

Schlussbericht

mFund – Förderlinie 1

FLEBEFA

Entwicklung eines FLEdermausfreundlichen
adaptiven BEleuchtungskonzepts für
Fahrradwege

Antragsteller: PD Dr. Christian Voigt
Telefonnummer: 030-5168-511
E-Mail-Adresse: voigt@izw-berlin.de

Name und Anschrift: Leibniz-Institut für Zoo- und Wildtierforschung
Alfred-Kowalke-Str. 17
10315 Berlin

Autoren: Dr. Olga Heim
PD Dr. Christian Voigt
Dr. Tobias Degen
PD Dr. Franz Hölker

Ansprechpartner: PD Dr. Christian Voigt

Inhaltsverzeichnis

1.	Kurze Darstellung	2
1.1.	Aufgabenstellung	2
1.2.	Planung und Ablauf des Vorhabens	2
1.3.	Wissenschaftlicher und technischer Stand	3
1.4.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	3
2.	Eingehende Darstellung	4
2.1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen.....	4
2.2.	Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	15
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	15
2.4.	Voraussichtlicher Nutzen	15
2.5.	Veröffentlichungen des Ergebnisses	15
3.	Abbildungsverzeichnis	15
4.	Tabellenverzeichnis.....	16
5.	Literaturverzeichnis.....	17

1. Kurze Darstellung

1.1. Aufgabenstellung

Die Beleuchtung von Radwegen könnte die Sicherheit von Radfahrenden erhöhen und somit eine nachhaltige Mobilität fördern. Gleichzeitig kollidiert die Beleuchtung von Radwegen mit Naturschutzziele, wenn geschützte Fledermausarten durch das künstliche Licht gestört werden. Diese Störung ließe sich durch ein adaptives Lichtmanagement reduzieren, welches nur bei Bedarf über Bewegungssensoren von Fahrradfahrenden aktiviert wird. Es ist jedoch unklar, ob sich der negative Einfluss auf Fledermäuse dadurch tatsächlich reduzieren lässt. Im Rahmen des Projekts FLEBEFA wurde untersucht, welche Auswirkungen ein kontextabhängiges Lichtmanagement entlang eines regionalen Fahrradwegs auf Fledermäuse hat. Dabei wurde über ein akustisches Monitoring sowie über dreidimensionale Flugpfadanalysen das Antwortverhalten der lokal vorkommenden Fledermausarten auf die bewegungsgesteuerte Beleuchtung des Radwegs erfasst und bewertet.

1.2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt lief vom 1. Mai 2022 bis zum 31. März 2023 über einen Gesamtzeitraum von zehn Monaten. Es war in vier Arbeitspakete (AP) unterteilt.

- AP 1 Akustik
- AP 2 Dreidimensionale (3D) Bewegungen von Fledermäusen
- AP 3 Radiometrische Erfassung der Lichtexposition der Fledermäuse
- AP 4 Abschlussveranstaltung und –bericht

Die chronologische Abfolge der AP ist in Abbildung 1 aufgeführt.

	Mai 22	Jun 22	Jul 22	Aug 22	Sep 22	Okt 22	Nov 22	Dez 22	Jan 23	Feb 23	Mär 23
Kick-off-meeting der PAG											
AP1: Bioakustisches Monitoring											
AP1: Analyse der Akustikaufnahmen											
AP1: Statistische Analyse der Daten											
AP2: 3D Bewegungserfassung											
AP2: Analyse der 3D Bewegungspfade											
AP3: Analyse der Lichtexposition											
AP4:Verfassen des Schlussberichts											
AP4:Abschlussveranstaltung											

Abb. 1: Chronologische Abfolge der Arbeitspakete (AP)

1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Fledermäuse sind eine obligat nachtaktive Säugetiergruppe, die sowohl nach dem Bundesnaturschutzgesetz als auch nach der EU Habitat Direktive geschützt sind. Aufgrund dieses hohen Schutzstatus dürfen ihre Lebensstätten nicht gestört und ihre Lebensräume nicht verschlechtert werden. Im Allgemeinen reagieren Fledermäuse jedoch sensibel auf künstliches Licht bei Nacht (Stone et al. 2015, Rowse et al. 2016). Somit stellen Beleuchtungsprojekte im Außenbereich Eingriffsmaßnahmen dar, deren Wirkung auf Fledermäuse geprüft werden müssen (Voigt et al. 2019). In der Vergangenheit konnten bereits Management-Empfehlungen formuliert werden, um Fledermäuse vor den negativen Folgen einer künstlichen Beleuchtung bei Nacht zu schützen (Voigt et al. 2019). Frühere Studien konzentrierten sich jedoch auf die Untersuchung des Antwortverhaltens von Fledermäusen auf solche Beleuchtungsregimes, die entweder durchgehend (z.B. Spoelstra et al. 2015, 2017) oder zeitlich auf wenige Nachtstunden beschränkt Licht emittierten (z.B. Azam et al. 2015). Bisher wurde nicht untersucht, ob ein adaptives Lichtmanagement weniger störend auf Fledermäuse wirkt.

Bei einem adaptiven Lichtmanagement schaltet sich das Licht im Bedarfsfall an, wenn ein Radfahrer oder Fußgänger den Bewegungssensor auslöst, der die LED Lampen steuert. Nachdem der Radfahrer oder Fußgänger den Erfassungsbereich des Bewegungssensors verlassen hat, schaltet sich die Beleuchtung wieder aus. Diese bedarfsgerechte Beleuchtung könnte die Störung von Fledermäusen durch die Lichtemissionen reduzieren.

Das spezifische Antwortverhalten der Fledermäuse auf ein adaptives Lichtmanagement könnte sich artspezifisch auf Fledermäuse auswirken. Diese Erwartung ergibt sich aus der Beobachtung, dass Fledermäuse unterschiedlicher ökologischer Gilden verschieden auf künstliches Licht bei Nacht reagieren (Voigt et al. 2021). Fledermausarten, die im offenen Luftraum oder an Randstrukturen nach Nahrung suchen, jagen Insekten mitunter auch an Straßenlaternen und lassen sich als opportunistisch gegenüber künstlichem Licht bei Nacht beschreiben. Sogenannte Waldfledermäuse, die auf eine Nahrungssuche in dichter Vegetation spezialisiert sind, meiden künstliches Licht bei Nacht und werden somit als lichtsensibel definiert (Voigt et al. 2021). Allerdings variiert die spezifische Reaktion der Fledermäuse einer Gilde zwischen verschiedenen Teillebensräumen, z.B. in Abhängigkeit davon, ob ein Lebensraum zur Jagd oder nur für den Transferflug benutzt wird (Voigt et al. 2021).

1.4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

- Amt für Mobilität und Tiefbau Münster
- Amt für Grünflächen, Umwelt und Nachhaltigkeit Münster
- Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)
- Teilnahme an Veranstaltungen zur Begleitforschung: Online-Workshop am 21.07.2022: Vom Förderprojekt zur Gründung – wie es geht und wie andere Projekte es geschafft haben

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

AP 1: Akustik

Der im FLEBEFA Projekt untersuchte regionale Fahrradweg nahe der Stadt Münster wird über ein adaptives Lichtmanagement beleuchtet. Um das akustische Antwortverhalten von Fledermäusen auf die adaptive Beleuchtung zu untersuchen, wurden entlang einer 1,5 km langen Teststrecke der sogenannten Kanalpromenade in Zusammenarbeit mit dem Amt für Mobilität und Tiefbau und dem Amt für Grünflächen, Umwelt und Nachhaltigkeit der Stadt Münster fünf Untersuchungsstandorte ausgewählt (Abb. 2). Diese Untersuchungsstandorte deckten die Bandbreite der lokalen Lebensräume für Fledermäuse ab. An jeweils einem Standort wurden ein Ultraschalldetektor (BATLOGGER A+, Fa. Elekon, Luzern, Schweiz) sowie ein Lichtsensor am Laternenmast angebracht (Abb. 2). Die Aufnahmen der akustischen Aktivität der Fledermäuse sowie des Beleuchtungsmodus wurde während der Reproduktionszeit (Juni/Juli) und Migrationszeit der Fledermäuse (August/September) an jeweils drei Nächten durchgeführt (Tab. 1).

