

Leibniz-Institut für Zoo- und Wildtierforschung (IZW) im Forschungsverbund Berlin
e.V.

**„Identifikation von Fledermausattraktoren an Windenergieanlagen zur
Entwicklung von Vermeidungsstrategien: GPS-basierte Raumstudien des
kollisionsgefährdeten Großen Abendseglers“**

Abschlussbericht des Projektes mit dem Az: 34411/01-43/0

Berichtszeitraum: 01.02.2019 - 30.09.2021



Von Dr. Christine Reusch, Prof. Dr. Stephanie Kramer-Schadt und PD Dr. Christian
C. Voigt

Berlin, 20. Dezember 2021

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	34411/01-43/0	Referat	Fördersumme	338.776 €
Antragstitel		Identifikation von Fledermausattraktoren an Windenergieanlagen zur Entwicklung von Vermeidungsstrategien: GPS-basierte Raumstudien des kollisionsgefährdeten Großen Abendseglers		
Stichworte		Interaktion Windenergieanlagen Fledermaus, <i>Nyctalus noctula</i> , Raumnutzung, GPS Logger		
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
2 Jahre	01.02.2019	30.09.2021	Gesamt	
Zwischenbericht	Berichtszeitraum 01.02.2019- 31.07.2021			
Bewilligungsempfänger		Forschungsverbund Berlin e.V. Leibniz-Institut für Zoo- und Wildtierforschung (IZW)		Tel 030-5168-511 Fa 030-5126-104 x
		Rudower Chaussee 17 12489 Berlin		Projektleitung PD Dr. Christian Voigt Prof. Dr. Stephanie Kramer-Schadt
				Bearbeiter Dr. Christine Reusch
Kooperationspartner				
<p>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</p> <p>Im Projekt „Identifikation von Fledermausattraktoren an Windenergieanlagen (WEA) zur Entwicklung von Vermeidungsstrategien: GPS-basierte Raumstudien des kollisionsgefährdeten Großen Abendseglers“ wurde die neuartige Methode der kombinierten Verhaltensmessung mit Hilfe von GPS-Technik und „on-board“-Mikrofonen genutzt, um zu untersuchen, wie und warum Fledermäuse mit WEA interagieren. Hierzu nutzten wir den Großen Abendsegler (<i>Nyctalus noctula</i>) als Modellorganismus, da diese Art an WEA kollisionsgefährdet ist. Eine Identifikation relevanter Parameter, die die Interaktion von Fledermäusen mit WEA beeinflussen, könnte Grundlage für die Etablierung von Vermeidungsmaßnahmen im Bau oder Betrieb von WEA sein, die zu einer wirtschaftlich optimierten und naturschonenden Windenergieproduktion führen.</p> <p>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</p> <p>Wir führten Feldarbeiten in den Jahren 2019 und 2020 in vier Bundesländern durch, wobei der Schwerpunkt der Studie aufgrund optimaler Arbeitsmöglichkeiten im Feld in den Bundesländern Niedersachsen und Brandenburg lag. Der niedersächsische Untersuchungsort war repräsentativ für eine Küstenregion mit einer hohen Zahl von WEA, wobei sowohl einzelne WEA als auch Windparks vorhanden waren. Der brandenburgische Untersuchungsort war typisch für die Windenergieproduktion an eher windschwachen Standorten mit einem hohen Waldanteil. An diesem Standort dominierten Windparks. Zur Positionsbestimmung der Fledermäuse nutzten wir miniaturisierte GPS-Logger, die temporär an Große Abendseglern, die wir in der Nähe von WEA vorfanden, angebracht wurden. Hierzu wurden Große Abendseglern aus Fledermauskästen oder Baumhöhlen kurzzeitig entnommen oder mit Hochnetzen gefangen, vermessen sowie gewogen. Nachdem jedes Tier eine GPS-VHF-Einheit erhielt, wurden die Tiere wieder freigelassen oder in das entsprechende Quartier zurückgesetzt. Nach zwei Tagen startete mittels Telemetrie die Suche nach den besenderten Großen Abendseglern, um die GPS-Logger wiederzufinden und die Daten herunterzuladen. Im Anschluss wurden mit Hilfe der Statistiksoftware R und QGIS die ermittelten Flugpfade in Karten festgehalten und statistisch untersucht.</p>				

Ergebnisse und Diskussion

Wir konnten mit Hilfe der Bewegungsverfolgung von Großen Abendseglern mit miniaturisierten GPS-Einheiten wichtige Information bezüglich der Interaktion dieser kollisionsgefährdeten Fledermausart mit WEA erhalten. Wir identifizierten Lebensräume, wie zum Beispiel Wald, Gewässer und Feuchtgebiete, die mit großer Wahrscheinlichkeit von Großen Abendseglern genutzt werden. Eine Meidung dieser Lebensräume beim Bau von WEA würde den Konflikt zwischen Windenergieproduktion und Fledermausschutz abschwächen. Wir beobachteten eine große Variabilität im Antwortverhalten von Großen Abendseglern zu WEA, die weder auf die Saison noch auf das Geschlecht zurückzuführen waren. Große WEA, die in der Nähe von Tagesquartieren standen, wurden bevorzugt von Großen Abendseglern angefliegen. Die Einhaltung eines Mindestabstands zu Tagesquartieren stellt eine wirksame Maßnahme dar, um das Kollisionsrisiko von Großen Abendseglern an WEA zu reduzieren. Eine Anpassung der Größe von WEA in der Peripherie von Windparks könnte zudem die Anlockwirkung von Windparks auf Große Abendsegler reduzieren.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Wir konnten die Projektergebnisse sowohl auf internationalen als auch auf nationalen Tagungen präsentieren. Im Januar 2020 wurde das Projekt durch ein Poster auf der nationalen Expertentagung („TDFF: Treffen der deutschsprachigen Fledermausforschenden“) vertreten. Die Projektvorstellung führte zu interessanten Gesprächen und konstruktiven Diskussionen. Im Rahmen des DBU geförderten Projekts organisierten wir zudem eine Online-Tagung über „Evidenzbasierten Fledermausschutz bei Windkraftvorhaben“ (15.4.2021) zu der wir 393 Teilnehmer begrüßen konnten. Im Rahmen dieser Tagung stellten die Projektdurchführenden die Ergebnisse der DBU-geförderten Studie vor. Am 2.11.2021 hielt PD Dr. Voigt auf dem englisch-sprachigen „First International Bat Research Online Symposium: Towards solving the wind energy-bat conflict“ einen zentralen Vortrag über die Ergebnisse des Projekts. Zudem wurden die Projektergebnisse in einer universitären Seminarreihe an der Universität Potsdam vorgestellt. Ein wichtiger Bestandteil unserer Kommunikationsstrategie waren zudem die regelmäßigen Treffen der PAG. Diese nutzten wir einerseits, um die vorläufigen Ergebnisse zu diskutieren, andererseits erhielten wir konstruktive Vorschläge aus den Reihen der PAG-Mitglieder. Des Weiteren trugen wir zu einer Fernsehproduktion des WDR zur Thematik Konflikte im Rahmen von Windkraftvorhaben bei. Diese wurde als Dokumentation im WDR bzw. bei ARTE x:enius gezeigt.

Fazit

Wir konnten an einem Küstenstandort und an einem walddreichen Binnenstandort Landschaftsparameter identifizieren, die für die Raumnutzung des Großen Abendseglers relevant sind. Zudem konnten wir Parameter an WEA identifizieren, die eine hohe Anlockwirkung für Große Abendsegler verursachen. Die Berücksichtigung dieser Faktoren bei der Installation von WEA könnte maßgeblich den Konflikt zwischen Windenergieproduktion und Fledermausschutz reduzieren, potenziell zu geringeren Abschaltauflagen und somit zu einer höheren Energieproduktion aus Windkraft führen.

Im Bereich Wissensaustausch und Wissenstransfer konnten wir über PAG-Sitzungen sowie die Organisation einer großen Fachveranstaltung mit fast 400 Teilnehmer*innen wichtige Impulse an Behördenvertreter*innenn, Gutachter*innen, Regierungsvertreter*innen sowie Windkraftentwickler*innen und –betreiber*innen geben. Aus diesem Projekt sind zwei wissenschaftliche Publikationen entstanden, die zur Begutachtung bei einem wissenschaftlichen Journal mit Qualitätssicherungsverfahren eingereicht wurden bzw. in Kürze eingereicht werden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	8
Verzeichnis von Abkürzungen, Begriffen und Definitionen	9
Einleitung	10
Hauptteil	12
Synthese	22
Literaturverzeichnis	24

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: A) Lage des Untersuchungsgebiets in Europa. B) Detaillierte Ansicht des zentralen Windparks in der Nähe einer der Fangstellen. C) Flugrouten von 11 GPS-markierten Großen Abendseglern (*Nyctalus noctula*); farbige Punkte stehen für unterschiedliche Flugrouten. Die Hintergrundkarte stammt aus der Corine-Landbedeckungskarte (Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland, 2018 (LBM-DE2018), 20m-Raster). Informationen zu Windenergieanlagen (WEA; Symbol: weißer Kreis mit schwarzem Punkt in der Mitte; N=386 im Umkreis von 15 km um die Erfassungsorte) wurden aus Eichhorn et al. (2019) entnommen⁵. Größere dunkelgraue Punkte kennzeichnen die von den Individuen genutzten Baumquartiere.

