

Abschlussbericht

Erfassung und Bewertung des akustischen Antwortverhaltens von Fledermäusen auf ein variables bedarfsgerechtes Beleuchtungsmanagement in zwei Zonen (Zone 1 = Siedlungsnah, Zone 2 = siedlungsfern) entlang des regionalen Fahrradwegs am Dortmund-Ems Kanal (Stadt Münster, Nordrhein Westfalen)

Dr. Christine Reusch und Prof. Dr. Christian C. Voigt

Leibniz-Institut für Zoo- und Wildtierforschung, Alfred-Kowalke-Str. 17, 10315 Berlin

Zusammenfassung

Wir untersuchten den Einfluss bewegungsgesteuerter (adaptiver) Beleuchtung auf Fledermäuse an einem Radweg nahe Münster. Beim siedlungsnahen Standort (Zone 1; Osttor) wurde der Effekt des Beleuchtungsintervalls (20s vs. 40s) und beim siedlungsfernen Standort (Zone 2; Rieselfelder) der Effekt von bernsteinfarbenem Licht auf die Aktivität der Fledermäuse untersucht. Die Reaktion der Fledermäuse wurde über ein akustisches Monitoring erfasst, wobei die Analyse zwischen drei funktionellen Gilden, den Offenraumjägern (Gattungen *Nyctalus*, *Eptesicus* und *Vespertilio*), den Randstrukturjägern (Gattung *Pipistrellus*) sowie den Engraumjägern (Gattungen *Myotis* und *Plecotus*) differenzierte. Mopsfledermäuse (*Barbastella barbastellus*) konnten an keinem der Standorte in den Untersuchungs Nächten akustisch nachgewiesen werden. Am Standort Osttor (Zone 1) konnten wir keinen Effekt verschiedener Beleuchtungsintervalle (20s und 40s) auf die Fledermausaktivität nachweisen. Beide Beleuchtungsweisen führten zu einer tendenziell geringeren Fledermausaktivität, die jedoch basierend auf unserer Stichprobe statistisch nicht signifikant war. Eine frühere Untersuchung am selben Standort mit größerer Stichprobe zeigte eine signifikante Meidung der adaptiven Beleuchtung (40s Beleuchtungsintervall) durch Randstrukturjäger und Engraumjäger. Dies lässt darauf schließen, dass der in Zone 1 praktizierte Abschaltzeitraum plausibel ist. Wir empfehlen auf eine wirksame seitliche Abblendung und eine Fokussierung des Lichtstrahls auf den Radweg zu achten. Des Weiteren sollte die Reflektionswirkung der Laternenmasten weiter reduziert werden. Am siedlungsfernen Standort (Zone 2; Rieselfelder) konnten wir keinen Effekt der bernsteinfarbenen Beleuchtung auf die Gilde der Offenraumjäger und nur einen geringen Effekt der bernsteinfarbenen Beleuchtung auf die Randstrukturjäger feststellen. Für die Engraumjäger (Gattungen *Myotis* und *Plectous*) konnten wir eine geringere Fledermausaktivität bei eingeschalteter Beleuchtung in den Abendstunden nachweisen. Die geringe Frequentierung des Radwegs durch Radfahrer am Standort Rieselfelder könnte den negativen Einfluss der Beleuchtung auf die Engraumjäger eingrenzen. Bei einer stärkeren Frequentierung des Radwegs durch Radfahrer würde sich vermutlich das Meidungsverhalten der engraumjagenden Fledermäuse verstärken. In der Summe erscheint daher eine vollständige Abschaltung der adaptiven Beleuchtung in der Zone 2 ratsam. Für beide Zonen empfehlen wir Maßnahmen zur weiteren Reduzierung der Lichtverschmutzung durch Lichtquellen jenseits des Radwegs.

Einleitung

Weltweit nimmt künstliches Licht in der Nacht jährlich um 7-10 % zu (Kyba et al., 2023). Hält dieser Trend an, werden in Zukunft immer mehr Organismen und Ökosysteme von Lichtverschmutzung betroffen sein (Bennie et al., 2015; Falchi et al., 2016). Lichtsensible Tiere können dadurch Lebensräume verlieren oder unter der Fragmentierung ihrer Lebensräume leiden (Hölker et al., 2010; Korpach et al., 2022). Fledermäuse sind unmittelbar von Lichtverschmutzung betroffen, da sie sich im Laufe der Evolution in einer nächtlichen Nische entwickelt haben (Speakman, 2001). Dies macht sie gegenüber künstlichem Licht besonders anfällig (Rowse et al., 2016; Stone et al., 2015). Alle Fledermäuse sind in der Lage, Licht bei niedrigen Intensitäten wahrzunehmen (Childs & Buchler, 1981). Die spezifische Reaktion von Fledermäusen auf künstliches Licht variiert jedoch in Abhängigkeit davon, welcher funktionellen Gruppe eine Fledermausart angehört (Voigt et al., 2021). In den gemäßigten Breiten meiden Fledermäuse, die in dichter Vegetation nach Insekten jagen (z.B. Arten der Gattung *Myotis*), künstliches Licht unter fast allen Umständen (Voigt et al., 2021). Relativ schnell fliegende Fledermäuse, die ihre Nahrung an Randstrukturen wie Waldrändern (Gattung *Pipistrellus*) oder im offenen Luftraum (z.B. Gattung *Nyctalus*) suchen, jagen gelegentlich Insekten an Straßenlaternen (Rydell, 1992). Obwohl die beiden letztgenannten Gruppen oftmals als lichttolerant beschrieben werden, meiden auch diese Arten künstliche Lichtquellen mit hoher Beleuchtungsstärke oder wenn sich die Lichtquellen in der Nähe ihrer Quartiere befinden (Hale et al., 2015; Mariton et al., 2023; Voigt et al., 2020).