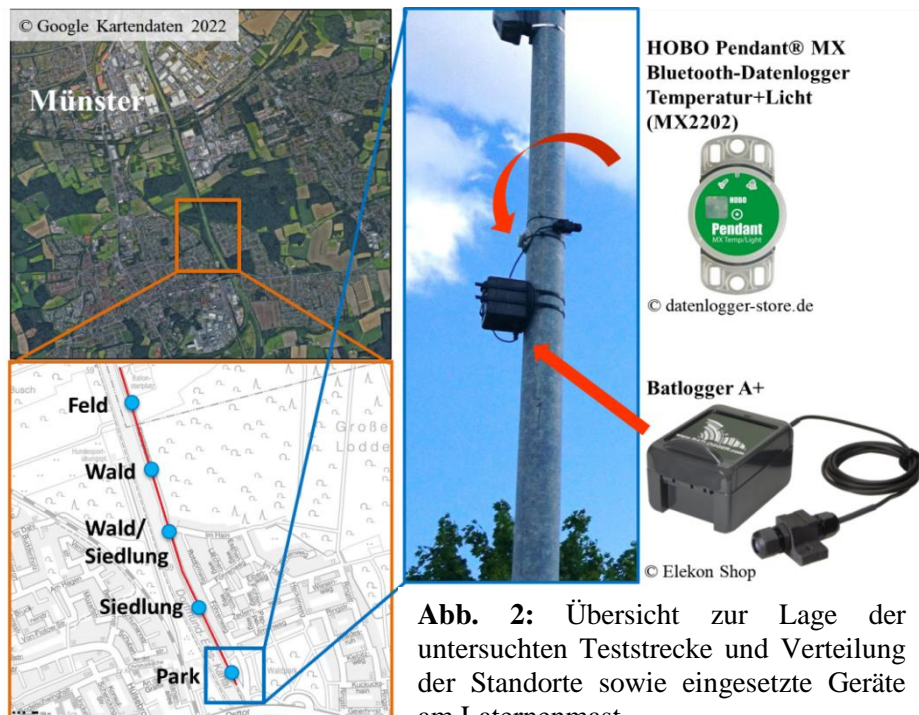


Abb. 2: Übersicht zur Lage der untersuchten Teststrecke und Verteilung der Standorte sowie eingesetzte Geräte am Laternenmast.

Tab. 1: Metadaten der Aufnahmenächte einschließlich nächtlicher Temperaturen (gemessen vom Lichtsensor), Sonnenaufgangs- und Sonnenuntergangszeiten und Tage relativ zum Neumond.

Saison	Datum	Temperaturen [°C]			Sonnen-		Neumond	Tage vor/nach Neumond
		Min	Mittel	Max	untergang	aufgang		
Reproduktion	2022-06-28	11.92	15.73	20.68	21:53	05:12	2022-06-28	0
	2022-07-04	11.97	15.46	20.33	21:51	05:17	2022-06-28	+6
	2022-07-07	13.73	14.88	16.17	21:50	05:19	2022-06-28	+9
Migration	2022-08-22	14.67	18.54	24.32	20:38	06:26	2022-08-27	-5
	2022-09-01	13.12	15.53	20.89	20:18	06:42	2022-08-27	+5
	2022-09-04	13.81	17.65	24.15	20:09	06:47	2022-08-27	+8

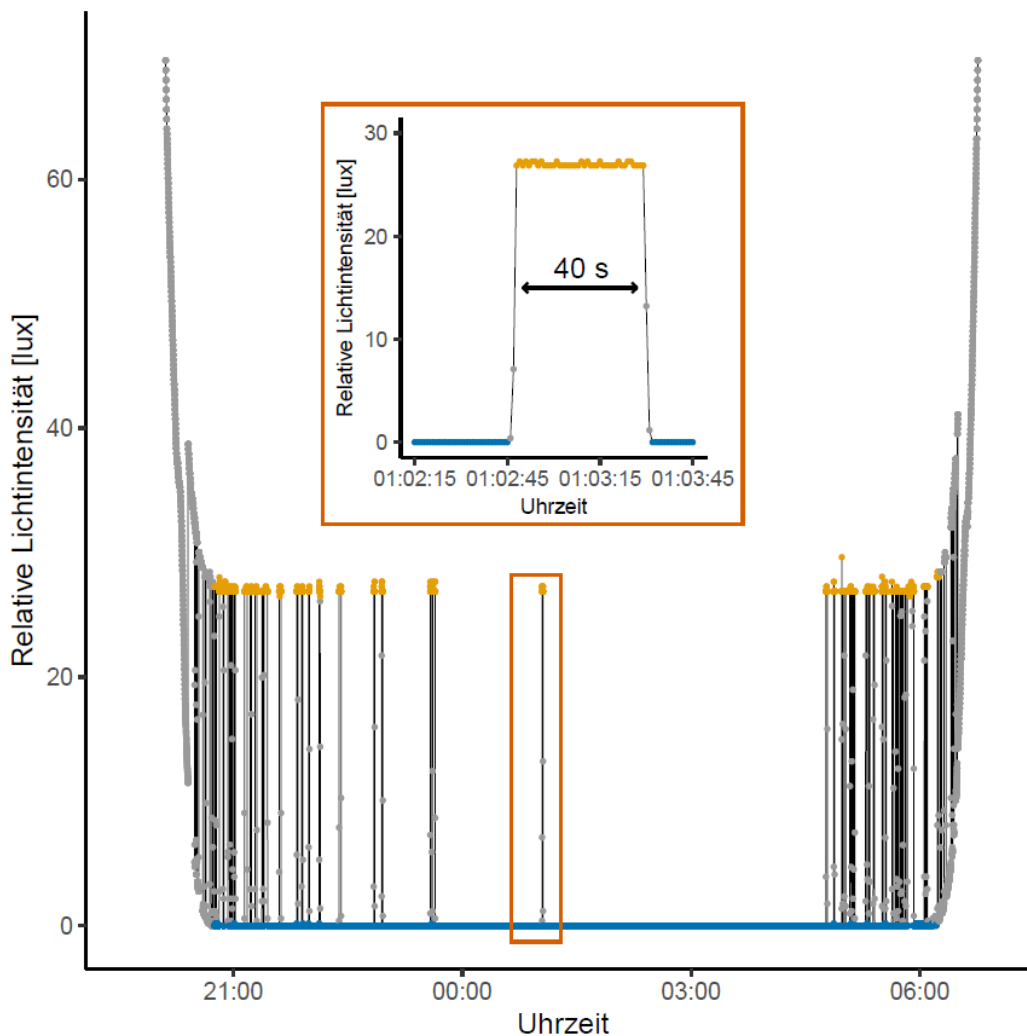


Abb. 3: Exemplarische Darstellung der vom Lichtsensor gemessenen relativen Lichtintensität (lux) in der Nacht vom 4. auf den 5. September 2022 am Standort „Wald“. Datenpunkte, welche mit dem Beleuchtungsstatus „an“ (orange) und „aus“ (blau) assoziiert sind, wurden in weiteren Analysen einbezogen. Datenpunkte, welche im Bereich der Dämmerung lagen oder mittlere relative Lichtintensitäten darstellten (grau) blieben in den Analysen unberücksichtigt. Die eingeschobene kleinere Abbildung illustriert die 40 s dauernde Aktivierung der LED.

Im Verlauf der sechs Aufnahmenächte schwankte die Lufttemperatur im Mittel zwischen 14.9 °C und 18.5 °C und die Windstärken zwischen 1-5 m/s. Aufgrund der ähnlichen Umweltbedingungen wurde kein Einfluss der Umgebungstemperatur und der Windgeschwindigkeit auf die Aktivität der Fledermäuse erwartet.

Die Beleuchtung wurde vor allem in den ersten 2-3 Stunden und den letzten 1-2 Stunden der Nacht besonders häufig aktiviert (Abb. 4). Die prozentuale Beleuchtungsdauer pro Stunde (Abb. 4) variierte je nach Standort und Aufnahmenacht. An manchen Standorten wurde um Mitternacht die Beleuchtung über Zeiträume von bis zu 20 Minuten aktiviert (Abb. 4).