12

Abbildung 2: Überblick über die verwendeten Modellansätze: (A regional, D) regionale Skala mit einer Ressourcenselektionsfunktion (sog. 'resource selection function' RSF) auf der Basis von Zufallspunkten innerhalb des MCP aller GPS-Positionen (Populationsebene; $RSF_{GeneralMCP100}$), (B lokal, E) lokale Skala mit RSF auf der Basis von Zufallspunkten, die im MCP100 der individuellen Flugpfade lagen (Individualebene; $RSF_{MCP100/Flugpfad}$), und (C lokal/Verhalten, F) lokale Skala unter Berücksichtigung individueller Verhaltensweisen auf der Basis einer Schrittauswahlfunktion (individuelle Standorte Ebene; sog. 'step selection function' SSF). Die Modellansätze werden für eine individuelle Flugbahn dargestellt. Zufällige Punkte sind grau, während die beobachteten GPS-Standorte violett dargestellt sind. Die Hintergrundkarte wurde aus der Corine-Landbedeckungskarte (Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland, 2018 (LBM-DE2018), 20m-Raster) gewonnen. Informationen zu Windenergieanlagen (WEA; Symbol: weißer Kreis mit schwarzem Punkt in der Mitte) wurden aus Eichhorn et al. (2019) entnommen⁵. Größere dunkelgraue Punkte kennzeichnen die von den Individuen genutzten Baumquartiere.

15

Abbildung 3: Anwesenheitswahrscheinlichkeit von Großen Abendsegler in Abhängigkeit von der Entfernung (km) zu WEA. Die Antwortkurve ist auf Populationsebene (schwarze, lange gestrichelte Linie) und auf individueller Ebene (durchgezogene Linien, farbige Linien symbolisieren Individuen) dargestellt. Das darunter liegende graue Polygon zeigt das Vorhersageintervall auf Populationsebene. Die rote gestrichelte Linie beschreibt den Schwellenwert von 16,7 %, der die Habitatvermeidung (unten) von der Präferenz (oben) trennt. Die übrigen Variablen des Modells wurden auf einen konstanten Wert gesetzt.

17

Abbildung 4: Geschätzte Anzahl der GPS-Standorte von Großen Abendseglern (*Nyctalus noctula*) in < 100 m Entfernung zu Windenergieanlagen (WEA) im Verhältnis zur Entfernung zu bekannten Quartieren (km), der Anzahl benachbarter WEA in <1km Entfernung und dem Durchmesser der Rotorblätter der entsprechenden WEA (Durchmesser 27 m: orangefarbene Linien; Durchmesser 48 m: braune Linien; Durchmesser 127 m: rote Linien). Die Anzahl der benachbarten WEA in <1km Entfernung wurde für zwei Szenarien dargestellt (linke Grafik: keine benachbarten WEA = geringe Dichte; rechte Grafik: 35 benachbarte WEA = hohe Dichte).

18

Abbildung 5: Flugrouten von 60 Großen Abendseglern (*Nyctalus noctula*); farbige Punkte stehen für unterschiedliche Flugrouten in Brandenburg. Die Hintergrundkarte wurde aus B, C) Corine Landbedeckungskarte (Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland, 2018 (LBM-DE2018), 20m Raster) und A) dem R-Paket 'rworldmap' (01.12.2021) gewonnen. Informationen zu WEA (WEA; Symbol: weißer Kreis mit schwarzem Punkt in der Mitte; N=80 in unserem Untersuchungsgebiet) wurden vom Landesamt für Umwelt Brandenburg (<https://mlul.brandenburg.de/luas/gis/wka.zip>; "Windkraftanlagen des Landes Brandenburg"; letzte Aktualisierung 10.01.2020) bezogen. Größere dunkelgraue Punkte kennzeichnen von den Individuen genutzte Baumquartiere. Das schwarze Rechteck in C) zeigt die Größe und Lage der Karte B) im Vergleich.

19

Abbildung 6: Geschätzte Anwesenheitswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Entfernung (km) zu WEA für Große Abendsegler (*Nyctalus noctula*). Die Zufallspunkte für den Vergleich wurden innerhalb eines MCP100 generiert, das alle GPS-Positionen der einzelnen Flugpfade umfasst (RSFMCP100/Flugpfad). Verglichen werden die Schätzungen für die vier Szenarien A) Frühsommer 2019, B) Frühsommer 2020, C) Spätsommer 2019 und D) Spätsommer 2020. Die Reaktionskurve ist auf individueller Ebene (durchgezogene Linien, Farben für Individuen) und auf Populationsebene (schwarze, lange gestrichelte Linie) dargestellt. Das darunter liegende graue Polygon zeigt das Vorhersageintervall auf Populationsebene. Die rote gestrichelte Linie beschreibt den Schwellenwert von 16,7 %, der die Habitatvermeidung (unten) von der Präferenz (oben) trennt. Die übrigen Variablen des Modells wurden auf einen konstanten Wert gesetzt

21

Abbildung 7: Geschätzte Anzahl der GPS-Standorte von Großen Abendseglern (*Nyctalus noctula*) im Umkreis von 100 m um eine Windenergieanlage (WEA) in Abhängigkeit von der

Entfernung zu Tagesquartieren (km), der Anzahl an benachbarten WEA in 1 km Entfernung und dem Durchmesser der Rotorblätter der entsprechenden WEA (Durchmesser 51,5 m: orangefarbene Linien; Durchmesser 90 m: braune Linien; Durchmesser 126 m: rote Linien). Die Anzahl der benachbarten WEA in 1 km Entfernung wird durch zwei Szenarien (niedrige Dichte - 4 benachbarte WEA; hohe Dichte - 16 benachbarte WEA) für den Untersuchungsstandort in den verschiedenen Feldern der Abbildung charakterisiert. 22

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschreibung der Flugrouten von Großen Abendseglern (n=11, 6 Männchen, 5 Weibchen, 32 Flugrouten). 16

Tabelle 2: Beschreibung der individuellen Flugrouten (farbig kodiert) von 60 Großen Abendseglern (42 Männchen, 18 Weibchen) in Brandenburg im Früh- und Spätsommer 2019 und 2020. 20

Verzeichnis von Abkürzungen, Begriffen und Definitionen

AICc	Modellauswahl basierend auf dem Akaike-Informationskriterium, korrigiert für kleine Stichprobengrößen
ARM	“Area restricted movements” (engl.); kleinräumiges Suchverhalten
BfN	Bundesamt für Naturschutz
CMS	UN Convention on Migratory Species of wild animals
GPS	“Global Positioning system” (engl.); Globales Positionssystem
COM	“Commuting” (engl.); Transferflug
E.U.	Europäische Union
MCP	Minimales Konvexpolygon
RSF	“Resource selection function” (engl.); Ressourcenselektionsfunktion
RSF _{GeneralMCP100}	RSF-Model, das die beobachteten GPS-Positionen mit simulierten Punkten innerhalb des MCP aller kombinierten Flugpfade der besenderten Fledermäuse untersucht.
SSF	„Step selection function“ (engl.); Schrittauswahlfunktion
VHF	„Very high frequency signal“ (engl.); Hochfrequenzsignal
WEA	Windenergieanlage

Einleitung

Die ökologisch verträgliche und energiewirtschaftlich erfolgreiche Fortsetzung der Energiewende ist ein zentrales gesellschaftliches Anliegen, welches im Kontext zahlreicher internationaler und nationaler Beschlüsse und Gesetze steht, wie zum Beispiel dem Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG 2017), dem Bundesnaturschutzgesetz (§44), der E.U. Habitat-Direktive (92/32/CEE; Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie), dem Kyoto Protokoll zur Reduzierung der globalen CO₂ Emission sowie den UN-Konventionen zum Schutz migrierender Arten (CMS; EUROBATS Vereinbarung nach Bonn 1979 und London 1991) und zum Schutz der biologischen Diversität (CBD, Rio de Janeiro 1992). Die Energieproduktion aus Windkraft stellt im Rahmen der Energiewende einen signifikanten Teil der Energieproduktion aus erneuerbaren Quellen dar.