In Europa wurden Handlungsempfehlungen zur Berücksichtigung des Fledermausschutzes bei Beleuchtungsvorhaben entwickelt, die auf der Hierarchie ‚Vermeiden-Mindern-Kompensieren‘ basieren (Arlidge et al., 2018; Voigt et al., 2018). Eine allgemeine Empfehlung lautet, künstliche Lichtquellen nur dann einzusetzen, wenn es für die menschliche Sicherheit unbedingt erforderlich ist. Ein vielversprechender Ansatz, um die negativen Auswirkungen von künstlichen Lichtquellen auf Fledermäuse zu reduzieren, ist das Abschalten der Straßenbeleuchtung in einem mehrstündigen Zeitraum in der Mitte der Nacht. Die akustische Erfassung von Fledermäusen an Straßen, die nur am Anfang und am Ende der Nacht beleuchtet wurden, zeigen, dass Fledermäuse artspezifisch auf diese Beleuchtungsregelung reagieren. Die meisten lichtempfindlichen Fledermausarten mieden weiterhin die beleuchteten Bereiche in den Abend- und Morgenstunden (Azam et al., 2015; Day et al., 2015). Aktuelle technische Entwicklungen wie die Verwendung einer Beleuchtung, die bewegungsgesteuert durch Spaziergänger oder fahrende Autos und Radfahrer ausgelöst wird (nachfolgend adaptive Beleuchtung genannt), könnten das Ausmaß der Lichtverschmutzung weiter reduzieren (Gagliardi et al., 2020). Kürzlich konnte gezeigt werden, dass eine adaptive Beleuchtung im Vergleich zu Dauerbeleuchtung zwar weniger Insekten anlockt, aber die Fledermausaktivität nur geringfügig beeinflusst (Bolliger et al., 2020). Um den Fledermausschutz zu verbessern, ist es daher notwendig, die adaptive Beleuchtung an das Antwortverhalten der Fledermäuse anzupassen. Hierzu sind detaillierte Untersuchungen nötig.

Die Stadt Münster hat entlang eines Radweges am Dortmund-Ems-Kanal eine bedarfsgerechte Beleuchtung eingeführt. In einer früheren Pilotstudie wurde untersucht, wie sich die bedarfsgerechte Beleuchtung auf die Aktivität der lokalen Fledermäuse auswirkt. Die Ergebnisse dieser Pilotstudie zeigten eine gildenspezifische Meidungsreaktion der Fledermäuse auf die adaptive Beleuchtung mit Licht Emittierenden Dioden (LED; Heim et al., 2024). Fledermausarten der Gattung *Pipistrellus* mieden die adaptive LED-Beleuchtung, wobei die Reaktion in den frühen und späten Nachtstunden weniger ausgeprägt war als in der Mitte der Nacht (Heim et al., 2024). Fledermausarten, die im offenen Luftraum (Gattung *Nyctalus*) oder ab in dichter Vegetation nach Nahrung suchen (Gattung *Myotis*), mieden die adaptive Beleuchtung besonders spät in der Nacht (Heim et al., 2024). Die AutorInnen der

Pilotstudie wiesen darauf hin, dass kürzere Beleuchtungszeiten oder eine wärmere Lichtfarbe den negativen Effekt der Beleuchtung auf Fledermäuse abmildern könnten (Heim et al., 2024).

Im vorliegenden Folgeprojekt wurde im Auftrag der Stadt Münster am selben regionalen Fahrradweg untersucht, ob kürzere Beleuchtungsintervalle der bewegungsgesteuerten LED-Beleuchtung dazu beitragen können, die negativen Auswirkungen von künstlichen Lichtquellen auf Fledermäuse zu reduzieren. Die Fledermausaktivität wurde über ein passives akustisches Monitoring quantifiziert. Wir erwarteten, dass bei einer kürzeren Beleuchtungsdauer eine geringere Meidungsreaktion auftritt. Zusätzlich untersuchten wir in einem weiteren Abschnitt des Radweges, der ein ökologisch sensibles Gebiet tangiert, den Einfluss der Lichtfarbe einer adaptiven Beleuchtung auf die Fledermausaktivität. Aufgrund der Lichtfarbe und des geringeren Streuwerts des verwendeten bernsteinfarbenen Lichts erwarteten wir eine geringe Meidungsreaktion der Fledermäuse.

Methodik

Studiengebiet

Die Untersuchungen fanden in zwei Abschnitten entlang eines Fahrradweges in der Nähe der Stadt Münster (Nordrhein-Westfalen) statt (Kanalpromenade: Zone 1, Osttor; Zone 2 Rieselfelder; Abb. 1). Die Kanalpromenade besteht aus einer vier Meter breiten Asphaltstraße, die entlang des Dortmund-Ems-Kanals verläuft. Der Bereich zwischen dem Weg und dem Kanal ist mit Wiesen, Sträuchern und/oder Bäumen bewachsen. Die Zone 1 (im Folgenden Osttor genannt) liegt siedlungsnah und schließt an Wohn- und Industriegebiete an. Die Zone 2 (im Folgenden Rieselfelder genannt) liegt siedlungsfern und verläuft entlang der Rieselfelder, einem Vogelschutzgebiet. Innerhalb der gewählten Abschnitte lagen ähnliche Habitattypen vor, so dass der Einfluss des Habitats auf die Ergebnisse minimiert wurde.

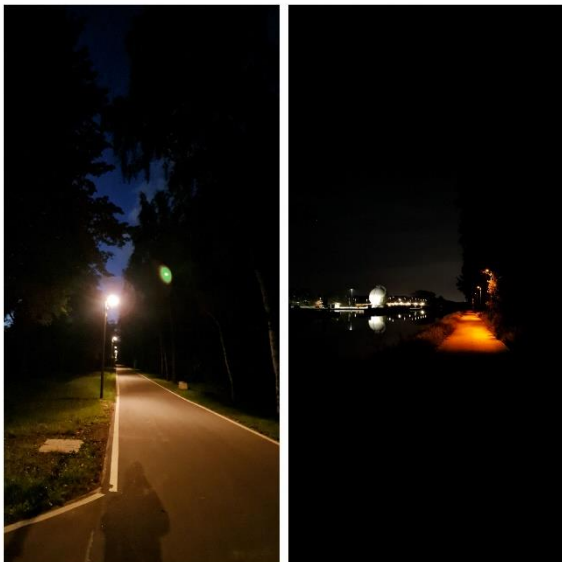


Abbildung 1 Foto der Beleuchtung des Radweges in Zone 1 am Osttor (warm-weiß, 2700K; links) und Zone 2 an den Rieselfeldern (Bernstein 20s; rechts)

Studiendesign

Zur Erfassung und Bewertung des akustischen Antwortverhaltens von Fledermäusen auf eine bedarfsgerechte variable Lichtsteuerung in den beiden Abschnitten entlang des regionalen Radweges wurde ein passives akustisches Monitoring sowie zeitgleich eine Lichtmessung durchgeführt. Die