In den Aufnahmenächten wurden insgesamt 60.445 Ultraschallaufnahmen registriert. Da eine verlässliche Bestimmung der Fledermausart auf einer Mindestanzahl von drei qualitativ hochwertigen Echoortungsrufen basiert, wurden zunächst diejenigen Aufnahmen aussortiert, welche weniger als drei Echoortungsrufe beinhalteten. Die restlichen Aufnahmen wurden mit Hilfe der Software BatExplorer auf die Ebene der Art oder Gattung identifiziert. Die Aktivität

der lokal vorkommenden Fledermäuse wurde für jede lokal vorkommende funktionelle Gilde (Offenraumjäger, Strukturrandjäger, Waldspezialisten) erfasst. Hierbei wurden Fledermausarten der Gattungen *Nyctalus*, *Eptesicus* und *Vespertilio* in die Gilde der Offenraumjäger eingruppiert. Fledermausarten der Gattung *Pipistrellus* wurden zur Gilde der

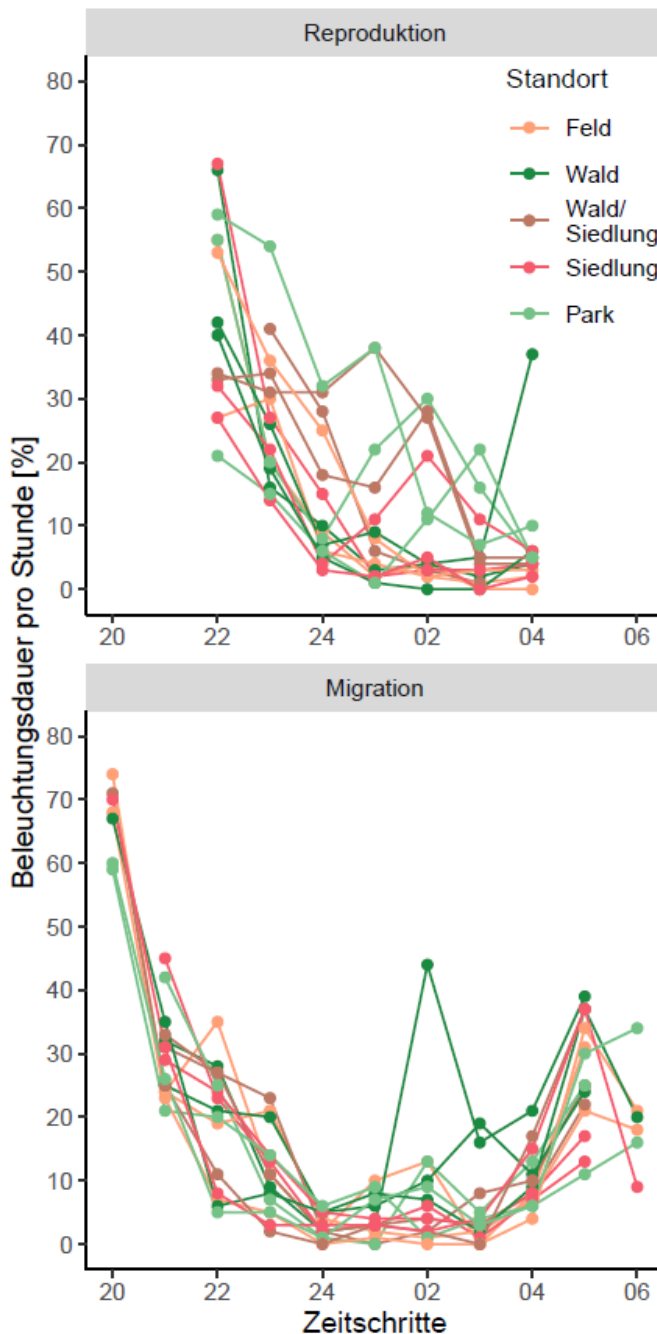


Abb. 4: Prozentuale Beleuchtungsdauer pro Stunde über alle Standorte und Nächte hinweg für die Zeiträume Reproduktion (Juni/Juli) und Migration (August/September). Zur Berechnung der prozentualen Beleuchtungsdauer wurden die Sekunden mit Beleuchtung den Sekunden ohne Beleuchtung innerhalb einer Stunde gegenübergestellt.

Strukturrandjäger und die Gattungen *Myotis* und *Plecotus* wurden den Waldspezialisten zugeordnet. Danach berechneten wir, über welche Dauer einer Nachtstunde Fledermäuse der jeweiligen Gilde vor Ort aktiv waren.

Das Aktivitätsmuster der Fledermäuse variierte zwischen den Vertretern der drei funktionalen Gilden (Abb. 5A-C). Die Aktivität der Offenraumjäger sank über die Nacht hinweg stetig ab (Abb. 5A). Die Strukturrandjäger waren vor allem in den ersten und letzten Stunden der Nacht aktiv (Abb. 5B). Die Waldspezialisten waren während der Nacht relativ konstant aktiv (Abb. 5C).

Für die statistische Analyse des Antwortverhaltens der Fledermausgilden wandelten wir die Aktivitätsdaten jedes nächtlichen Stundenintervalls für jeden Standort in An- und Abwesenheitsdaten um. Die statistische Auswertung erfolgte mit der Analyseplattform R (R Version 4.2.2, package spaMM), wobei für jede Gilde ein separates Modell gerechnet wurde. In allen drei Modellen nutzten wir folgende erklärende Variablen: den Status des Lichts (an/aus) in Interaktion mit dem Standort sowie die Stundenblöcke in Interaktion mit dem Standort und die Stundenblöcke in Interaktion mit dem Lichtstatus. Zudem nutzten wir die Aufnahmeächte als Zufallseffekt und fügten eine Struktur hinzu, welche die zeitliche Abhängigkeit der Aktivität pro Standort im Modell darstellte ($AR1(1|Zeitblock \%in\% Standort)$). Im Falle der Strukturrandjäger konnte keine Interaktion zwischen dem Status des Lichts und dem Standort berücksichtigt werden, da die Fledermäuse dieser Gilde nur an einem Standort die Kombination aus „Licht aus“ und „keine Aktivität“ erfüllten.