Jüngst zeigten Studien in den U.S.A., Großbritannien und Deutschland, dass Fledermäuse an WEA angelockt werden und durch direkten oder indirekten Schlag zu Tode kommen^{1,2,3}. Welche Faktoren für eine anlockende Wirkung von Fledermäusen relevant sind, ist jedoch bisher unbekannt. In der Vergangenheit wurden diesbezüglich mehrere Hypothesen formuliert⁴, die nicht exklusiv zu betrachten sind, da die Faktoren in verschiedenen räumlichen Skalen (Nah- und Fernanlockung) getrennt oder zusammen wirken können. Unsere bisherigen GPS-gestützten Untersuchungen an Großen Abendseglern lieferten detaillierte Einblicke in das Raumnutzungsverhalten der Tiere im Frühsommer, vor allem in Bezug zu WEA³. Wir konnten dabei feststellen, dass Große Abendsegler sowohl ein Annäherungsverhalten als auch ein Meidungsverhalten an WEA zeigten³.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nutzten wir miniaturisierte GPS-Logger, um zu klären, wie und warum Fledermäuse mit WEA interagieren. Als Modellorganismus diente uns der Große Abendsegler (*Nyctalus noctula*), da (1) diese Art kollisionsgefährdet ist, (2) die Bestände des Großen Abendseglers laut Bundesamt für Naturschutz rückläufig sind und (3) die Art ausreichend groß ist, um miniaturisierte GPS-Einheiten zu tragen. **Das Ziel unserer Untersuchung war es, relevante Parameter für die Interaktion von Fledermäusen mit WEA, zu identifizieren. Hierüber sollte eine Grundlage für die Etablierung von Vermeidungsmaßnahmen im Bau oder Betrieb der WEA geschaffen werden, die zu einer wirtschaftlich optimierten und naturschonenden Windenergieproduktion führt.**

Unsere Studie sollte einen wichtigen Beitrag zur naturverträglichen Weiterentwicklung der Energiewende in Deutschland leisten. Einerseits kommt eine große Zahl geschützter Fledermäuse an WEA zu Tode, andererseits führen die Auflagen von Abschaltzeiten an WEA zu monetären Verlusten für die Windenergiebetreiber. Über die Identifizierung der Faktoren, die für eine Anlockung oder Vergrämung von Fledermäusen an WEA relevant sind, möchten wir Empfehlungen für einen fledermausschonenden Betrieb der WEA ableiten. Über eine Vermeidung oder Reduzierung von potenziell anlockenden Reizen an WEA ließen sich sowohl die Aktivität von Fledermäusen und die Schlagopferzahlen an WEA als auch die behördlichen Auflagen reduzieren. Aus einer Identifizierung von Parametern, die zu einer Abschreckung von

Fledermäusen führen, ließen sich Maßnahmen entwickeln, die Fledermäuse an WEA-Standorten vergrämen. Die Ergebnisse aus unserer Studie könnten es Projektentwickler*innen von Windkraftvorhaben ermöglichen, WEA so zu platzieren, dass sie eine minimale Anlockwirkung auf Fledermäuse haben, bzw. solche Faktoren an den Anlagen vermeiden, die eine Anlockwirkung haben. Dies könnte diesen Unternehmen einen Vorteil im nationalen und globalen Wettbewerb bieten. Die Ergebnisse unserer Studie sind daher für die praktische Umsetzung einer ökologisch und energiewirtschaftlich nachhaltigen Energiewende von unmittelbarem Nutzen.

Das Projekt war in drei thematische Bereiche mit jeweils einer Fragestellung untergliedert. Im Rahmen der ersten Fragestellung untersuchten wir am Beispiel des Großen Abendseglers, wie sich Fledermäuse in Raum und Zeit zu WEA bewegen. Hierzu nutzten wir miniaturisierte GPS-Einheiten, die wir im Rückenfell der Tiere temporär anbrachten und die die Raumpositionen der Fledermäuse in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung speicherten. Um zu untersuchen, welche Habitatvariablen für die Interaktion der Fledermäuse mit WEA relevant sind, zogen wir digitalisierte Karten des jeweiligen Untersuchungsgebiets heran. Über den Vergleich der tatsächlichen mit simulierten Flugbewegungen identifizieren solche Landschaftsmerkmale, welche für das Bewegungsmuster einer Fledermaus relevant sind. Hierbei wurden die unterschiedlichen Skalierungen (Fern- und Nahanlockung) getrennt betrachtet. Des Weiteren prüften wir, ob es jahreszeitliche Unterschiede oder aber Unterschiede zwischen den Geschlechtern in ihrer Interaktion mit WEA gibt.

Im Rahmen der zweiten Fragestellung untersuchten wir, welche Reize für eine Anlockwirkung oder Vergrämung der Fledermäuse von Bedeutung sein könnten. Unser methodischer Ansatz beinhaltete, dass wir solche WEA identifizieren, an denen sich die untersuchten Tiere präferiert aufhielten. Danach sollte die Häufigkeit der Interaktionen von Fledermäusen mit diesen WEA in Relation zu WEA-Parametern wie Größe (Rotordurchmesser), Nachbarschaft zu weiteren WEA, Nähe zu Fledermausquartieren oder bestimmten Habitaten (Offenland, Wald, Waldrand) beschrieben werden.

Im Rahmen der dritten Fragestellung studierten wir, was Fledermäuse motiviert, sich an WEA aufzuhalten. Dies untersuchten wir, in dem wir die Bewegungsmuster der Tiere beim Nahflug an der WEA in Kombination mit akustischen Reizen (sowohl eigene als auch fremde Echoortungsrufe sowie Störgeräusche von den WEA) analysierten. Hierzu nutzten wir Mikrofone, welche an den GPS-Geräten befestigt waren, die die Tiere trugen. Diese Aufnahme sollte es uns ermöglichen, Jagdverhalten von sozialen Interaktionen oder Erkundungsverhalten zu differenzieren.

Die Durchführung des Projekts erfolgte schwerpunktmäßig in zwei Untersuchungsgebieten, die typisch für Landschaften mit intensiver Nutzung durch die Windkraftindustrie waren. Zum einen untersuchten wir die Interaktion von Großen Abendseglern mit WEA an einem Küstenstandort und einem Waldstandort im Binnenland. Der Küstenstandort wurde ausgesucht, da einerseits aufgrund der starken Winde diese besonders intensiv für die

Windenergieproduktion genutzt werden, andererseits Fledermäuse Küstenlinien auch für die Migration nutzen. Der Waldstandort im Binnenland wurde gewählt, weil einerseits der Ausbau der Windenergieproduktion aktuell vermehrt in Wäldern erfolgt, und weil andererseits Wälder ein wichtiger Lebensraum für Fledermäuse sind. An beiden Standorten existiert daher ein hohes Konfliktpotenzial zwischen der Windenergieproduktion und dem Schutz der Biodiversität.

Hauptteil

Untersuchungen am Küstenstandort

Methoden

Wir führten unsere Arbeiten zwischen August und September 2020 unter Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben zum Tier- und Artenschutz durch. Das Untersuchungsgebiet war geprägt von Ackerbau (~ 39 %), intensiv genutzten Wiesen (~ 46 %), kleinen Dörfern, einem küstennahen Klima und einer hohen Dichte an WEA (Abb. 1).

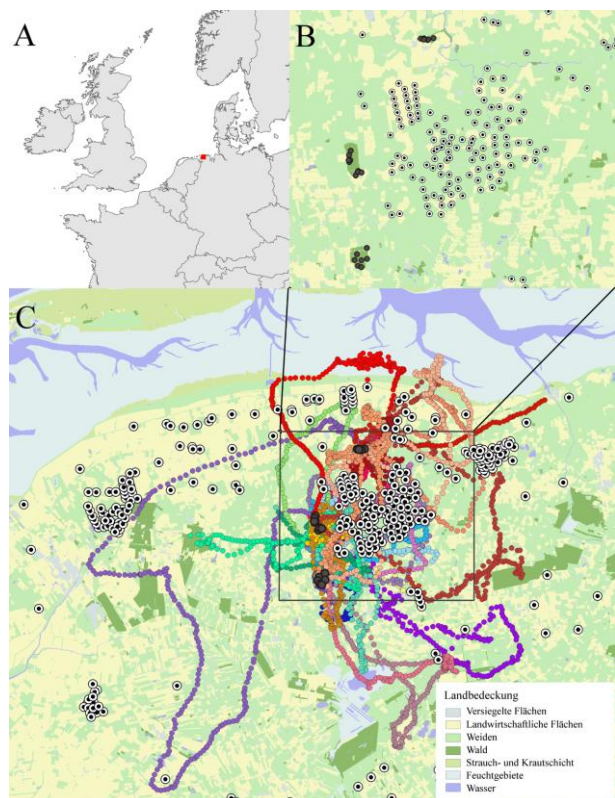


Abb. 1: A) Lage des Untersuchungsgebiets in Europa. B) Detaillierte Ansicht des zentralen Windparks in der Nähe einer der Fangstellen. C) Flugrouten von 11 GPS-markierten Großen Abendseglern (*Nyctalus noctula*); farbige Punkte stehen für unterschiedliche Flugrouten. Die Hintergrundkarte stammt aus der Corine-Landbedeckungskarte (Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland, 2018 (LBM-DE2018), 20m-Raster). Informationen zu Windenergieanlagen (WEA; Symbol: weißer Kreis mit schwarzem Punkt in der Mitte; N=386 im Umkreis von 15 km um die Erfassungsorte) wurden aus Eichhorn et al. (2019) entnommen⁵. Größere dunkelgraue Punkte kennzeichnen die von den Individuen genutzten Baumquartiere.