Datenerfassung erfolgte von Juli bis Anfang Oktober 2024 in zwei direkt aufeinanderfolgenden Nächten pro Monat, sofern dies wetterbedingt möglich war (Juli - 06. und 07.07.; August - 02. und 04.08.; Mitte September - 18. und 19.09.; Ende September - 28. und 29.09. (nur Rieselfelder); Anfang Oktober - 03. und 04.10.). Die akustischen Aufnahmen wurden um den Neumondzeitraum durchgeführt, um den möglichen Einfluss des Mondlichts auf die Fledermausaktivität minimal zu halten. Lediglich im September war dies aufgrund einer längeren Regenperiode nicht möglich. Um vergleichbare Bedingungen zu schaffen und den Einsatz der Technik zu optimieren, wurde darauf geachtet, dass in beiden Nächten ähnliche Wetterbedingungen herrschten und es nicht regnete. In der ersten Nacht waren die Straßenlaternen an allen Standorten ausgeschaltet (dunkel) und in der darauf folgenden Nacht wurden sie entsprechend der unterschiedlichen Beleuchtungsmodi eingeschaltet, um einen Vorher-Nachher-Vergleich durchführen zu können. In der Zeit von 23:00 bis 05:00 Uhr war die Radwegbeleuchtung immer ausgeschaltet.

Nahe den Rieselfeldern (Zone 2; Abb. A1, nachfolgend Rieselfelder genannt) wurden in der zweiten Untersuchungsnacht zwei unterschiedliche Beleuchtungsmodi (inkl. Dunkelkontrolle) untersucht. Die Beleuchtungsmodi basierten auf einer Streulichtminimierung sowie einem gleitenden Auf- und Abstieg des Beleuchtungsintervalls. Die zu prüfenden Beleuchtungsmodi wurden wie folgt definiert:

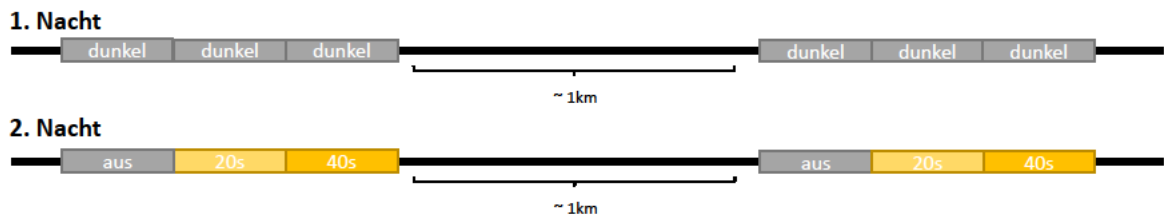
- 1) kurze Beleuchtungsdauer: 20 s, Lichtfarbe bernstein (1800 K)
- 2) Kontrolle (aus)

Am Osttor (Zone 1; Abb. A2, nachfolgend Osttor genannt) wurden in der zweiten Versuchsnacht jeweils drei unterschiedliche Beleuchtungsmodi (inkl. Dunkelkontrolle) untersucht. Alle Beleuchtungsmodi basieren auf warmweißen LED (2700 K) und einem sanften Auf- und Abschwelen des Beleuchtungsintervalls. Die zu prüfenden Beleuchtungsmodi wurden wie folgt definiert:

- 3) Lange Beleuchtungsdauer: 40 s
- 4) Kurze Beleuchtungsdauer: 20 s
- 5) Kontrolle (aus)

In beiden Abschnitten wurden jeweils 2 Replikate der 3 bzw. 2 Beleuchtungsarten auf Teilstrecken von je 100 m Länge untersucht. An den Rieselfeldern bestand die gesamte zu untersuchende Strecke aus zwei je 200 m langen Replikaten mit den Beleuchtungsweisen 1) und 2) auf je 100 m Länge je Teilabschnitt (Bild 2). Am Osttor bestand die Strecke aus zwei Replikaten von je 300 m Länge mit den Beleuchtungsmodi 3), 4) und 5) mit je 100 m Länge pro Teilabschnitt (Abbildung 2). Der Abstand zwischen den beiden Replikaten betrug knapp 1 km. Jeder Teilabschnitt umfasste fünf Laternen (nachfolgend Straßenleuchten genannt), wobei die Messungen jeweils an der mittleren Straßenleuchte durchgeführt wurden. Die Beleuchtungsmodi der Teilabschnitte wurden zwischen den Untersuchungszeiträumen (Juli, August, Mitte September und Ende September oder Oktober) abgewechselt (Tab. A1 und A2), um den Einfluss von Standortfaktoren und Beleuchtungsmodus zu trennen. Die Habitattypen wurden möglichst konstant gewählt und es wurde auf die Entfernung zu potentiellen Leitstrukturen (z.B. Brücken) geachtet. Pro Nacht wurden an zehn Straßenlaternen (sechs am Osttor und vier in den Rieselfeldern) ein akustisches Monitoring und gleichzeitig Lichtmessungen durchgeführt.

Abschnitt 5 (Osttor, siedlungsnah)



Abschnitt 1 (Rieselfelder, siedlungsforn):

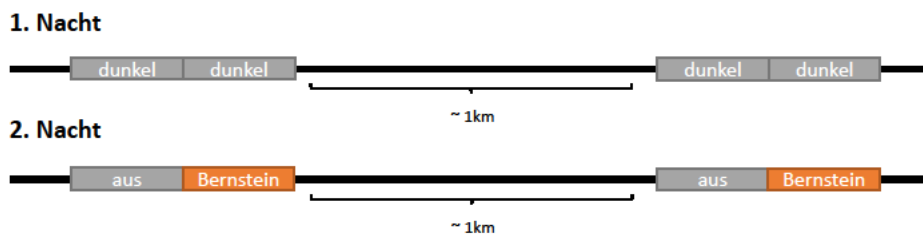


Abbildung 2 Schematische Darstellung des Versuchsdesigns für die zwei Abschnitte 1 (Zone 2) und 5 (Zone 1) des regionalen Radweges entlang des Dortmund-Ems-Kanals. Die Teststrecken mit den verschiedenen Beleuchtungsweisen (20s – warmweißes Licht (2700 K) für 20s bei Auslösung durch Bewegung auf dem Radweg (hellgelb); 40s – warmweißes Licht (2700 K) für 40s bei Auslösung durch Bewegung auf dem Radweg (dunkelgelb); Bernstein – bernsteinfarbenes Licht (1800 K) für 20s bei Auslösung durch Bewegung auf dem Radweg (orange); aus und dunkel – ausgeschaltet während der gesamten Nacht (grau)). Alle Laternen waren im Zeitraum von 23:00 bis 05:00 Uhr ausgeschaltet.