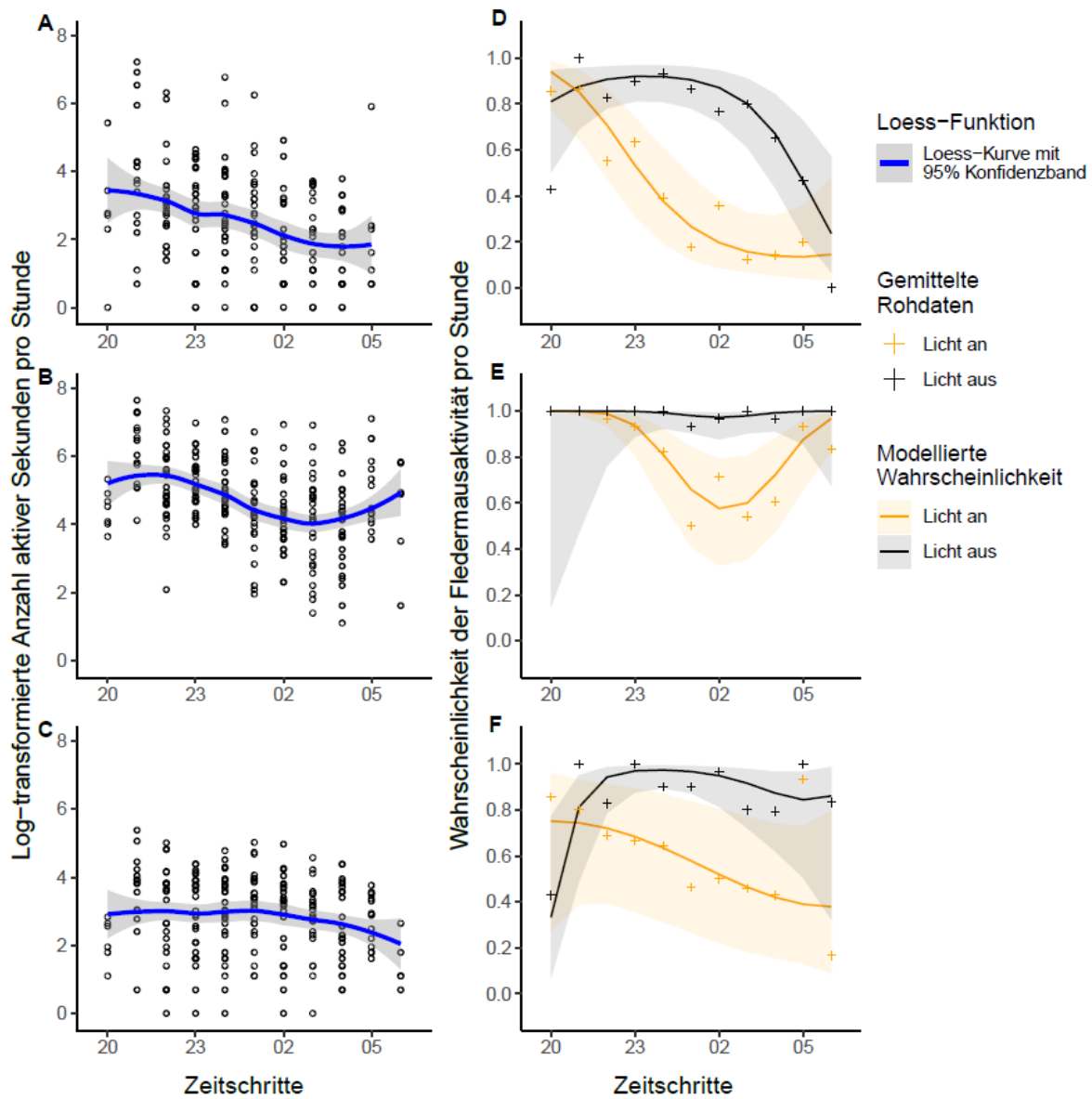


Abb. 5: Akustische Aktivität pro Nachtstunde (A bis C; log-transformierte Anzahl Sekunden mit Aktivität, $n_{\text{Offenraumjäger}} = 205$, $n_{\text{Strukturrandjäger}} = 247$, $n_{\text{Waldspezialisten}} = 229$) und Aktivitätswahrscheinlichkeit (D bis F; für jede Gilde: $n = 489$) in Abhängigkeit zur Beleuchtung (an/aus) für die lokalen funktionalen Gilden der Offenraumjäger (A & D), Strukturrandjäger (B & E), und Waldspezialisten (C & F). Akustische Aktivität in A bis C erscheint geklumpt aufgrund der stündlichen Datenaggregation. Für eine standortunabhängige Darstellung der Aktivitätswahrscheinlichkeiten (D bis F) wurden Modelle ohne den Faktor „Standort“ herangezogen.

Die jeweiligen Modelle der drei ökologischen Gilden erklärten signifikant mehr Varianz als die entsprechenden Null-Modelle (LRT-test, Tab. 2). Zudem stellten wir für die Aktivitätswahrscheinlichkeit von Offenraumjägern und Waldspezialisten einen signifikanten Einfluss der Beleuchtung in Interaktion mit der Nachtzeit fest. Für die Aktivitätswahrscheinlichkeit von Strukturrandjägern war zwar die Beleuchtung ebenfalls ein signifikanter Wirkfaktor jedoch nicht in der Interaktion mit der Nachtzeit (Tab. 2).

Tab. 2: Testergebnisse der LRT-Tests mit Signifikanzwerten zwischen vollen Modellen und den entsprechenden Null-Modellen oder Modellen ohne spezifische Faktoren und Interaktionen. Signifikante Effekte sind in fetter Schrift hervorgehoben.

Volles Modell verglichen mit:	Offenraumjäger			Strukturrandjäger			Waldspezialisten		
	χ^2	df	p	χ^2	df	p	χ^2	df	p
Null-Modell	94.80	21	< 0.001	70.71	17	< 0.001	103.93	27	< 0.001
Modell ohne Licht	133.21	7	< 0.001	71.44	3	< 0.001	89.98	8	< 0.001
Modell ohne Standort	18.27	16	0.270	12.05	12	0.457	24.14	20	0.192
Modell ohne Zeit	29.70	12	< 0.001	12.16	12	0.458	42.24	18	0.003
Modell ohne Interaktionen	94.69	21	< 0.001	69.33	17	< 0.001	105.04	27	< 0.001
Modell ohne Interaktion Licht:Standort	3.10	4	0.543	-	-	-	5.60	4	0.229
Modell ohne Interaktion Zeit: Standort	11.44	8	0.187	12.25	12	0.441	13.75	12	0.329
Modell ohne Interaktion Zeit:Licht	31.42	20	0.043	0.17	2	0.893	14.84	3	0.002

Wir stellten fest, dass die Beleuchtung des Fahrradwegs mit einer verringerten Aktivitätswahrscheinlichkeit von Fledermäusen aller Gilden einherging (Abb. 5D-F). Bei den Offenraumjägern und Waldspezialisten war die Reduktion der Aktivitätswahrscheinlichkeit im Schein der LED Lampen im Vergleich zur Dunkelheit in den ersten Stunden der Nacht nicht nachweisbar, nahm jedoch mit fortschreitender Stunde zu (Abb. 5D-F). In den frühen Morgenstunden nahm die Aktivitätswahrscheinlichkeit der Offenraumjäger bei Dunkelheit so weit ab, dass sie sich nicht mehr von der Aktivitätswahrscheinlichkeit im beleuchteten Zustand des Radwegs unterschieden hat. Im Gegensatz dazu blieb die Aktivitätswahrscheinlichkeit der Waldspezialisten bei Dunkelheit auch in den frühen Morgenstunden noch relativ hoch.

Die Strukturrandjäger unter den Fledermäusen zeigten ein etwas anderes Antwortverhalten. Hier war unabhängig von der Nachtzeit die Aktivitätswahrscheinlichkeit bei Dunkelheit höher als bei Beleuchtung. Allerdings waren die Konfidenzintervalle der Kurve für „Dunkelheit“ am Anfang (~ 20 - 1 Uhr) und am Ende (~ 5 - 6 Uhr) der Nacht im Vergleich zur Kurve für „Beleuchtung“ (Abb. 5E) relativ groß. Dies lässt vermuten, dass die Aktivität der Strukturrandjäger während diesen Zeiten bei Dunkelheit relativ gering war, was zu den breiteren Konfidenzintervallen führte.

Die Jagdaktivität wurde anhand charakteristischer Echoortungsrufe quantifiziert. Die Jagdaktivität folgte weitestgehend den Mustern der Flugaktivitäten der jeweiligen Gilde (Abb. 6A-C). Die Jagdintensität, welche das Verhältnis zwischen Jagd- und Flugaktivität darstellt, blieb bei allen Gilden relativ konstant über die Nacht hinweg (Abb. 6D-F). Die Modelle ergaben keinen Effekt der Beleuchtung oder anderer Faktoren auf die Jagdintensität.