Wir fingen 16 Große Abendsegler mit Hilfe von feinmaschigen Netzen entweder an Quartieren oder aber in den Flugkorridoren. Durchschnittlich wogen die Tiere 31,7 g (Bereich 28,0-39,0 g). Wir verwendeten GPS-Logger mit einem integrierten Ultraschallmikrofon (ASDevelopments, Haifa, Israel). Zusätzlich brachten wir an jedem GPS-Tag einen VHF-Sender (Telemetry-Service Dessau, Dessau, Deutschland) an, der uns half, die markierten Fledermäuse oder die heruntergefallenen GPS-VHF Einheit wiederzufinden. Die GPS-VHF-Einheit wurde punktuell mit medizinischem Hautkleber auf das Rückenfell der Fledermäuse geklebt. Diese Anbringung gewährleistete, dass die GPS-VHF-Einheit innerhalb weniger Tagen von der Fledermaus wieder abfiel. Um die markierten Fledermäuse oder die GPS-VHF-Einheit wiederzufinden, orteten wir das Funksignal des Peilsenders mit Hilfe eines Empfängers und einer Antenne (ICOM IC-R30, ICOM, Japan; Australis 26K, Titley Scientific, Australien).

Die GPS-Einheiten wurden so programmiert, dass die Aufzeichnungen in der darauffolgenden Nacht begannen. Dies gewährleistete, dass sich zum Zeitpunkt der Datenerfassung die Individuen bereits an die GPS-Logger gewöhnt hatten. In den Aufzeichnungs Nächten erfassten die GPS-Geräte die räumlichen Positionen alle 30 Sekunden, beginnend um 20:30 oder 21:00 Uhr (MEZ; je nach Sonnenuntergang) bis 02:00 Uhr (MEZ), der mutmaßlichen Rückkehrzeit der Fledermäuse zu ihrem Quartier. Das Ultraschallmikrofon wurde so eingestellt, dass es die Ultraschallumgebung um die Fledermäuse alle 10 s für 1,5 s mit einer Abtastrate von 160 kHz aufzeichnete.

Für alle gesammelten Flugpfade quantifizierten wir unter anderem die Maximaldistanz zum Ausgangspunkt (Quartier), die Gesamtflugstrecke, die Flugdauer, die Schrittlänge (Entfernung zwischen aufeinanderfolgenden räumlichen Positionen einer Spur) und die Bewegungswinkel (Winkel zwischen drei aufeinanderfolgenden räumlichen Positionen einer Spur). Mit Hilfe eines Hidden-Markov-Modells (HMM) wiesen wir basierend auf Schrittlänge und Winkel jeder Raumposition einen von zwei Bewegungsmodi zu, namentlich kleinräumiges Suchverhalten (ARM = engl. „Area restricted movements“) oder Transferflug (COM = engl. „Commuting“). Kurze Schrittlängen und größere Winkel wurden verwendet, um das Futtersuchverhalten und große Schrittlängen und kleine Drehwinkel, um den Transferflug zu identifizieren. In den Akustikaufnahmen identifizierten wir Echoortungsrufe, die auf Suchflüge hinwiesen, Jagdrufe (Engl. „Feeding Buzzes“; stereotype Sequenzen von Echoortungsrufen mit abnehmenden Intervalllängen und Hauptfrequenzen der nachfolgenden Rufe), die auf eine Insektenjagd hindeuteten, und soziale Rufe, die auf Interaktionen mit Artgenossen hinwiesen. Darüber hinaus notierten wir die Anwesenheit von Artgenossen über deren Echoortungsrufe bzw. Umgebungsgeräuschen.

Basierend auf einem 20-m-Raster der Corine-Landbedeckungskarte ("Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland", 2018 (LBM-DE2018)) ordneten wir jedem GPS-Standort den wichtigsten zugrunde liegenden Landbedeckungstyp innerhalb eines Puffers von 50 m zu. Die Bodenbedeckungsarten bestanden aus acht Kategorien: versiegelte Fläche, Stadtgrün, landwirtschaftliche Flächen, Wiesen und Sträucher, Wald, offene Naturflächen,

Feuchtgebiete und Wasser. Der Anteil der versiegelten Fläche, des Waldes und von Wasser innerhalb der Kreise wurde als separate numerische Vorhersagevariable berücksichtigt. Des Weiteren berechneten wir die Entfernungen der GPS-Standorte zu Wegen (basierend auf den Ebenen 15 und 35 des "Digitales Basis-Landschaftsmodell" (Ebenen) 2018 (Basis-DLM)) und der nächstgelegenen WEA ⁵.

Die Datenanalyse erfolgte mit der Statistiksoftware R 3.6.2. (R Core Team, 2019). Wir nutzten dabei einen Nutzung-versus-Verfügbarkeits-Ansatz, um die beobachteten GPS-Standorte mit den verfügbaren Vorhersagevariablen zu vergleichen. Für jeden beobachteten GPS-Standort wurden fünf Zufallspunkte erstellt. Diese Zufallspunkte wurden in drei verschiedenen methodischen Ansätzen simuliert, um verschiedene Landschaftsmaßstäbe abzudecken und die Robustheit unserer Ergebnisse zu testen (Abb. 2). Wir verwendeten eine Ressourcenselektionsfunktion (RSF), um das Präferenz- und Vermeidungsverhalten von Fledermäusen auf der Landschaftsskala zu bewerten. Wir unterschieden zwischen zwei RSF: In unserem ersten Ansatz berücksichtigten wir alle GPS-Positionen und die Gesamtfläche, die von allen erfassten Fledermäusen abgedeckt wurde (regionaler Ansatz, Populationsebene; Abb. 2A, D). In einem zweiten Ansatz verwendeten wir nur die GPS-Positionen der jeweiligen Fledermaus und konzentrierten uns auf das Gebiet, in dem die entsprechende Fledermaus aktiv war (Abb. 2B, E). Beim regionalen Ansatz verglich die RSF die beobachteten GPS-Positionen mit Punkten, die zufällig innerhalb des minimalen konvexen Polygons (MCP) aller kombinierten Flugpfade der Fledermäuse verteilt waren (im Folgenden als $RSF_{GeneralMCP100}$ abgekürzt). Um sicherzugehen, dass nur solche Orte analysiert wurden, die während der Futtersuche einer Fledermaus genutzt wurden und nicht mit dem Flug von und zum Quartier in Verbindung standen, haben wir in einem zweiten Analyseschritt Raumpositionen von der Analyse ausgeschlossen, die in weniger als 1,5 km Entfernung zum Tagesquartier lagen (im Folgenden $RSF_{GeneralMCP100_{GPS>1,5km}}$). Der lokale RSF-Ansatz verglich die beobachteten GPS-Standorte mit Punkten, die sich zufällig innerhalb des MCP eines einzelnen Fledermausflugpfades befanden (im Folgenden abgekürzt als $RSF_{MCP100/Flugpfad}$). Unser drittes Modell bestand aus einer Schrittauswahlfunktion (SSF), um die Habitatwahl auf der lokalen Ebene unter Berücksichtigung des Flugverhaltens der Fledermaus zu untersuchen (lokaler/Verhaltensansatz, Ebene der einzelnen Standorte; Abb. 2C, F). Wir identifizierten die für die Fledermäuse relevanten Landschaftsmerkmale mithilfe von verallgemeinerten linearen gemischten Modellen und im Falle der RSF unter Annahme einer binomialen Fehlerverteilung.