Echoortungsrufaufnahmen, Artidentifikation und Messung von Fledermausaktivität

Das passive akustische Monitoring wurde mit Batloggern A+ (Elekon AG, Luzern, Schweiz) durchgeführt, die in 3,5 m Höhe am jeweiligen Straßenlaternenpfahl befestigt wurden, wobei die omnidirektionalen Mikrofone ungefähr 25 cm über dem Batlogger-Gehäuse angebracht und dem Dortmund-Ems-Kanal zugewandt war. Während aller Aufzeichnungsächte wurde an jedem Standort zusätzlich die Umgebungstemperatur mit einem Logger (siehe unten) aufgezeichnet.

Eine erste automatische Analyse der Fledermausrufe erfolgte mit der Software BatExplorer (Version 2.2.6.0, Elekon AG, Luzern, Schweiz) anhand der Echoortungsrufe, nachdem die Artenbibliothek „Europäische Fledermäuse DE“ des BatExplorers an die lokale Fledermausfauna angepasst wurde (Tabelle A3). Anschließend wurden alle aufgenommenen Dateien manuell überprüft und die Rufe endgültig zugeordnet. Soweit möglich wurden die Rufe bis auf Artniveau bestimmt. Rufe, die aufgrund ähnlicher Rufcharakteristika nicht einer Art zugeordnet werden konnten, wurden der nächstmöglichen Ebene, z. B. der Gattung, zugeordnet. Aufgrund der sehr ähnlichen Echoortungsrufe von Arten der Gattungen *Nyctalus*, *Eptesicus* und *Vespertilio* wurden alle Aufnahmen dieser Arten der Gruppe „NEV“ zugeordnet. Dateien mit weniger als drei aufgezeichneten Rufen wurden im Detail betrachtet und dann entschieden, ob sie zugeordnet werden konnten. Die identifizierten Rufe wurden dann den entsprechenden Funktionsgruppen zugeordnet: Im Offenraum jagende Fledermäuse (OSF; Engl. ‚Open-Space Forager‘), an Randstrukturen jagende Fledermäuse (ESF; Engl. ‚Edge-Space Forager‘) und in engen Räumen jagende Fledermäuse (NSF; Narrow-Space Forager‘) (Tab. A3). *Myotis*-Rufe wurden im Gesamten der NSF Gruppe zugeordnet, obschon Teichfledermaus (*Myotis dasycneme*) und Wasserfledermaus (*Myotis daubentoni*) einer anderen Gilde angehören.

Lichtmessungen

An jedem Aufnahmeort befestigten wir wenige Zentimeter über dem Batlogger einen Lichtsensor-Logger (HOBO-Lichtsensor; 1 Lux Genauigkeit; Datenlogger-Store, Eichstetten, Deutschland) an einem Straßenlaternenpfahl (im Folgenden Standort genannt). In einer Untersuchungsnacht zeichneten wir mit diesem Lichtsensor-Logger von Sonnenuntergang bis -aufgang die relative Beleuchtungsstärke auf. Die von den Lichtsensoren erfasste Beleuchtungsstärke erfasst sowohl das natürliche als auch das künstliche Licht. Die Lichtintensität [lux] wurde jede Sekunde durch die Lichtsensoren erfasst. Hierüber ließ sich für jede Aufnahmenacht und für jeden Standort ein Lichtprofil erstellen (siehe beispielhaft Abb. A3).

Statistische Analysen

Für jede Sekunde einer Untersuchungsnacht wurde dokumentiert, ob ein Mitglied der jeweiligen Fledermausgilde am jeweiligen Standort aktiv war oder nicht. Diese Aktivitätsdaten wurden dann mit den Lichtsensordaten kombiniert, so dass jeder Sekunde, in der eine Fledermaus aktiv war oder nicht, auch ein Wert für die Lichtintensität zugeordnet werden konnte. Alle Zeitpunkte, an denen die Beleuchtung eindeutig auf voller Leistung oder ausgeschaltet war ($n = 2.083.043$), wurden beibehalten, wobei die volle Leistung erreicht war, sobald die Beleuchtung für mehrere Sekunden ($\sim 20s$ oder $40s$) ein Plateau erreichte. Zeitpunkte, die entweder mit Dämmerung oder mit einem Übergangszustand zwischen voller Leistung und ausgeschalteter Beleuchtung verbunden waren, wurden nicht in die Analysen einbezogen ($n = 367.357$ (15%)). Somit wurde nur der Zeitraum von Dämmerungsbeginn bis 23:00 Uhr und von 5:00 Uhr bis Dämmerungsende betrachtet ($n=780.631$; siehe Tabelle A5), um den Einfluss des Lichts auf die Fledermausaktivität zu beurteilen.

Für die statistische Auswertung wurde das Programm R (R Core Team, 2022, Version 4.2.2) verwendet. Zuerst wurde die Anzahl der Sekunden mit gildenspezifischer Flugaktivität pro 30-Minuten-Intervall gezählt und mit Hilfe von ggplot2 (Version 3.4.0; Wickham, 2016) dargestellt. Zweitens analysierten wir die Effekte von Lichtstatus, Beleuchtungsmodus, Standort, Nachtzeitintervallen (30-Minuten-Intervalle) und verschiedenen Interaktionen auf die gildenspezifische An- und Abwesenheitsaktivität mit linearen Mixed-Effects-Modellen, die mit dem Programmpaket spaMM (Version 4.1.0; Roussel & Ferdy, 2014) erstellt und getestet wurden. Diese Analysen wurden nach der Aggregation der Daten zu einer halbstündlichen An-/Abwesenheit für jede gegebene Nacht, jeden Standort, jede Beleuchtungsart und jeden Beleuchtungszustand (an oder aus) durchgeführt und berücksichtigten den Effekt der zeitlichen Autokorrelation. Die Formel des vollständigen Modells lautete wie folgt und wurde für jede Gilde und jeden Abschnitt (Osttor und Rieselfelder) separat erstellt:

Anwesenheit/Abwesenheit \sim Licht + Beleuchtungsweise + Standort + Interaktion Licht-Standort + Interaktion Beleuchtungsweise-Standort + 3-fach-Polynom des Zeitintervalls + Interaktion 3-fach-Polynom des Zeitintervalls – Licht + Interaktion 3-fach-Polynom des Zeitintervalls – Standort + Interaktion 3-fach-Polynom des Zeitintervalls – Beleuchtungsweise + Interaktion Licht-Beleuchtungsweise + (1|Nacht) + (1|Saison) + AR1(1|Zeitintervall %in% Standort-Zeitabschnitt)