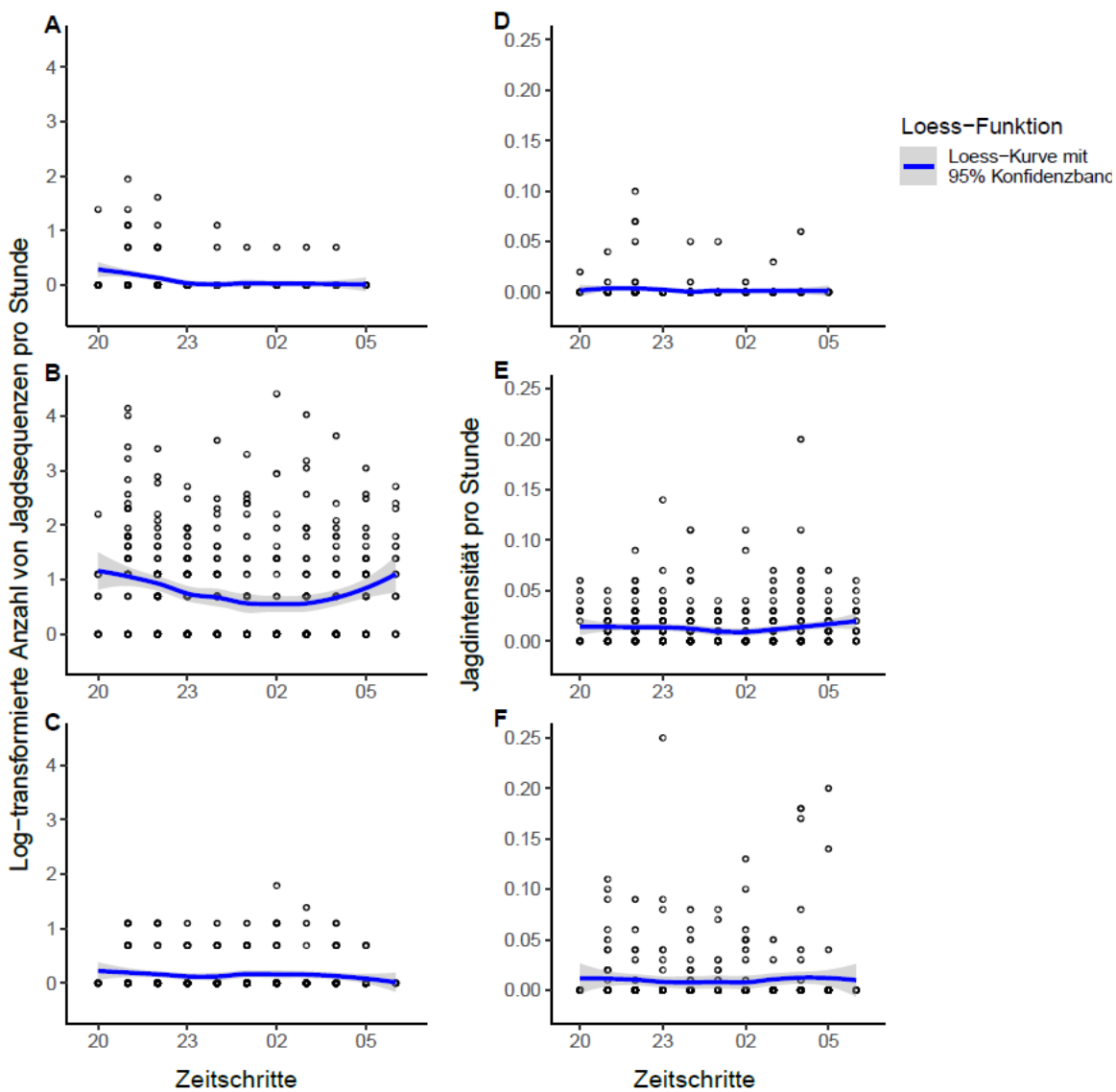


Abb 6: Log-transformierte Anzahl von Jagdsequenzen (A bis C) und Jagdintensität als Verhältnis zwischen Jagd- und Flugaktivität pro Stunde (schwarze Punkte; D bis F) über die Stunden der Nacht für Offenraumjäger (A und D; $n = 288$), Strukturrandjäger (B und E; $n = 494$) und Waldspezialisten (C und F; $n = 366$). Die blaue Linie stellt die Loess Funktion (als $y \sim x$) dar, welche an die Daten angepasst wurde, während das graue Band das 95% Konfidenzintervall darstellt. Datenpunkte erscheinen geklumpt aufgrund der stündlichen Datenaggregation, die Jagdaktivität trat jedoch kontinuierlich auf.

Zusammenfassung AP1: Die häufige Nutzung des Radwegs durch Radfahrende führte abends und morgens zu einer fast kontinuierlichen Beleuchtung. Dennoch waren Fledermäuse zu diesen Zeiten toleranter gegenüber einer Beleuchtung als später in der Nacht. Die Reaktion der Fledermäuse auf die Beleuchtung variierte zwischen den ökologischen Gilden: Offenraumjäger mieden die Beleuchtung, obwohl sie als lichttolerant gelten. Strukturrandjäger waren bei Dunkelheit am Radweg aktiver als bei Beleuchtung. Waldspezialisten reagierten weniger abweisend auf die Beleuchtung als erwartet. Die bewegungsgesteuerte LED-Beleuchtung von Radwegen löst bei Fledermäusen eine gildenspezifische Vermeidungsreaktion aus, die durch eine Verkürzung der Beleuchtungsintervalle weiter reduziert werden könnte.

AP 2: 3D Bewegungen

Zur Erfassung der Bewegungspfade von Fledermäusen in der Nähe von bewegungsgesteuerten Laternen wurde ein Wärmebildkamera-Tracking-System bestehend aus zwei Wärmebildkameras (FLIR Tau 2 LWIR Thermal Imaging Camera Core), die mit einem ThermalCapture-Modul (TeAx Technology TC 2.0) ausgestattet und mit Bildschirmen (Renkforce T-701B) verbunden waren, genutzt. Im Juli (04.07.-06.07.) und Oktober (18.10.-20.10.) 2022 wurden die beiden Kameras mit unterschiedlichen Blickwinkeln in einem Abstand von 6-9 m auf die jeweils zu untersuchende Laterne ausgerichtet. Die Aufnahmen erfolgten hauptsächlich in der ersten Nachthälfte. Die synchronisierten Wärmebildkameras erfassten vorbeifliegende Fledermäuse als warme Punkte vor einem kälteren Hintergrund. Aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmewinkel des betrachteten Raums ermöglichte das Videomaterial die Bestimmung von x-, y- und z-Werten (3D-Position). Aus nachfolgenden Bildern ließ sich somit der dreidimensionale Bewegungspfad der Fledermäuse rekonstruieren. Dabei werden unter anderem die relative Position der Kameras zueinander sowie deren technische Charakteristika berücksichtigt. Zur Kalibration des erfassten Luftraums wurde ein bekanntes Distanzmaß (Kalibrierungsstab; Länge 50 cm mit je einer LED-Lampe an jedem Ende) durch den Luftraum bewegt. Zusätzlich zu den Kameras brachten wir einen Ultraschalldetektor (BATLOGGER A+; Elekon AG, Luzern, Schweiz) auf einer Höhe von etwa 2,5 m am Laternenpfahl an, um die aufgenommenen Arten akustisch zu identifizieren. Die Ultraschallaufnahmen wurden am Beginn der Nacht durch ein zeitgleiches akustisches und visuelles Signal manuell mit den Wärmebildkameras synchronisiert.

Bei den ersten Aufnahmen im Juli stellten wir fest, dass die Hintergrundvegetation wegen der sommerlichen Hitze zu viel Wärme abstrahlte und deshalb zu wenig Kontrast zu den eher kleinen Wärmepunkten der Fledermäuse bot. Auch ein Wechsel zum ausgewählten Laternenstandort „Feld“ führte zu keinen besseren Resultaten. Die Wärmebilderfassung wurde deshalb im Oktober wiederholt. Die im Oktober entstandenen Wärmebildaufnahmen wurden manuell ausgewertet und in einer Vorauswahl auf solche reduziert, in denen Fledermäuse auf beiden Kameras gleichzeitig zu sehen waren. Die Analyse dieser Aufnahmen beruhte auf der von Hedrick (2008) entwickelten Methoden. Zur Prozessierung der Dateien, zur Kalibrierung des aufgenommenen Luftraums, sowie zur Bestimmung der x-, y- und z-Koordinaten der Fledermauspositionen wurden die Programme Thermoviewer 3.0.7 (TeAx Technology), easyWand, DLTdv5 und Matlab (Version R2022b, The MathWorks Inc., 2022) genutzt. Die Darstellung erfolgte mittels der Software R (R Core Team, 2022) und im Speziellen den beiden Paketen plot3D (Version 1.4, Soetaert, 2021) und plot3Drgl (Version 1.0.4, Soetaert, 2023).

Insgesamt kommen wir in der ersten Erfassungsnacht Flugpfade von neun Fledermäusen und in der zweiten Nacht Flugpfade von drei Fledermäusen dokumentieren (Abb. 7). Alle zwölf Flugpfade wurden ausschließlich im Dunkeln aufgenommen. Aufgrund der Richtcharakteristik der Echoortungsrufe und der Anwesenheit weiterer Fledermäuse im Erfassungsraum des Ultraschalldetektors war es uns nicht möglich, die 3D Bewegungspfade spezifischen Fledermausarten zuzuordnen. Die lokal häufigste Fledermausart war jedoch die Zwergfledermaus (*Pipistrellus pipistrellus*), so dass wir davon ausgehen, dass die meisten 3D Bewegungspfade von dieser Fledermausart stammen.

Zusammenfassung AP2: Insgesamt konnten 12 Bewegungspfade von Fledermäusen erfasst werden. Interessanterweise hielten sich die Fledermäuse nur in der Nähe der Laternen auf, wenn diese dunkel waren. Die Raumdaten wurden dem AP3 zur Verfügung gestellt.