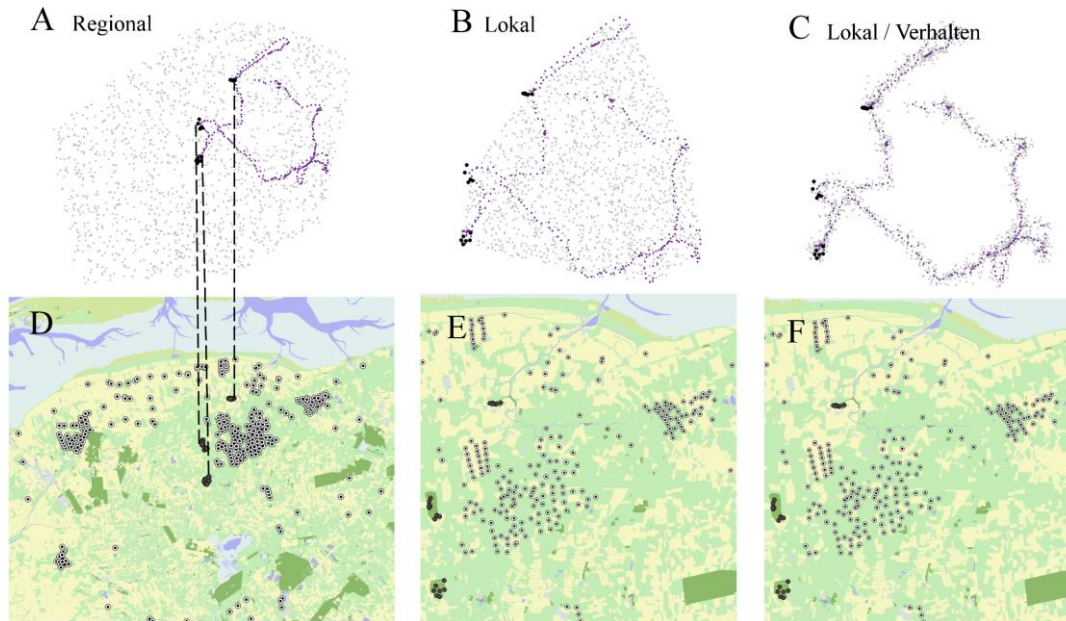


Abb. 2: Überblick über die verwendeten Modellansätze: (A regional, D) regionale Skala mit einer Ressourcenselektionsfunktion (RSF) auf der Basis von Zufallspunkten innerhalb des MCP aller GPS-Positionen (Populationsebene; $RSF_{GeneralMCP100}$), (B lokal, E) lokale Skala mit RSF auf der Basis von Zufallspunkten, die im MCP100 der individuellen Flugpfade lagen (Individualebene; $RSF_{MCP100/Flugpfad}$), und (C lokal/Verhalten, F) lokale Skala unter Berücksichtigung individueller Verhaltensweisen auf der Basis einer Schrittauswahlfunktion (individuelle Standortebebene; SSF). Die Modellansätze werden für eine individuelle Flugbahn dargestellt. Zufällige Punkte sind grau, während die beobachteten GPS-Standorte violett dargestellt sind. Die Hintergrundkarte wurde aus der Corine-Landbedeckungskarte (Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland, 2018 (LBM-DE2018), 20m-Raster) gewonnen. Informationen zu Windenergieanlagen (WEA; Symbol: weißer Kreis mit schwarzem Punkt in der Mitte) wurden aus Eichhorn et al. (2019) entnommen⁵. Größere dunkelgraue Punkte kennzeichnen die von den Individuen genutzten Baumquartiere.

Gemäß unseren Hypothesen enthielten alle Modelle die Hauptkategorien der Bodenbedeckung sowie den Anteil versiegelter Flächen, Wälder und Gewässer im Umkreis von 50 m um den GPS-Standort, die Entfernung zu Wegen, die Entfernung zur nächsten WEA, den Bewegungsmodus (ARM oder COM), die Anwesenheit von Artgenossen und das Geschlecht als feste Effekte. Des Weiteren testeten wir verschiedene Zweifach- und Dreifach-Interaktionen zwischen den Landbedeckungskategorien, der Entfernung zur nächsten WEA, dem Bewegungsmodus und dem Vorhandensein von Artgenossen. Die Modellauswahl basierte auf dem Akaike-Informationskriterium, welches für kleine Stichprobengrößen (AICc) korrigiert wurde.

Um den Einfluss von WEA-Merkmalen auf lokaler Ebene zu untersuchen, quantifizierten wir die GPS-Positionen im Umkreis von 100 m um die WEA und erstellten generalisierte lineare Modelle. Ähnlich wie bei den vorangegangenen Modellen zur Merkmalsauswahl wurden die Landbedeckungskategorie sowie der Anteil der versiegelten Fläche, der Wälder und Gewässer im Umkreis von 50m um die WEA und die Entfernung zu den Wegen als feste Effekte einbezogen. Zusätzlich testeten wir einen möglichen Effekt der Anlagengröße

(Rotorblattdurchmesser), der Entfernung zu bekannten Quartieren, der Anzahl benachbarter WEA im Umkreis von 1 km sowie die Wechselwirkungen zwischen den letzten beiden Faktoren.

Ergebnisse

Wir konnten von 11 Fledermäusen die GPS-Tags zurückgewinnen (sechs Männchen/fünf Weibchen). Diese enthielten 32 Flugrouten mit insgesamt 6.266 GPS-Positionen (Abb. 1), wobei 3,4 % der Positionen in Entfernungen in einer Distanz von weniger als 100 m zur nächsten WEA lagen. Insgesamt analysierten wir 33 Flugrouten von 22 Nächten, in denen die Tiere aktiv waren. Im Durchschnitt legten die Fledermäuse während einer Nacht 29 ± 18 km zurück (Mittelwert \pm eine SD) (Tab. 1). Die Zuordnung der Bewegungsarten zu den räumlichen Positionen ergab, dass etwa 48 % aller Raumpositionen den Transferflügen (COM), 43 % der kleinräumigen Jagd (ARM) zugewiesen wurden, und 9 % zu den undefinierten Bewegungen gehörten. Für weitere Analysen verwendeten wir die akustischen Informationen (Jagdrufe = „Feeding buzzes“, Suchrufe, soziale Rufe, Anwesenheit von Artgenossen, Lärm), die den räumlichen Positionen zugeordnet wurden. Die statistische Analyse der akustischen Aufnahmen war weitestgehend mit derjenigen der Bewegungsmodi (ARM und COM) ident, so dass wir im Folgenden nicht detailliert auf die Ergebnisse der akustischen Analysen eingehen.

Tabelle 1: Beschreibung der Flugrouten von Großen Abendseglern (n=11, 6 Männchen, 5 Weibchen, 32 Flugrouten).

Bewegungsparameter	Durchschnitt (Min. und Max.)
Flugpfade:	3 (2 – 4)
Zurückgelegte Distanz (km):	29 (4 – 71)
Maximaler Abstand zum Ausgangspunkt (km):	6 (1 – 20)
Flugdauer (min):	169 (19 – 288)
Minimale Distanz zur nächsten WEA (m):	123 (7 – 1570)

Alle drei methodischen Ansätze (Abb. 2A-E) lieferten ähnliche Ergebnisse. Aufgrund dieser Konsistenz präsentieren wir nur die Ergebnisse des SSF-Modells für Gesamteffekte, da dies die neueste Entwicklung für die Analyse von Bewegungsdaten ist, während wir die Modelle mit zufälligen Effekten (beide RSF) für die Visualisierung von Unterschieden zwischen Individuen in ihrem Verhalten gegenüber WEA verwenden.

Die Anwesenheit von Großen Abendseglern nahm mit zunehmendem Anteil versiegelter Flächen im Abstand von <100 m zu WEA zu, während versiegelte Flächen in größerer Entfernung zu WEA (>2 km) keinen Effekt auf die Fledermäuse hatten. Darüber hinaus hielten sich Abendsegler häufiger in der Nähe von Wegen auf als sich nach dem Zufallsprinzip erwarten ließ. Abendsegler waren am ehesten in der Nähe von WEA zu finden, wenn diese nahe an Gewässern standen. Große Abendsegler jagten mit größter Wahrscheinlichkeit in der

Nähe von WEA, wenn sich diese nahe an Wäldern, Gewässern und Feuchtgebieten befanden. Obwohl die meisten GPS-Raumpositionen über Ackerland und Wiesen beobachtet wurden, wurden diese Landbedeckungstypen im Verhältnis zu ihrer Verfügbarkeit im Untersuchungsgebiet meist von den Fledermäusen gemieden. Männchen und Weibchen unterschieden sich nicht in der Nutzung der analysierten Landbedeckungskategorien.

Wir fanden eine große Variabilität im individuellen Antwortverhalten der Tiere auf WEA. Auf regionaler Ebene ($RSF_{GeneralMCP100}$) schienen Große Abendsegler von WEA angelockt zu werden. Dieser Effekt verschwand jedoch, wenn Raumpositionen in der Nähe von Quartieren ausgeschlossen wurden. Dies deutet darauf hin, dass unser Befund einer Anlockwirkung hauptsächlich auf die Lage der Wälder in unmittelbarer Nähe eines großen Windparks zurückzuführen war. Unser lokaler Modellansatz war für derartige Effekte unempfindlich, und entsprechend beobachteten wir für das $RSF_{MCP100/Flugpfad}$ -Modell, dass Fledermäuse WEA mieden (Abb. 3). Die akustischen Daten verbesserten die Modellqualität nicht, was vermutlich auf die starke Korrelation zwischen den akustischen Daten und den Bewegungsmodi zurückzuführen war.

