h) mit Standardabweichung (\pm sd).....	32
Tab. 4:	Mittlere Flugaktivität „Singvögel“ (Anzahl ziehende „Singvögel“ pro km und h) mit Standardabweichung (\pm sd).....	32
Tab. 5:	Mittlere Flugaktivität „Wasservögel“ (Anzahl ziehende „Wasservögel“ pro km und h) mit Standardabweichung (\pm sd).....	33
Tab. 6:	Mittlere Flugaktivität „Segler“ (Anzahl ziehende „Segler“ pro km und h) mit Standardabweichung (\pm sd).....	33
Tab. 7:	Mittels Radar im Höhenbereich von 50 – 1.100 m ü.B. ermittelte Zusammensetzung des Vogelzugs nach Flugtypen (prozentuale Anteile).....	34
Tab. 8:	Mittels Radar im Höhenbereich von 50 – 120 m ü.B. ermittelte Zusammensetzung des Vogelzugs nach Flugtypen (prozentuale Anteile).....	34
Tab. 9:	Mittels Radar im Höhenbereich von 50 – 1.100 m ü.B. ermittelte Zusammensetzung des Vogelzugs nach Flugtypen (prozentuale Anteile).....	35
Tab. 10:	Mittels Radar im Höhenbereich von 50 – 120 m ü.B. ermittelte Zusammensetzung des Vogelzugs nach Flugtypen (prozentuale Anteile).....	35
Tab. 11:	Liste der berücksichtigten Zeitperioden für Insekten in Abhängigkeit der Phase, des Betriebszustand der FWEA und der Jahre.....	44
Tab. 12:	Anzahl stündliche Flugaktivitätswerte von Insekten pro Phase und Betriebszustand der FWEA in Abhängigkeit der Zeitperiode (Frühling/Sommer: 01.03. bis 15.08., Herbst: 16.08. bis 15.11.) und der Tageszeit.	44
Tab. 13:	Mittlere Flugaktivität von Insekten (Anzahl Insekten pro km und h) mit Standardabweichung (\pm sd).....	48
Tab. 14:	Liste der berücksichtigten Zeitperioden für Fledermäuse in Abhängigkeit der Phase, des Betriebszustand der FWEA und der Jahre.	54
Tab. 15:	Anzahl stündliche Flugaktivitätswerte von Fledermäusen pro Phase und Betriebszustand der FWEA in Abhängigkeit der Zeitperiode (Frühling: 01.04. bis 15.05., Sommer: 16.05. bis 31.07., Herbst: 01.08. bis 31.10.).	55
Tab. 16:	Mittels Radar gemessene mittlere Flugaktivität von Fledermäusen (Anzahl Fledermäuse pro km und h) mit Standardabweichung (\pm sd).....	58
Tab. 17:	Datengrundlage der individuellen Flugbewegungen pro Phase in Abhängigkeit der Methode, des Individuums und der Jahre.....	64

Tab. 18:	Datengrundlagen (N), die für die Berechnung der statistischen Modelle verwendet worden sind (horizontaler Umkreis von 700 m um das Testfeld herum).....	66
Tab. 19:	Bestimmungskategorien für die Zuordnung der Aufnahmen der akustischen Erfassungen zu bestimmten Arten bzw. Artengruppen.....	76
Tab. 20:	Zuordnung der Messpunkte für die Erfassung der Witterungsparameter zu den akustischen Fledermauserfassungen in den verschiedenen Höhen an den Messmasten und FWEA sowie in der Umgebung.....	77
Tab. 21:	Anzahl Aufnahmen mit Fledermausrufen am Messmast Nordwest im Jahr 2023.....	79
Tab. 22:	Bezeichnungen der Mikrofone sowie Übersicht über die Installations- und Ausfallzeiten aller 2024 eingesetzten Mikrofone (BATmode S+ - Systeme) an den verschiedenen Messmasten und Forschungs-WEA.	84
Tab. 23:	Übersicht über das Ergebnis der akustischen Erfassungen an sämtlichen Mikrofonen der Messmasten und FWEA im Jahr 2024.	87
Tab. 24:	Überblick über die Ergebnisse der akustischen Messungen an den 5 Messstationen (BC = Batcorder) in der Umgebung um das Testfeld im Jahr 2023.....	100
Tab. 25:	Eigenschaften aller 3D Flugbahnen bzw. Art- und Gattungsspezifisch.....	131
Tab. 26:	Alle detektierten Insektennachweise während der Nacht (N) und über den Tag (T) pro Struktur und Erfassungshöhe.....	179
Tab. 27:	Vergleich der Modellergebnisse zum Einfluss der Insektenabundanz tagsüber und während der Nacht auf die Aktivität der verschiedenen Fledermausarten/-artengruppen.	201
Tab. 28:	Taxonomische Zusammensetzung der Phylum-Nachweise.....	204
Tab. 29:	Taxonomische Nachweise innerhalb des Phylums der Arthropoda.	204
Tab. 30:	Taxonomische Nachweise innerhalb der Klasse der Insecta.	204
Tab. 31:	Taxonomische Nachweise innerhalb der Ordnung der Diptera (Fliegen).....	205
Tab. 32:	Taxonomische Nachweise innerhalb der Ordnung der Hemiptera (Wanzen)..	205
Tab. 33:	Hymenoptera Anteil aller Insecta Reads 0,2% (33 OTUs, 528 Reads)	205

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
BIOS	Basic input/output system
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
Abk.	Erklärung der Abkürzung (BfN_Standard_linksbündig)
BfN	Bundesamt für Naturschutz
DWD	Deutscher Wetterdienst
FWEA	Forschungs-Windenergieanlage/n
GLM	General Linear Model
GLMM	Generalized Linear Mixed Models
GPS	Global Positioning System
KNE	Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende
LED	Light emitting diode - Leuchtdiode
LRF	Laser Range Finder
MM	Messmast
NE	Nord-Ost
NW	Nord-West
RWTN	Research Wind Turbine North
RWTS	Research Wind Turbine South
SE	Süd-Ost
SW	Süd-West
WEA	Windenergieanlage/n
WINSENT	Wind science and engineering in complex terrain
WMM	Windmessmast
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

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/skr765