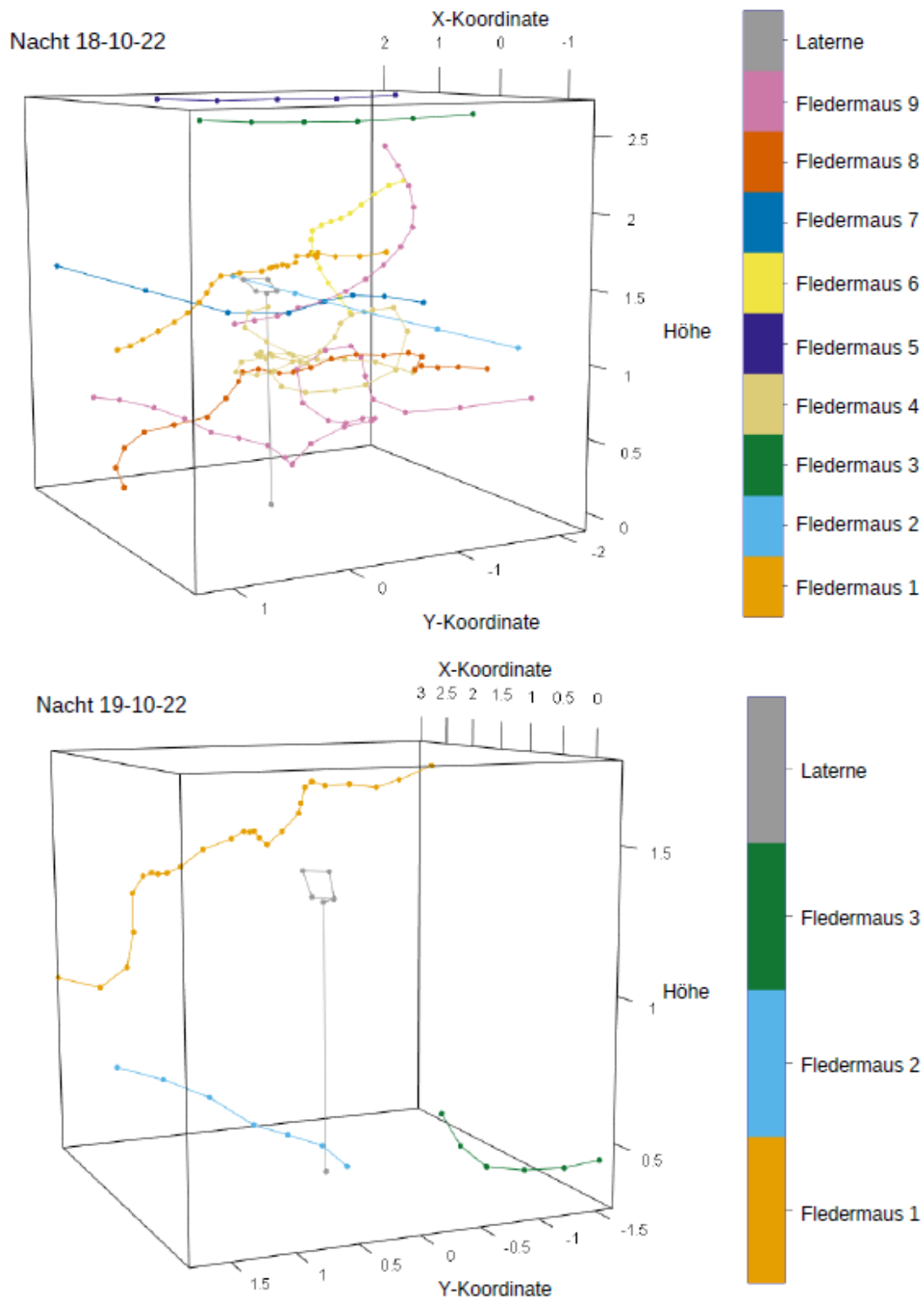


Abb. 7: 3D-Bewegungspfade von Fledermäusen für die Nacht vom 18.10.22 (oben) und vom 19.10.22 (unten). Jede Farbe steht für eine andere Fledermaus. Es wird nur die Oberseite der Lampe gezeigt. Hinweis: Die 0-Koordinate der Höhenachse wurde auf der Grundlage des Kalibrierungsprozesses definiert, sie entspricht nicht der Bodenhöhe.

AP 3: Radiometrische Erfassung der Lichtexposition der Fledermäuse

Zur Quantifizierung der Lichtexposition von Fledermäusen wurde mithilfe von kalibrierten Kameras einerseits die Lichtumgebung der Untersuchungsstandorte beschrieben und andererseits Leuchtdichtekarten für die Bewegungspfade der Fledermäuse erstellt. Hierzu wurden mit einer Canon 6D Kamera und einem 50-mm Objektiv photometrische Messungen vom Boden aus durchgeführt sowie Messungen aus der Fledermausperspektive mit einer Kamera-ausgestatteten DJI Mini 2 SE Drohne. Beide Kamera-Linsen-Kombinationen wurden über Image Engineering kalibriert.

Mit der IQ-Luminance Software konnte die Kamera-Linsen-Kombinationen als Leuchtdichtemessgerät verwendet werden. Die Software berechnete Leuchtdichtewerte aus den Bilddaten, die von der entsprechend kalibrierten Kamera aufgenommen wurden. Sie ordnet die Roh-RGB-Daten der Kamera entsprechenden Leuchtdichtewerten zu. Diese Methode bot viele Vorteile gegenüber herkömmlichen Leuchtdichtemessungen, die in der Regel nur Einzelpunktmessungen mit einem engen Sichtfeld durchführen können. Mit der IQ-Luminance Software wurde die Lichtumgebung quantifiziert und die Lichtexposition der Fledermäuse erfasst.

Mit der open source Software OpenSCAD wurde eine virtuelle Lichtlandschaft erzeugt, die es erlaubte, mit Hilfe von TracePro die Lichtexposition an beliebigen Raumpositionen der Landschaft vorherzusagen. TracePro ist eine Software, die es unter anderem ermöglicht, CAD Landschaften mit Hilfe von Monte-Carlo-Raytracing zu analysieren. Um die Vorhersagekraft der Simulation zu erhöhen, wurde das Modell mit den Messungen vom 11.01.2023 parametrisiert. Mit den aus den Messungen erstellten Lichtkarten konnten die Lichtexposition von Oberflächen der virtuellen 3D CAD-Welt (z. B. Beleuchtungsinfrastruktur, Radweg, Vegetation) sowie Reflexionsvermögen und Lichtstreuung bewertet werden.

Abbildungen 8a und b verdeutlichen, dass trotz der sehr guten Abschirmung der Lampe, die Straßenbeleuchtungsanlage in der Nähe des Lichtpunkts (der Stelle, an der die Leuchte montiert ist, ca. 5 Meter über dem Boden) vergleichsweise viel Licht emittierte. Diese hohen Lichtwerte ergaben sich aus den Lichtreflexionen des Bewegungssensors sowie des oberen Mastbereichs. Dieses Streulicht könnte Fledermäuse potenziell stören. Der Sensor zur bedarfsgerechten Steuerung der Straßenbeleuchtung, der im oberen Bereich des Mastes montiert ist, war dabei ungefähr doppelt so hell wie der Mast, an dem er montiert wurde.

Aus den Bewegungspfaden der Fledermäuse konnten die potenziellen Lichtexpositionen (lux) der Fledermäuse berechnet werden (Tab. 3). Da Fledermäusen nur im Dunkelzustand der Lampen erfasst wurden, lässt sich davon ausgehen, dass diese Lichtexpositionswerte ein Meidungsverhalten der Fledermäuse auslöst (Abb. 8). Die weitere Analyse konzentrierte sich auf den ersten erfassten Raumpunkt der Flugpfade. Die vorläufigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass schon geringe Beleuchtungsstärken ($> 0,06 \text{ lx}$) zur Vermeidung des analysierten Luftraums geführt haben könnten.

Um die Hypothese einer verbesserten Nutzbarkeit des Luftraums durch Fledermäuse durch den Einsatz intelligenter Beleuchtungskonzepte eingehender zu überprüfen, wäre es für zukünftige Studien hilfreich, einzelne Flugwege in einem größeren Luftraum zu erfassen. Auf diese Weise könnte der Frage nachgegangen werden, in welcher Entfernung von der Lichtquelle der Raum noch von Fledermäusen genutzt würde. Darüber hinaus wäre es interessant, verschiedene Dimmszenarien (z. B. Dauer der Beleuchtungsphase, Dimmstufen) zu testen. Dies würde einen genaueren Einblick in das räumlich-zeitliche Verhalten von Fledermäusen in Bezug auf

künstliches Licht ermöglichen und noch besser einschätzen helfen, wie effektiv ein adaptives Beleuchtungsmanagement für den Schutz von Fledermäusen ist. Grundsätzlich empfiehlt es sich, den Reflexionsgrad der Oberflächen der Beleuchtungsstrukturen so weit wie möglich zu reduzieren.