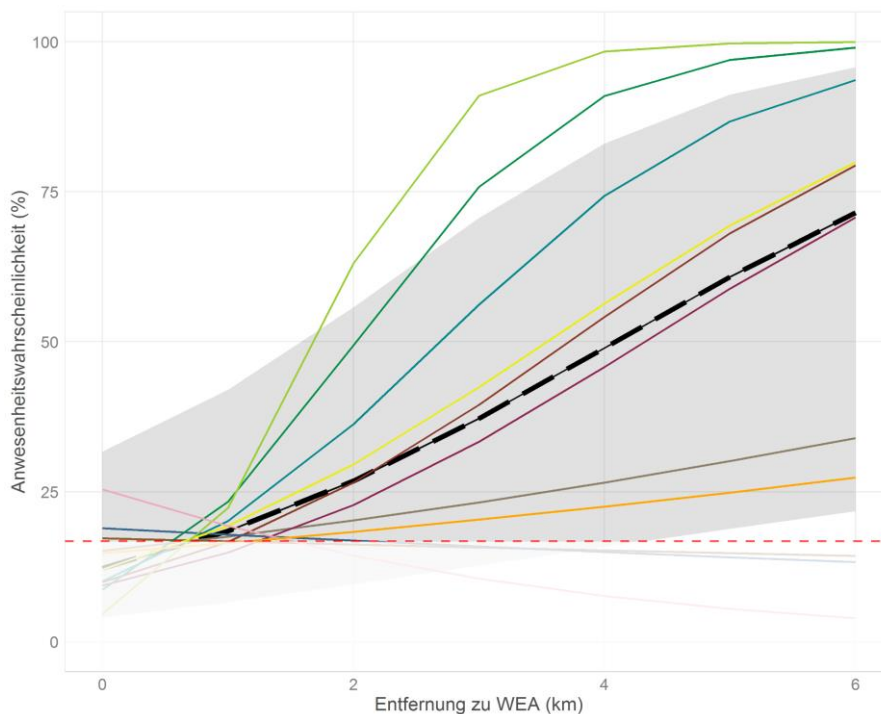


Abb. 3: Anwesenheitswahrscheinlichkeit von Großen Abendsegler in Abhängigkeit von der Entfernung (km) zu WEA. Die Antwortkurve ist auf Populationsebene (schwarze, lange gestrichelte Linie) und auf individueller Ebene (durchgezogene Linien, farbige Linien symbolisieren Individuen) dargestellt. Das darunter liegende graue Polygon zeigt das Vorhersageintervall auf Populationsebene. Die rote gestrichelte Linie beschreibt den Schwellenwert von 16,7%, der die Habitatmeidung (unten) von der Präferenz (oben) trennt. Die übrigen Variablen des Modells wurden auf einen konstanten Wert gesetzt.

Insgesamt wurden in unserem Untersuchungsgebiet 3,4 % der GPS-Positionen in einer Entfernung von weniger als 100 m zur nächstgelegenen WEA aufgezeichnet. In einem Umkreis

von 100 m um große WEA (Rotordurchmesser) wurden signifikant mehr Raumpositionen der Fledermäuse festgestellt, insbesondere wenn sich die WEA in der Nähe von Quartieren befanden (Abb. 4). Die relative Dichte von WEA nach Berücksichtigung der Quartiersnähe oder bestimmte Landschaftselemente hatten keinen Einfluss auf das Modellergebnis (Abb. 4).

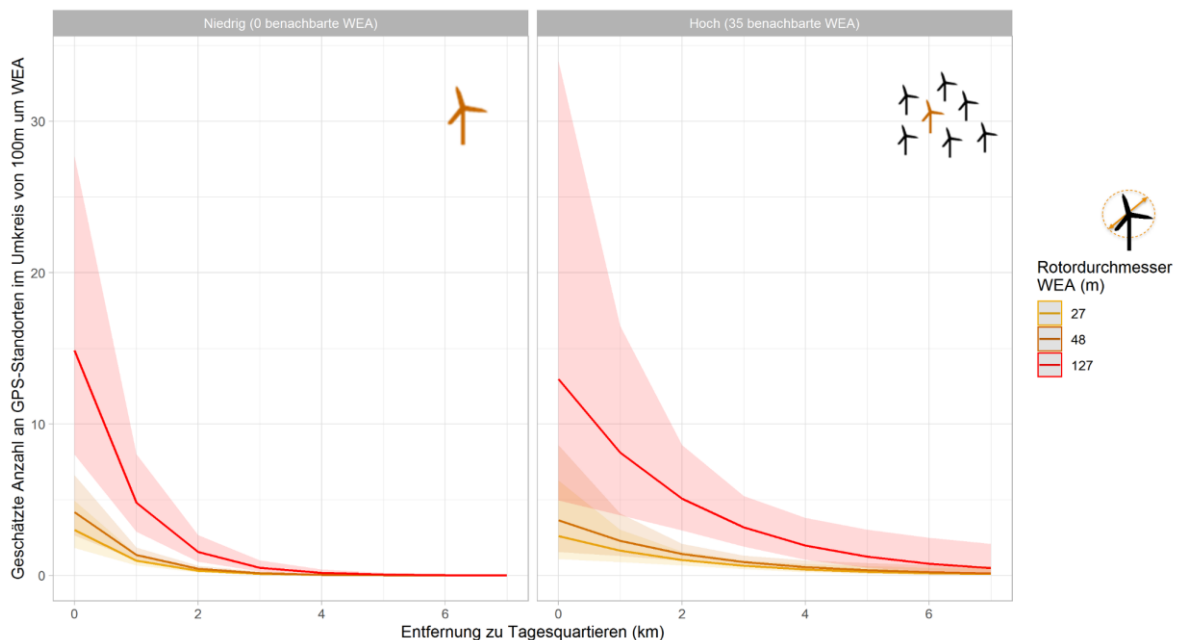


Abb.4: Geschätzte Anzahl der GPS-Standorte von Großen Abendseglern (*Nyctalus noctula*) in < 100m Entfernung zu Windenergieanlagen (WEA) im Verhältnis zur Entfernung zu bekannten Quartieren (km), der Anzahl benachbarter WEA in <1km Entfernung und dem Durchmesser der Rotorblätter der entsprechenden WEA (Durchmesser 27 m: orangefarbene Linien; Durchmesser 48 m: braune Linien; Durchmesser 127 m: rote Linien). Die Anzahl der benachbarten WEA in <1km Entfernung wurde für zwei Szenarien dargestellt (linke Grafik: keine benachbarten WEA = geringe Dichte; rechte Grafik: 35 benachbarte WEA = hohe Dichte).

Untersuchungen am Binnenstandort

Methoden:

Die Untersuchung des Raumnutzungsverhaltens von Großen Abendseglern in Relation zu WEA an einem Binnenstandort führten wir in Brandenburg durch. An diesem Standort befanden sich 4 Windparks mit durchschnittlich jeweils 27 WEA. Im Untersuchungszeitraum statteten wir 80 Große Abendsegler mit miniaturisierten GPS-Einheiten aus. Da wir nicht alle GPS-Einheiten wiederfanden, basierte unser Datensatz am Ende der Freilandarbeiten auf 8.129 GPS-Positionen von 60 Individuen (Abb. 5). Die Untersuchungsmethoden im Feld sowie die statistischen Analysen waren identisch zu denen im vorherigen Kapitel. Aufgrund des größeren Datensatzes über mehrere Feldphasen konnten in Brandenburg zusätzliche zeitliche Variablen (Jahr und Feldphase (Frühsommer und Spätsommer)) berücksichtigt werden.