Ergebnisse

Licht- und Temperaturdaten

Der prozentuale Anteil der Sekunden mit eingeschaltetem Licht variierte zwischen den Aufnahmezeiträumen und den Standorten (Abb. 3 und 4). Das mit den Lichtsensoren erfasste Beleuchtungsprofile war für die Standorte innerhalb einer Aufnahmeperiode ähnlich. Zu Beginn der Dämmerung und gegen Ende der Dämmerung wurden die Straßenlampen durch die Bewegung von Radfahrern oder Fußgängern am häufigsten eingeschaltet. Am Osttor wurde Mitte September und im August ein relativ hoher Anteil eines 30-Minuten-Intervalls mit eingeschaltetem Licht (bis zu 96%) beobachtet (Abb. 3). Dagegen lag der Anteil eines 30-Minuten-Intervalls mit eingeschaltetem Licht nahe den Rieselfeldern meist unter 20%, mit Ausnahme des Standorts der Straßenleuchte 165, die insbesondere Ende September vergleichsweise häufig ausgelöst wurde (Abb. 4). Im Juli umfasste der Überschneidungszeitraum von Dämmerungsbeginn bis 23 Uhr in beiden Abschnitten nur ein halbstündiges Intervall, von 5 Uhr morgens bis Dämmerungsende gab es keine Überschneidungen (Tabelle A5, Abb. 3 und 4).

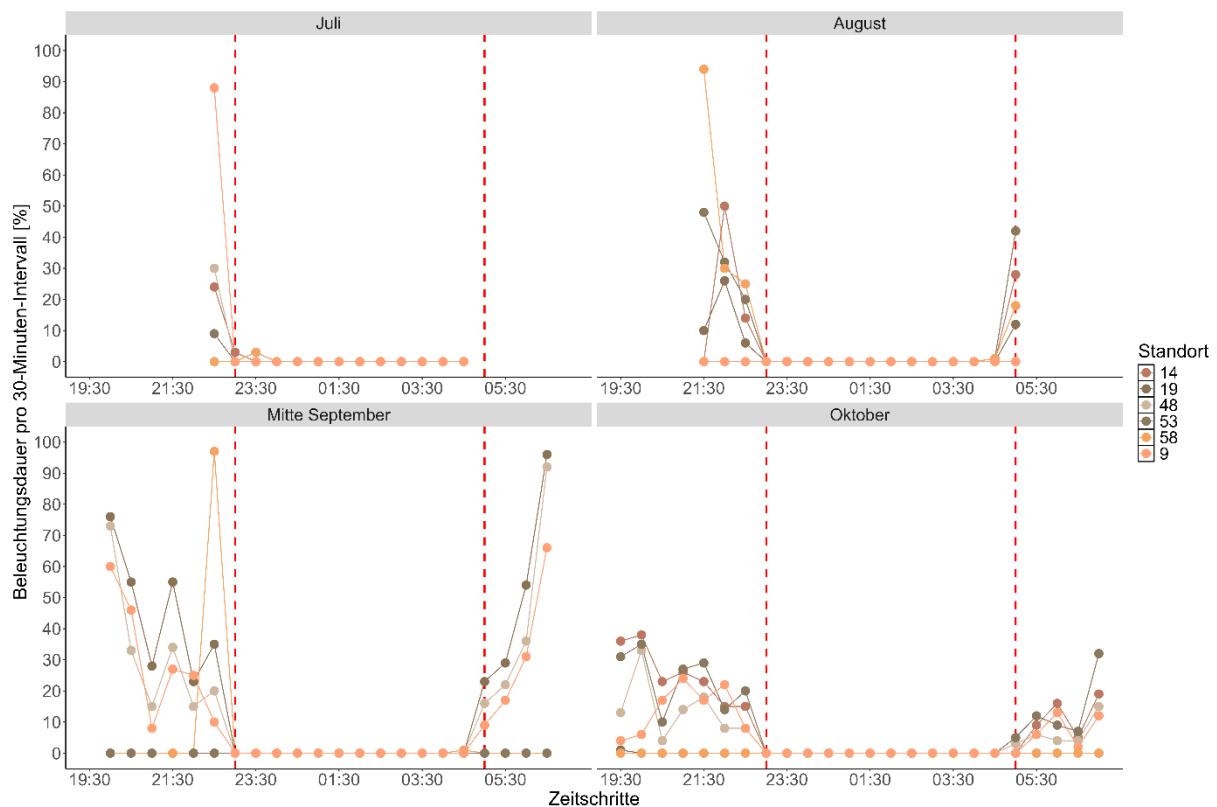


Abbildung 3 Darstellung der Beleuchtungsdauer für die einzelnen Standorte (Laternenmasten) am Standort Osttor in der jeweils zweiten Aufnahmenacht, in der die Laternengruppen entsprechend der Lichtschemata (aus, 20s und 40 s) geschaltet waren. Jeder Standort ist farblich unterschiedlich gekennzeichnet (siehe Legende). Auf der x-Achse sind die Zeitschritte in Stunden der Nacht angegeben, um einen Eindruck der Nachtlänge erkennen zu lassen. Die Beleuchtungsdauer wurde für den Zeitraum von Dämmerungsbeginn bis -ende bestimmt. Von 23 Uhr abends bis 05 Uhr morgens waren die Laternen an allen Standorten abgeschaltet und daher liegt die Beleuchtungsdauer dort konstant bei null Prozent. Jede Grafik stellt einen Aufnahmezeitraum dar (Juli – 07. Juli, August – 04. August, Mitte September – 19. September, Oktober – 04. Oktober).