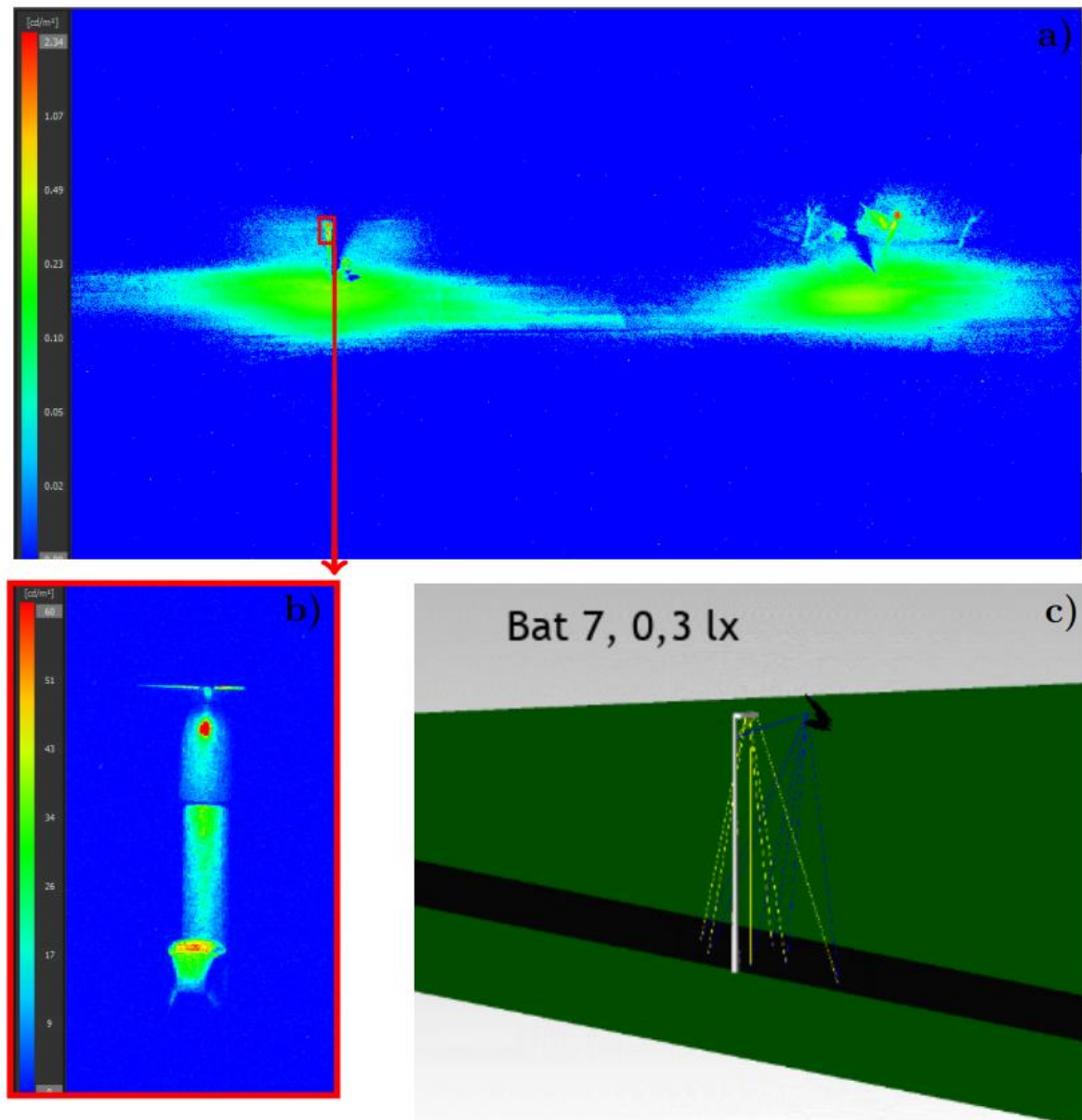


Abb. 8: Beispielhafte Leuchtdichtekarten (cd/m²), die mit der Software IQ-Luminance aus Drohnenmessungen vom 11.01.2023 erstellt wurden. Die Messung für die Leuchtdichtekarte in 8a wurde aus einer Höhe von ca. 30 m und einem Abstand von 25 m zum Radweg vorgenommen. Die in 8b gezeigte Messung wurde aus einer Höhe von 5 m durchgeführt und verdeutlicht die Reflexionen durch Mast und Bewegungssensor. 8c zeigt die Lichtexposition für die Fledermäuse 7 (lx, s.a. Tab.3), berechnet auf Basis des ersten aufgezeichneten Punktes ihrer Flugbahn (Abb. 7), wobei gelbe Linien direktes Licht illustrieren und blaue Linien reflektiertes Licht. In diesem Fall würde die Fledermaus 7 nur reflektiertes Licht ausgesetzt sein.

Tabelle 3 Die Tabelle fasst die Lichtexpositions-Werte für den ersten Wegpunkt der Flugpfade aus Abbildung 8 zusammen. Es werden ausschließlich Werte aufgeführt, bei denen die Tiere einer Lichtexposition von weniger als 200 lx ausgesetzt waren. Dies entspricht einer Beleuchtungsstärke, die für Wohnräume typisch und somit weit entfernt von den natürlichen Lichtbedingungen nachtaktiver Tiere ist.

Fledermaus Nr.	Beleuchtungsstärke (lx) bei Eintritt in analysierten Luftraum
1	3,9
3	0,54
5	0,06
7	0,3
8	118,7
9	4,2
10	3,0
11	4,4

Zusammenfassung AP3: Mit Hilfe der photometrischen Messungen wurde dreidimensionale Lichtkarten der Landschaft erstellt, um die Lichtexposition der Tiere bewerten zu können. Die Simulationsmodelle ergaben, dass die Lichtreflexionen des Bewegungssensors sowie des oberen Mastbereichs erhebliches Streulicht generieren. Die Verschneidung der Lichtinformation mit den Bewegungspfaden ergab, dass Fledermäuse bereits Streulicht mit einer Intensität von 0.06 lx meiden. Somit ergeben sich für eine nachhaltige adaptive Beleuchtung der Bedarf Streulicht zu meiden. Dies kann einerseits durch eine verbesserte Abschirmung des Lichts erfolgen, so dass nur die Zielfläche beleuchtet wird. Andererseits kann Streulicht vermieden werden, in dem die Reflexionseigenschaften des Lichtmasts sowie der daran befestigten Sensorik optimiert wird.

AP 4: Abschlussveranstaltung und -bericht

Die Abschlussveranstaltung fand online am Vormittag des 14. März 2023 statt. Im Vorfeld der Veranstaltung meldeten sich 577 Personen an, wobei ein Großteil von 494 Personen auch tatsächlich an der Veranstaltung teilnahm.

Nach einer Begrüßung durch PD Dr. Christian Voigt (IZW) als Projektverantwortlicher sowie durch Dr. Norbert Foeldi (Referat DP 24, Bundesministerium für Digitales und Verkehr) wurde das FLEBEFA Projekt und deren Ergebnisse vorgestellt. Im Anschluss stellten Dr. Markus Dietz (Institut für Tierökologie und Naturbildung) und Dr. Bolliger (Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft, Schweiz) ebenfalls Ergebnisse ähnlicher Studien vor. Es gab rege Nachfragen von Seiten des Publikums, die im Rahmen der Veranstaltung sowie schriftlich im Nachgang beantwortet wurden.

Zusammenfassung AP4: Eine vielbesuchte digitale Abschlussveranstaltung unterstrich das rege Interesse von Behördenvertreter:innen und Gutachter:innen hinsichtlich der ökologischen Verträglichkeit einer adaptiven Beleuchtung von Fahrradwegen. Auf dieser Abschlussveranstaltung konnten wir die Forschungsergebnisse sowohl gezielt den Interessensgruppen als auch der breiten Öffentlichkeit präsentieren. Eine begleitende Pressemitteilung kommunizierte die Ergebnisse an die Medien.

2.2. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt im Rahmen des Verwendungsnachweises. Dieser wird voraussichtlich bei Ende Juli 2023 vom Sachmittelbearbeiter Herrn Steffen Zech über die easy Plattform eingereicht.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die beantragten Mittel sind notwendig, weil die Tätigkeiten nicht aus den Haushalten der Institute und Universitäten finanziert werden können.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen

Die Ergebnisse unserer Studie ermöglichen eine vorläufige Bewertung hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit einer adaptiven Beleuchtung von Fahrradwegen. Basierend auf unseren Daten lässt sich die adaptive Beleuchtung in ihrer schonenden Wirkung auf nachtaktive Tiere optimieren. Dies könnte vornehmlich durch eine Reduktion der Lichtintervalllänge von 40 s auf zum Beispiel 20 s erreichen. Darüber hinaus sollte eine geringere Reflexionseigenschaft der Lichtmasten und der Bewegungssensoren angestrebt werden, um Streulicht zu vermeiden. Über eine Optimierung der adaptiven Beleuchtung ließe sich die negative Wirkung von künstlichem Licht bei Nacht auf geschützte Fledermäuse weiter reduzieren. Dadurch könnte zudem Energie gespart werden. Eine ökologisch nachhaltige adaptive Beleuchtung von Fahrradwegen könnte die Beleuchtung von Fahrradwegen auch außerhalb des Siedlungsbereichs akzeptabel machen. Zudem könnte die adaptive Beleuchtung auch im Straßenverkehr und in Siedlungsflächen Anwendung finden und somit erheblich zu einer Reduktion der Lichtverschmutzung beitragen.