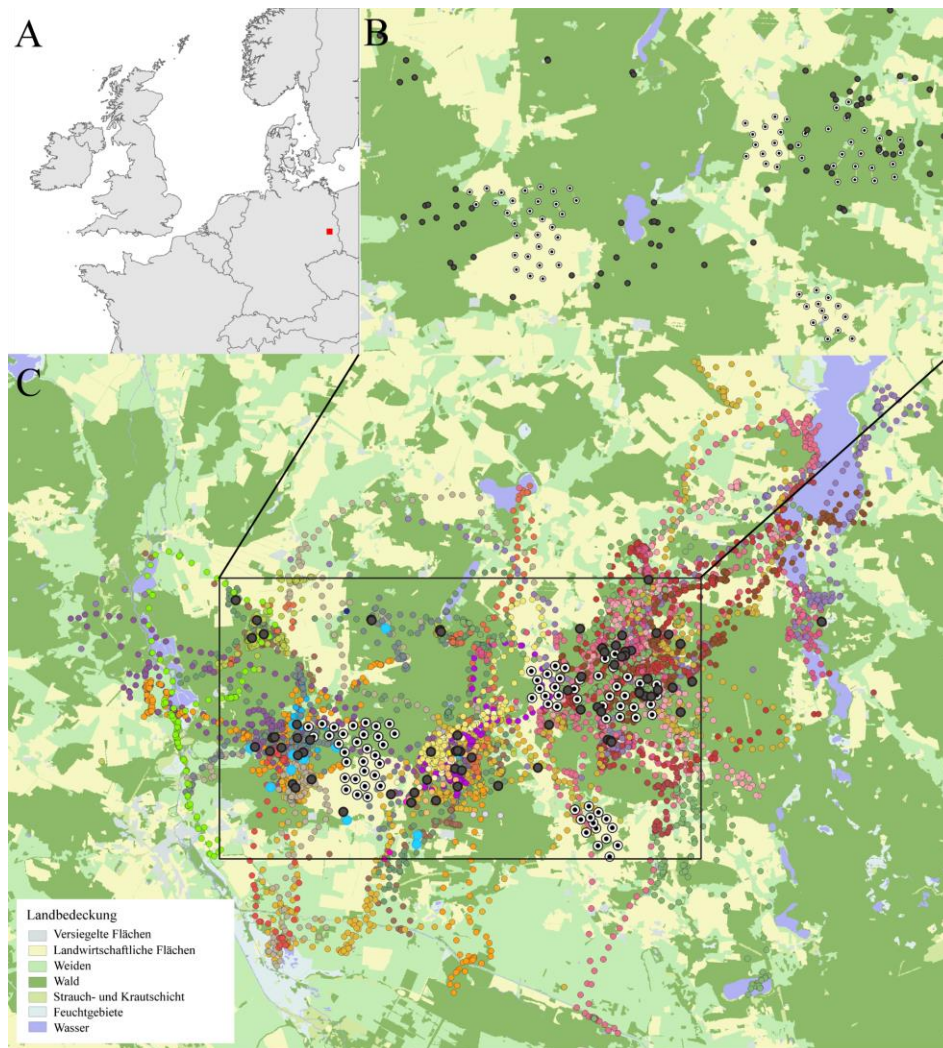


Abb. 5: Flugrouten von 60 Großen Abendseglern (*Nyctalus noctula*); farbige Punkte stehen für unterschiedliche Flugrouten in Brandenburg. Die Hintergrundkarte wurde aus B, C) Corine Landbedeckungskarte (Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland, 2018 (LBM-DE2018), 20m Raster) und A) dem R-Paket 'rworldmap' (01.12.2021) gewonnen. Informationen zu WEA (WEA; Symbol: weißer Kreis mit schwarzem Punkt in der Mitte; N=80 in unserem Untersuchungsgebiet) wurden vom Landesamt für Umwelt Brandenburg (<https://mlul.brandenburg.de/luas/gis/wka.zip>; "Windkraftanlagen des Landes Brandenburg"; letzte Aktualisierung 10.01.2020) bezogen. Größere dunkelgraue Punkte kennzeichnen von den Individuen genutzte Baumquartiere. Das schwarze Rechteck in C) zeigt die Größe und Lage der Karte B) im Vergleich.

Während einer Nacht legten die Fledermäuse im Durchschnitt 18 ± 10 km zurück (Tab. 2). Die Zuordnung der Bewegungsarten zu den räumlichen Positionen ergab, dass etwa 40 % zum Pendeln (COM), 51 % zum Jagen (ARM), d. h. zur flächenbegrenzten Bewegung, und 9 % zu den undefinierten Bewegungen gehörten. ARM traten häufiger über Wäldern und COM häufiger über landwirtschaftlichen Flächen und Wiesen auf.

Tabelle 2: Beschreibung der individuellen Flugrouten (farbig kodiert) von 60 Großen Abendseglern (42 Männchen, 18 Weibchen) in Brandenburg im Früh- und Spätsommer 2019 und 2020.

Bewegungsparameter	Durchschnitt (Min. und Max.)
Flugpfade:	2 (1 - 3)
Zurückgelegte Distanz (km):	18 (3 - 46)
Maximaler Abstand zum Ausgangspunkt (km):	4 (0 - 18)
Flugdauer (min):	139 (21 - 314)
Minimale Distanz zur nächsten WEA (m):	651 (6 - 4009)

Alle drei methodischen Ansätze (Abb. 2) ergaben ähnliche Ergebnisse für die dreifache Interaktion von Merkmalen sowie für die Distanz zu Pfaden in beiden Modellsätzen. Dies stützt die Robustheit der Ergebnisse. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse des $RSF_{MCP100/Flugpfad}$ -Modells für Gesamteffekte dargestellt, um die Kombination von Ergebnissen auf lokaler Ebene und zufälligen Effekten als Möglichkeit zur Überprüfung individueller Unterschiede zwischen Individuen in ihrem Verhalten gegenüber WEA zu nutzen.

Im Untersuchungsjahr 2019 waren männliche Große Abendsegler mit größerer Wahrscheinlichkeit über Flächen mit höherem Anteil von Wald und Wasser anzutreffen. Diese Präferenz nahm mit der Nähe von WEA zu. Im Spätsommer war jedoch ein solcher Anstieg nicht zu beobachten. Darüber hinaus war die Wahrscheinlichkeit, dass Große Abendsegler in der Nähe von Wegen vorkamen, relativ hoch.

Wir beobachteten eine große Variabilität zwischen Individuen in ihrem Bewegungsverhalten zu WEA. Auf lokaler Ebene zeigte das $RSF_{MCP100/Flugpfad}$ -Modell, dass männliche Fledermäuse WEA im Spätsommer 2019 mieden und im Frühsommer 2019 und 2020 im Allgemeinen auf Populationsebene ein eher indifferentes Verhalten gegenüber WEA zeigten (Abb. 6). Wir beobachteten keine Unterschiede im Annäherungsverhalten an WEA zwischen den Geschlechtern. Nach dem $RSF_{GeneralMCP100}$ -Modell schienen auf regionaler Ebene Große Abendsegler stark von WEA angezogen zu werden.

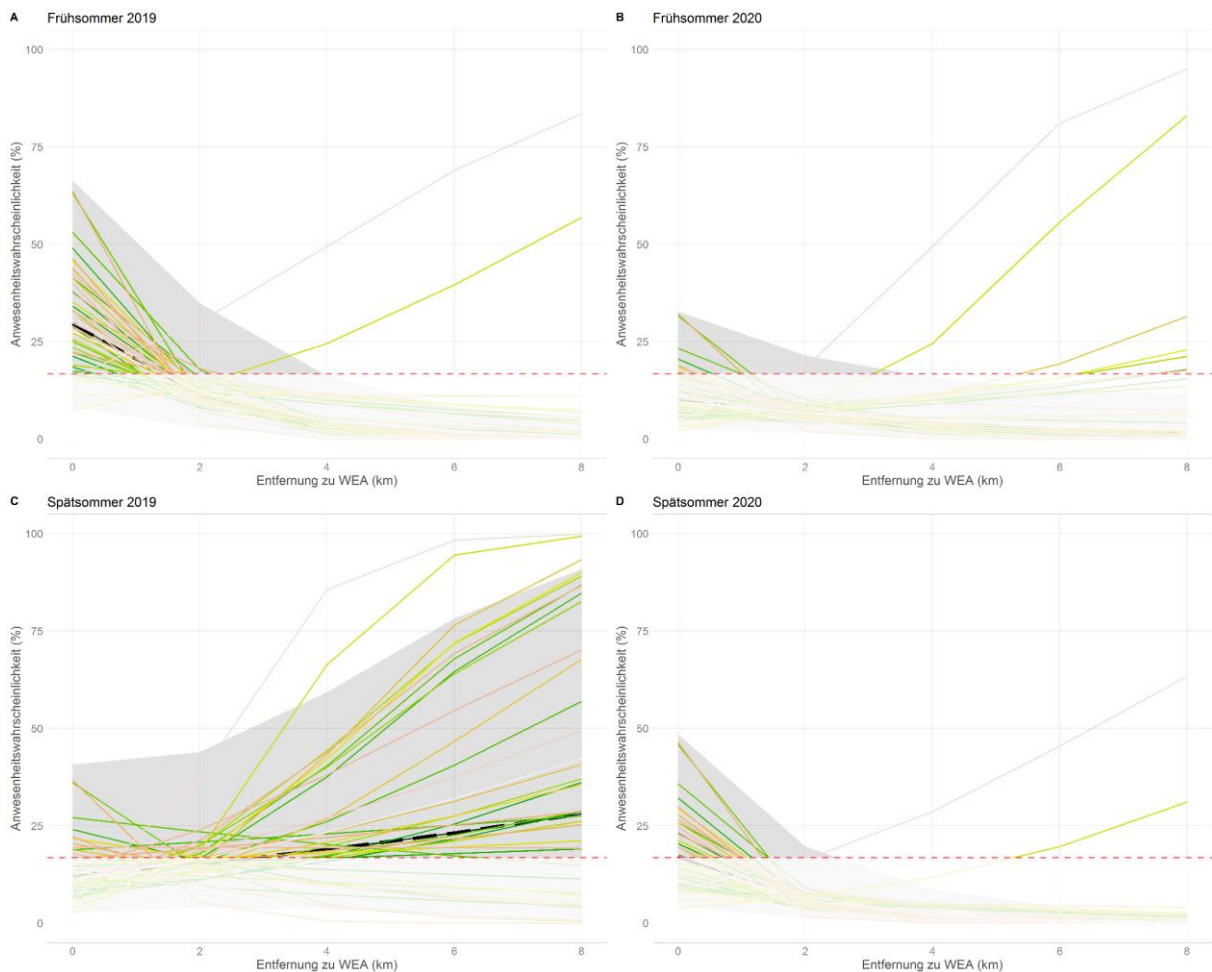


Abb. 6: Geschätzte Anwesenheitswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Entfernung (km) zu WEA für Große Abendsegler (*Nyctalus noctula*). Die Zufallspunkte für den Vergleich wurden innerhalb eines MCP100 generiert, das alle GPS-Positionen der einzelnen Flugpfade umfasst (RSF_{MCP100/Flugpfad}). Verglichen werden die Schätzungen für die vier Szenarien A) Frühsommer 2019, B) Frühsommer 2020, C) Spätsommer 2019 und D) Spätsommer 2020. Die Reaktionskurve ist auf individueller Ebene (durchgezogene Linien, Farben für Individuen) und auf Populationsebene (schwarze, lange gestrichelte Linie) dargestellt. Das darunter liegende graue Polygon zeigt das Vorhersageintervall auf Populationsebene. Die rote gestrichelte Linie beschreibt den Schwellenwert von 16,7 %, der die Habitatmeidung (unten) von der Präferenz (oben) trennt. Die übrigen Variablen des Modells wurden auf einen konstanten Wert gesetzt.