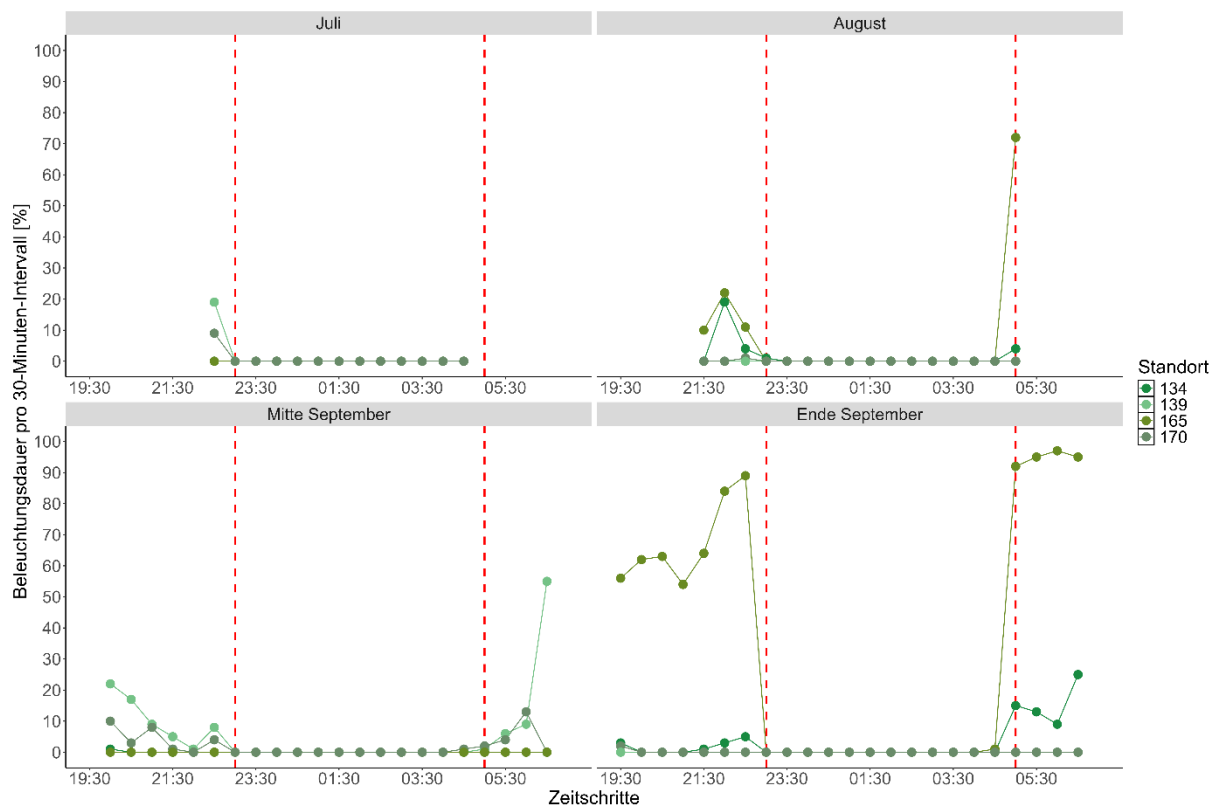


Abbildung 4 Darstellung der Beleuchtungsdauer für die einzelnen Standorte (Laternenmasten) am Standort Rieselfelder in der jeweils zweiten Aufnahmenacht, in der die Laternengruppen entsprechend der Lichtschemata (aus, 20s) geschaltet waren. Jeder Standort ist farblich unterschiedlich gekennzeichnet (siehe Legende). Auf der x-Achse sind die Zeitschritte in Stunden der Nacht angegeben, um einen Eindruck der Nachtlänge erkennen zu lassen. Die Beleuchtungsdauer wurde für den Zeitraum von Dämmerungsbeginn bis -ende bestimmt. Von 23 Uhr abends bis 05 Uhr morgens waren die Laternen an allen Standorten abgeschaltet und daher liegt die Beleuchtungsdauer dort konstant bei null Prozent. Jede Grafik stellt einen Aufnahmezeitraum im Jahr 2024 dar (Juli – 07. Juli, August – 04. August, Mitte September – 19. September, Ende September – 29. September).

Gildenspezifische Aktivität der Fledermäuse

Insgesamt wurden im Zeitraum Juli bis Anfang Oktober unter Berücksichtigung der Abschaltzeiten 30.413 Fledermausrufe erfasst ($n_{\text{Osttor}}=18.601$; $n_{\text{Rieselfelder}}=11.812$). Die Zuordnung der Rufe zu den funktionalen Gilden der Fledermäuse zeigte in den beiden Abschnitten unterschiedliche Verteilungsmuster. Am Osttor wurde ein Großteil der Rufe den Randstrukturjägern (~80%; insbesondere *Pipistrellus pipistrellus* (~70%)) zugeordnet. Am Standort Rieselfelder wurde hingegen ein ausgeglicheneres Muster beobachtet (Tab. 1). Ein ähnliches Muster zeigte sich bei der Zuordnung zur niedrigstmöglichen taxonomischen Ebene (Art-, Gattungs- oder Rufgruppenebene). Dieses Muster war über alle Aufnahmeperioden zwischen den beiden Abschnitten konstant. Es lassen sich jedoch visuell leichte Unterschiede in den Anteilen der funktionalen Gilden innerhalb der Abschnitte erkennen, wenn man die Aufnahmeperioden vergleicht (Abb. 5). Die Art *Barbastella barbastellus* konnte im betrachteten Zeitraum nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 1 Anzahl und prozentuale Verteilung der Rufaufzeichnungen auf die funktionalen Gilden sowie niedrigsten identifizierbaren Niveaus an den Standorten Osttor und Rieselfelder der Kanalpromenade über den gesamten Zeitraum von Juli bis Anfang Oktober 2024.

	Zone 1 – Osttor		Zone 2 - Rieselfelder	
	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent
Gesamt	18.601	100	11.812	100
Offenraumjäger (OSF = ‚Open Space Forager‘)	1.432	7,7	4.029	34,1
NEV	1.396	7,5	2.322	19,7
<i>Nyctalus noctula</i>	36	0,2	1.707	14,5
Randstrukturjäger (ESF = ‚Edge-Space Forager‘)	14.796	79,5	5.986	50,7
<i>Pipistrellus spec</i>	1.534	8,2	853	7,2
<i>Pipistrellus pipistrellus</i>	12.959	69,7	4.778	40,5
<i>Pipistrellus nathusii</i>	297	1,6	349	3,0
<i>Pipistrellus pygmaeus</i>	6	0,0	6	0,1
Engraumjäger (NSF = ‚Narrow Space Forager‘)	2.373	12,8	1.797	15,2
<i>Myotis spec</i>	1.865	10,0	1.431	12,1
<i>Myotis dasycneme</i>	492	2,6	352	3,0
<i>Plecotus spec</i>	16	0,1	14	0,1