2.5. Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden teilweise bei einem wissenschaftlichen Journal mit Qualitätssicherung zur Publikation eingereicht. Alle Rohdaten der Untersuchungen sind auf der Mobilthek unter folgender Adresse abgelegt:
<https://mobilthek.info/offers/585530902400872448>

3. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Chronologische Abfolge der Arbeitspakete (AP)2

Abb. 2: Übersicht zur Lage der untersuchten Teststrecke und Verteilung der Standorte sowie eingesetzte Geräte am Laternenmast.....4

Abb. 3: Exemplarische Darstellung der vom Lichtsensor gemessenen relativen Lichtintensität (lux) in der Nacht vom 4. auf den 5. September 2022 am Standort „Wald“. Datenpunkte, welche mit dem Beleuchtungsstatus „an“ (orange) und „aus“ (blau) assoziiert sind, wurden in weiteren Analysen einbezogen. Datenpunkte, welche im Bereich der Dämmerung lagen oder mittlere relative Lichtintensitäten darstellten (grau) blieben in den Analysen unberücksichtigt. Die eingeschobene kleinere Abbildung illustriert die 40 s dauernde Aktivierung der LED.....5

Abb. 4: Prozentuale Beleuchtungsdauer pro Stunde über alle Standorte und Nächte hinweg für die Zeiträume Reproduktion und Migration. Zur Berechnung der prozentualen Beleuchtungsdauer wurden die Sekunden mit Beleuchtung den Sekunden ohne Beleuchtung innerhalb einer Stunde gegenübergestellt.....6

Abb. 5: Akustische Aktivität pro Stunde (A bis C; log-transformierte Anzahl Sekunden mit

Aktivität, $n_{\text{Offenraumjäger}} = 205$, $n_{\text{Strukturrandjäger}} = 247$, $n_{\text{Waldspezialisten}} = 229$) und Aktivitätswahrscheinlichkeit (**D** bis **F**; für jede Gilde: $n = 489$) in Abhängigkeit zur Beleuchtung (an/aus) für die lokalen funktionalen Gilden der Offenraumjäger (**A** & **D**), Strukturrandjäger (**B** & **E**), und Waldspezialisten (**C** & **F**). Akustische Aktivität in **A** bis **C** erscheint geklumpt aufgrund der stündlichen Datenaggregation, war jedoch kontinuierlich. Für eine standortunabhängige Darstellung der Aktivitätswahrscheinlichkeiten (**D** bis **F**) wurden Modelle ohne den Faktor „Standort“ herangezogen.....7

Abb. 6: Log-transformierte Anzahl von Jagdsequenzen (**A** bis **C**) und Jagdintensität als Verhältnis zwischen Jagd- und Flugaktivität pro Stunde (schwarze Punkte; **D** bis **F**) über die Stunden der Nacht für Offenraumjäger (**A** und **D**; $n = 288$), Strukturrandjäger (**B** und **E**; $n = 494$) und Waldspezialisten (**C** und **F**; $n = 366$). Die blaue Linie stellt die Loess Funktion (als $y \sim x$) dar, welche an die Daten angepasst wurde, während das graue Band das 95% Konfidenzintervall darstellt. Datenpunkte erscheinen geklumpt aufgrund der stündlichen Datenaggregation, die Jagdaktivität trat jedoch kontinuierlich auf.....9

Abb. 7: 3D-Bewegungspfade von Fledermäusen für die Nacht vom 18.10.22 (oben) und vom 19.10.22 (unten). Jede Farbe steht für eine andere Fledermaus. Es wird nur die Oberseite der Lampe gezeigt. Hinweis: Die 0-Koordinate der Höhenachse wurde auf der Grundlage des Kalibrierungsprozesses definiert, sie entspricht nicht der Bodenhöhe.....11

Abb. 8: Beispielhafte Leuchtdichtekarten (cd/m^2), die mit der Software IQ-Luminance aus Drohnenmessungen vom 11.01.2023 erstellt wurden. Die Messung für die Leuchtdichtekarte in 8a wurde aus einer Höhe von ca. 30 m und einem Abstand von 25 m zum Radweg vorgenommen. Die in 8b gezeigte Messung wurde aus einer Höhe von 5 m durchgeführt und verdeutlicht die Reflexionen durch Mast und Bewegungssensor. 8c zeigt die Lichtexposition für die Fledermäuse 7 (lux , s.a. Tab.3), berechnet auf Basis des ersten aufgezeichneten Punktes ihrer Flugbahn (Abb. 7), wobei gelbe Linien direktes Licht illustrieren und blaue Linien reflektiertes Licht. In diesem Fall würde die Fledermaus 7 nur reflektiertes Licht ausgesetzt sein.....12

4. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Metadaten der Aufnahmenächte einschließlich nächtlicher Temperaturen (gemessen vom Lichtsensor), Sonnenaufgangs- und Sonnenuntergangszeiten und Tage relativ zum Neumond.....4

Tab. 2: Testergebnisse der LRT-tests mit Signifikanzwerten zwischen vollen Modellen und den entsprechenden Null-Modellen oder Modellen ohne spezifische Faktoren und Interaktionen. Signifikante Effekte sind mit fett gedruckter Schrift hervorgehoben.....8

Tab. 3: Die Tabelle fasst die Lichtexpositions-Werte für den ersten Wegpunkt der Flugtrajektorien aus Abbildung 8 zusammen. Es werden ausschließlich Werte aufgeführt, bei denen die Tiere einer Lichtexposition von weniger als 200 lx ausgesetzt waren. Dies entspricht einer Beleuchtungsstärke typisch für Wohnräume und liegt somit weit entfernt von den natürlichen Lichtbedingungen, unter denen nachtaktive Tiere normalerweise agieren.....14

5. Literaturverzeichnis

- Azam, C., Kerbiriou, C., Vernet, A., Julien, J. F., Bas, Y., Plichard, L., ... & Le Viol, I. (2015). Is part-night lighting an effective measure to limit the impacts of artificial lighting on bats?. *Global Change Biology*, 21(12), 4333-4341.
- Hedrick, T. L. (2008). Software techniques for two- and three-dimensional kinematic measurements of biological and biomimetic systems. *Bioinspiration & Biomimetics*, 3(3), 034001. doi:10.1088/1748-3182/3/3/034001
- MathWorks Inc. (2022). MATLAB version: R2022b. Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks Inc. Retrieved from <https://www.mathworks.com>
- R Core Team. (2022). R: A language and environment for statistical computing. (Version 4.2.2). Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <https://www.R-project.org/>
- Rowse, E. G., Lewanzik, D., Stone, E. L., Harris, S., & Jones, G. (2016). Dark matters: the effects of artificial lighting on bats. In *Bats in the Anthropocene: Conservation of bats in a changing world* (pp. 187-213). Springer, Cham.
- Soetaert, K. (2021). plot3D: Plotting Multi-Dimensional Data.
- Soetaert, K. (2023). plot3Drgl: Plotting Multi-Dimensional Data - Using 'rgl'.
- Spoelstra, K., van Grunsven, R. H., Donners, M., Gienapp, P., Huigens, M. E., Slaterus, R., ... & Veenendaal, E. (2015). Experimental illumination of natural habitat—an experimental set-up to assess the direct and indirect ecological consequences of artificial light of different spectral composition. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1667), 20140129.
- Spoelstra, K., van Grunsven, R. H., Ramakers, J. J., Ferguson, K. B., Raap, T., Donners, M., ... & Visser, M. E. (2017). Response of bats to light with different spectra: light-shy and agile bat presence is affected by white and green, but not red light. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1855), 20170075.
- Stone, E. L., Harris, S., & Jones, G. (2015). Impacts of artificial lighting on bats: a review of challenges and solutions. *Mammalian Biology*, 80(3), 213-219.
- Voigt, C.C., C. Azam, J. Dekker, J. Ferguson, M. Fritze, S. Gazaryan, F. Hölker, G. Jones, N. Leader, D. Lewanzik, H.J.G.A. Limpens, F. Mathews, J. Rydell, H. Schofield, K. Spoelstra, M. Zagamajster (2019): : Leitfaden für die Berücksichtigung von Fledermäusen bei Beleuchtungsprojekten. EUROBATS Publication Series No.8 (deutsche Ausgabe). UNEP/EUROBATS Secretariat, Bonn, 68 Seiten
- Voigt, C. C., Dekker, J., Fritze, M., Gazaryan, S., Hölker, F., Jones, G., ... & Zagamajster, M. (2021). The impact of light pollution on bats varies according to foraging guild and habitat context. *BioScience*, 71(10), 1103-1109.