Insgesamt wurden 2,4 % aller beobachteten GPS-Positionen von Großen Abendseglern in einer Entfernung von weniger als 100 m zur nächsten WEA aufgezeichnet. Im Umkreis von 100 m um große WEA (Durchmesser des Rotors) und in der Nähe von Tagesquartieren wurden deutlich mehr GPS-Positionen von Großen Abendseglern festgestellt als in der Nähe von kleinen WEA oder in großer Entfernung zu Tagesquartieren. Außerdem wurden WEA, die am Rande eines Windparks standen, häufiger von Großen Abendseglern angefliegen, als solche, die im Zentrum des Windparks standen (Abb. 7; $R^2=0,55$).

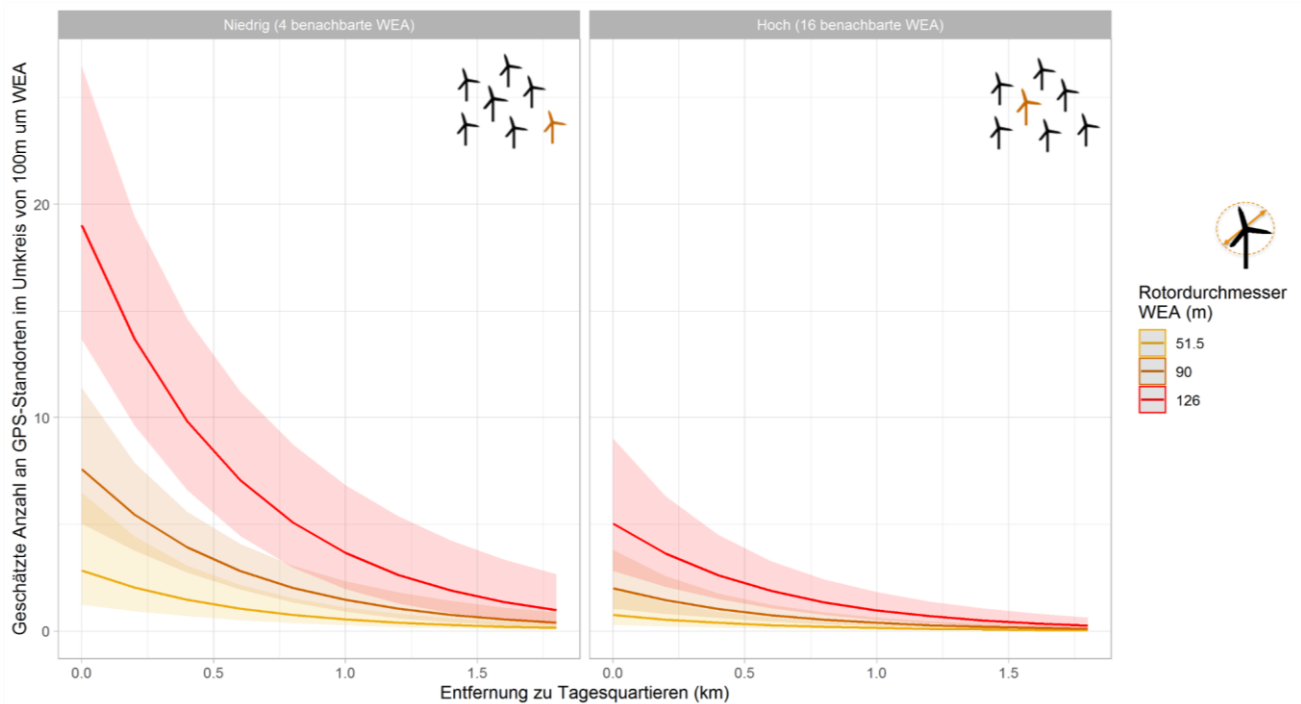


Abbildung 7: Geschätzte Anzahl der GPS-Standorte von Großen Abendseglern (*Nyctalus noctula*) im Umkreis von 100 m um eine Windenergieanlage (WEA) in Abhängigkeit von der Entfernung zu Tagesquartieren (km), der Anzahl an benachbarten WEA in 1 km Entfernung und dem Durchmesser der Rotorblätter der entsprechenden WEA (Durchmesser 51,5 m: orangefarbene Linien; Durchmesser 90 m: braune Linien; Durchmesser 126 m: rote Linien). Die Anzahl der benachbarten WEA in 1 km Entfernung wird durch zwei Szenarien (niedrige Dichte - 4 benachbarte WEA; hohe Dichte - 16 benachbarte WEA) für den Untersuchungsstandort in den verschiedenen Feldern der Abbildung charakterisiert.

Synthese

Wie verhalten sich Fledermäuse in Raum und Zeit zu WEA?

An unserem Küstenstandort stellten wir fest, dass in der Nähe von WEA versiegelte Flächen eine hohe Anlockwirkung für Große Abendsegler hatten. Diese versiegelten Flächen lagen in der Regel in der Nähe von landwirtschaftlichen Betrieben, in denen Viehhaltung betrieben wurde. Vermutlich profitieren hier Große Abendsegler von der größeren Insektenbiomasse in der Luft. Darüber hinaus nutzten Abendsegler lineare Landschaftselemente wie Wegestrukturen. Abendsegler waren zudem am ehesten in der Nähe von WEA zu finden, wenn diese nahe an Gewässern oder aber in der Nähe von Wäldern oder Feuchtgebieten befanden. Auch an unserem Binnenstandort hielten sich Große Abendsegler vermehrt an WEA auf, wenn diese an Wegen, in Wäldern oder an Gewässern lagen. Eine Meidung derartiger Aufstellorte für WEA könnte helfen, die Interaktion von Großen Abendseglern an WEA zu reduzieren. Dies könnte zu einer höheren Energieproduktion der WEA führen, wenn diese mit weniger Abschaltzeiten beauflagt werden müssten.

Wir fanden an beiden Untersuchungsstandorten eine große Variabilität im individuellen Antwortverhalten der Tiere auf WEA. An unserem Küstenstandort wurde ein Meideverhalten von Großen Abendseglern gegenüber WEA festgestellt. Am Binnenstandort beobachteten wir, dass männliche Fledermäuse WEA im Spätsommer 2019 mieden und im Frühsommer 2019 und 2020 im Allgemeinen auf Populationsebene ein eher indifferentes Verhalten gegenüber WEA zeigten. Wir fanden keine signifikanten Unterschiede im Verhalten der beiden Geschlechter zu WEA. Auf regionaler Ebene schienen Große Abendsegler stark von WEA angelockt zu werden.

Welche Reize für eine Anlockwirkung oder Vergrämung der Fledermäuse von Bedeutung?

An unserem Küstenstandort stellten wir in einem Umkreis von 100 m um WEA mehr Große Abendsegler fest, wenn es sich um große WEA handelte (großer Rotordurchmesser), insbesondere dann wenn sich die WEA in der Nähe von Quartieren befanden (Abb. 4). Auch an unserem Binnenstandort beobachteten wir mehr Große Abendsegler im Umkreis von 100 m, wenn es sich um große Anlagen (Rotordurchmesser) in der Peripherie von Windparks handelte und wenn sich diese Anlagen in der Nähe von Tagesquartieren befanden.

Was motiviert Fledermäuse, sich an WEA aufzuhalten?

Die kombinierte Analyse der akustischen Daten mit den Raumpositionen verbesserte die Vorhersagemodelle nicht, was vermutlich auf den engen Zusammenhang zwischen akustischer Information und Bewegungsmodi zurückzuführen war. Demnach konnten wir keine stärkere Interaktion mit Artgenossen bzw. keine vermehrte Insektenjagd von Großen Abendseglern an WEA feststellen.

Wir schließen aus unseren Untersuchungen, dass der Aufstellungsort und die Größe der WEA bzw. die Lage der WEA in Relation zu anderen eines Windparks von entscheidender Bedeutung für die Interaktion von Großen Abendseglern mit WEA ist. Eine entsprechende Berücksichtigung dieser Faktoren bei der Installation von WEA könnte maßgeblich den Konflikt zwischen Windenergieproduktion und Fledermausschutz reduzieren und gleichzeitig zu einer höheren Energieproduktion aus Windkraft führen.

Literaturverzeichnis

- ¹ Cryan et al. (2014) Behavior of bats at wind turbines. *Proc Nat Acad Sci* 111, 15126
- ² Lintott et al. (2016) Ecological impact assessments fail to reduce risk of bat casualties at wind farms. *Curr Biol* 26, R1135
- ³ Roeleke et al. (2016) Habitat use of bats revealed by GPS tracking. *Sci Rep* 6,28961
- ⁴ Kunz et al. (2007). Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses. *Front Ecol Environ*, 5, 315
- ⁵ Eichhorn et al. (2019) Spatial Distribution of Wind Turbines, Photovoltaic Field Systems, Bioenergy, and River Hydro Power Plants in Germany. *Data* 4. <https://doi.org/10.3390/data4010029>