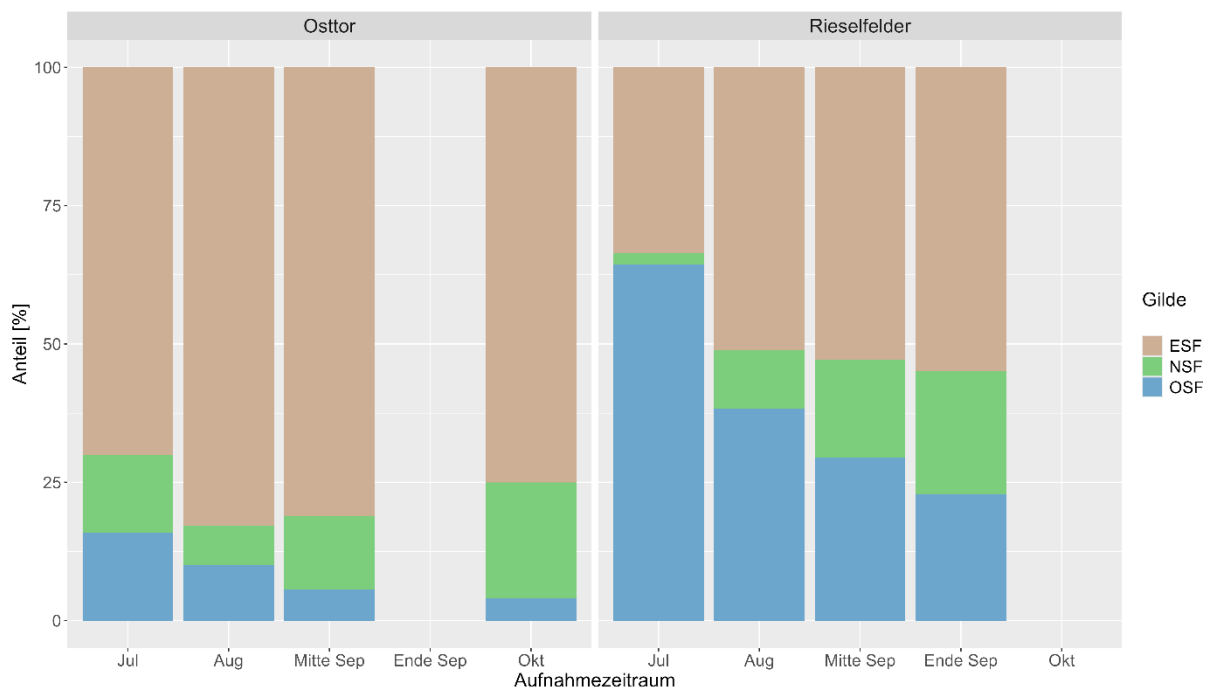


Abbildung 5 Vergleich des prozentualen Anteils der funktionalen Gilden (ESF = Randstrukturjäger (Engl. „Edge-Space Forager“), NSF = Engraumjäger (Engl. „Narrow-Space Forager“), OSF = Offenraumjäger (Engl. „Open-Space Forager“) an den gesamten Rufaufnahmen zwischen den jeweiligen Aufnahmezeiträumen (Jul – 06. und 07. Juli ($n_{\text{Osttor}}=1617$; $n_{\text{Rieselfelder}}=1400$), Aug – 02. und 04. August ($n_{\text{Osttor}}=6179$; $n_{\text{Rieselfelder}}=3143$), Mitte Sep – 18. und 19. September ($n_{\text{Osttor}}=7046$; $n_{\text{Rieselfelder}}=3743$), Ende Sep – 28. und 29. September ($n_{\text{Rieselfelder}}=3183$), Okt – 03. und 04. Oktober ($n_{\text{Osttor}}=3492$)) im Jahr 2024. Die Anteile ergeben insgesamt jeweils 100% pro Zeitraum. Nebengeräusche und nicht zuordenbare Rufe wurden in dieser Darstellung nicht berücksichtigt. Ebenso wurde der Zeitraum von 23 Uhr bis 5 Uhr nicht berücksichtigt.

Auswirkung unterschiedlicher Beleuchtungsdauern auf die Fledermausaktivität

Am Osttor wurde an sechs Straßenlaternen die Auswirkung unterschiedlicher Beleuchtungsdauern getestet. Für die multivariaten Analysen konnten die zwei Aufnahmeächte im Juli (06. und 07.07.) nicht herangezogen werden, da zum einen in einer Nacht an zwei Standorten (Straßenlaternen) im Überschneidungszeitraum von Beleuchtung und Fledermausaktivität keine Fledermausrufe aufgenommen wurden und zum anderen der Überschneidungszeitraum zwischen eingeschalteter Beleuchtungsweise sowie potentieller Fledermausaktivität zu gering war, um Fledermausaktivität bei ein- und ausgeschaltetem Licht vergleichen zu können (Tabelle A5, Abb. A4). Die halbstündliche Echoortungsrufaktivität der funktionalen Gilden war am Osttor über den betrachteten Zeitraum der Nacht relativ ähnlich (Abb. A4). Die Aktivität der Offenraumjäger und der Randstrukturjäger nahm von etwa 21:30 bis 23:00 Uhr geringfügig zu (Abb. A4A und A4B).

Das Modell zum Testen des Effekts der Beleuchtungsdauer umfasste die Aufnahmeächte im August, Mitte September und Anfang Oktober (2 Nächte je Aufnahmezeitraum). Für jede Gilde wurde ein separates Modell berechnet. Es zeigten sich standortspezifische Unterschiede zwischen den Modellen in allen Gilden. Um den Einfluss von Beleuchtungsweise (aus, 20s, 40s, dunkel) und Lichtstatus (an/aus) unabhängig vom Standort bestimmen zu können, wurde zusätzlich ein Modell ohne Standort als Variable erstellt. Die Ergebnisse zeigen unabhängig von den Standorten keinen signifikanten Unterschied zwischen den Beleuchtungsweisen für die drei untersuchten funktionalen Gilden in dem betrachteten Zeitraum (Abb. 6). Es zeigte sich eine geringere Aktivität der Fledermäuse bei eingeschaltetem Licht. Dies war jedoch aufgrund der großen Konfidenzintervalle für die betrachteten Zeiträume der Nacht nicht signifikant (Abb. 6).

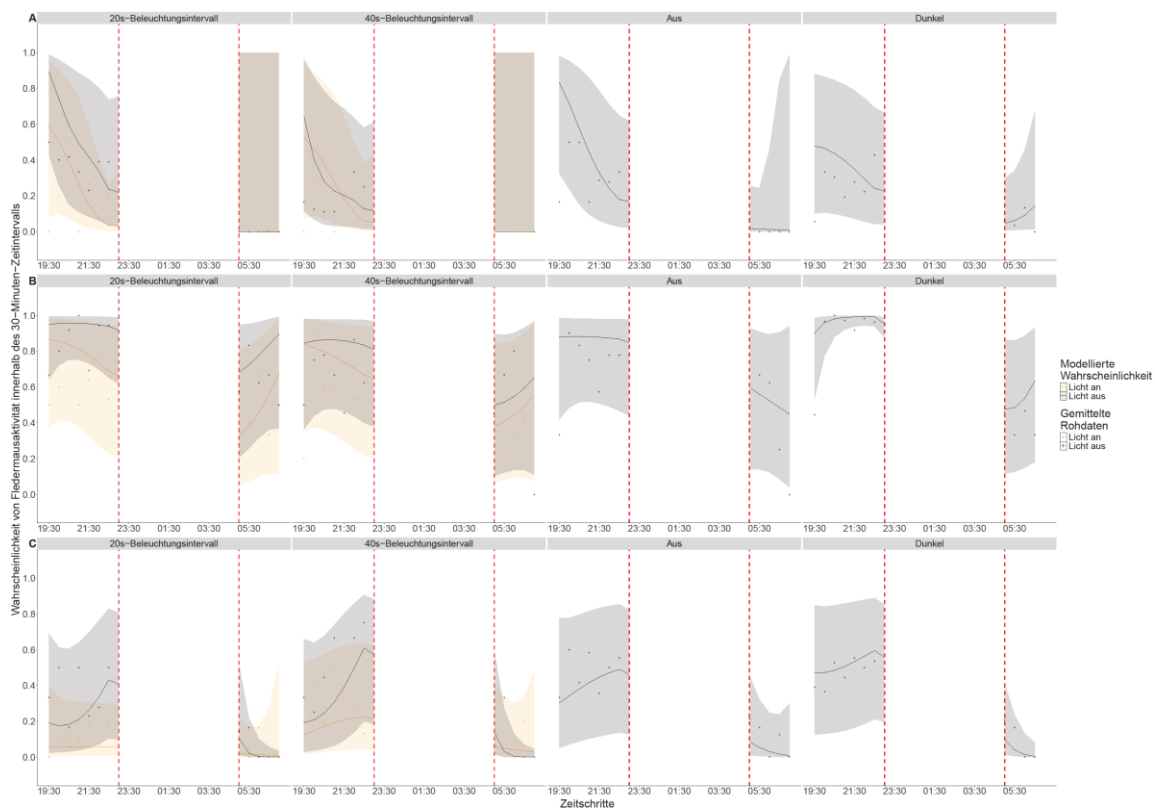


Abbildung 6 Darstellung des Einflusses von Beleuchtungsweise sowie ein- oder ausgeschaltetem Licht (gelb - „Licht an“; grau - „Licht aus“) auf die geschätzte halbstündliche Fledermausaktivität am Standort Osttor. Jede Reihe ist einer funktionalen Gilde zugeordnet: A) Offenraumjäger, B) Randstrukturjäger und C) Engrammjäger. Die Linien beschreiben die geschätzte Aktivität, während farblich hinterlegte Bänder das 95%-Konfidenzintervall angeben. Kreuze in der entsprechenden Farbe (siehe Legende) charakterisieren die gemittelten Rohdaten zur halbstündlichen Aktivität. Rote, gestrichelte Linien markieren den Beginn (23 Uhr) und das Ende (5 Uhr) des Abschaltzeitraums aller Laternen. Die Beleuchtungsweisen (20s-Beleuchtungsintervall, 40s-Beleuchtungsintervall, Aus; Dunkel) sind in einzelnen Plots dargestellt. Gemischte Modelle, die

ohne den Faktor „Standort“ angepasst wurden, wurden verwendet, um eine standortunabhängige Darstellung des interaktiven Effekts zwischen Licht und Nachtzeit zu erhalten.

Auswirkung bernsteinfarbener Beleuchtung auf die Fledermausaktivität

Die halbstündliche Echoortungsrufaktivität der Randstrukturjäger an den Rieselfeldern war über den betrachteten Zeitraum der Nacht relativ ähnlich (Abb. A5B). Die Offenraumjäger zeigten einen deutlichen Anstieg an aktiven Sekunden je 30-Minuten-Intervall von etwa 21:30 bis 23:00 Uhr und in einem geringeren Ausmaß galt das Muster auch für die in engen Räumen jagenden Fledermausarten (Abb. A5A und A5C).

Am Standort Rieselfelder wurde an vier Straßenlaternen die Auswirkung bernsteinfarbener Beleuchtung getestet. Die Beleuchtungsdauer bei Auslösung betrug 20 s. Für die multivariaten Analysen konnten erneut die zwei Aufnahmenächte im Juli (06. und 07.07.) nicht herangezogen werden (siehe Abschnitt 5 – Auswirkung von Beleuchtungsdauern; Tabelle A5, Abb. 4). Daher umfasste das Modell lediglich die Aufnahmenächte im August, September und Oktober (2 Nächte je Aufnahmezeitraum). Für jede funktionale Gilde wurde ein separates Modell berechnet. Die Validierung der Modelle zeigte insbesondere für Offenraumjäger ein Muster in den Residuen, was auf einen potentiellen unbekanntem Effekt hindeuten kann. Trotz dieses Faktors zeigten sich standortspezifische Unterschiede in den Modellen für alle Gilden. Um den Einfluss von Beleuchtungsweise (aus, bernstein (20s) sowie dunkel) und Lichtstatus (an/aus) unabhängig vom Standort bestimmen zu können, wurde zusätzlich ein Modell ohne Standort als Variable erstellt. Der Einfluss des Lichtstatus konnte nur für die Beleuchtungsweise mit dem bernsteinfarbenen Licht verglichen werden, da dieser bei den beiden Beleuchtungsweisen „aus“ und „dunkel“ nur „aus“ sein konnte. Es zeigte sich eine geringere Fledermausaktivität bei eingeschaltetem Licht, diese war jedoch aufgrund der großen Konfidenzintervalle im Falle von Offenraumjägern nicht signifikant für die betrachteten Zeiträume der Nacht (Abb. 7A). Fledermäuse, die in engen Räumen jagen, und Randstrukturjäger zeigten hingegen einen signifikanten Effekt des Lichtstatus (Abb. 7B-7C). Insbesondere Fledermäuse, die der Gilde der Engraumjäger (Gattung *Myotis*) zuzuordnen waren, zeigten eine deutlich geringere Aktivität bei eingeschaltetem Bernsteinlicht in den Abendstunden bis 23 Uhr (Abb. 7C).

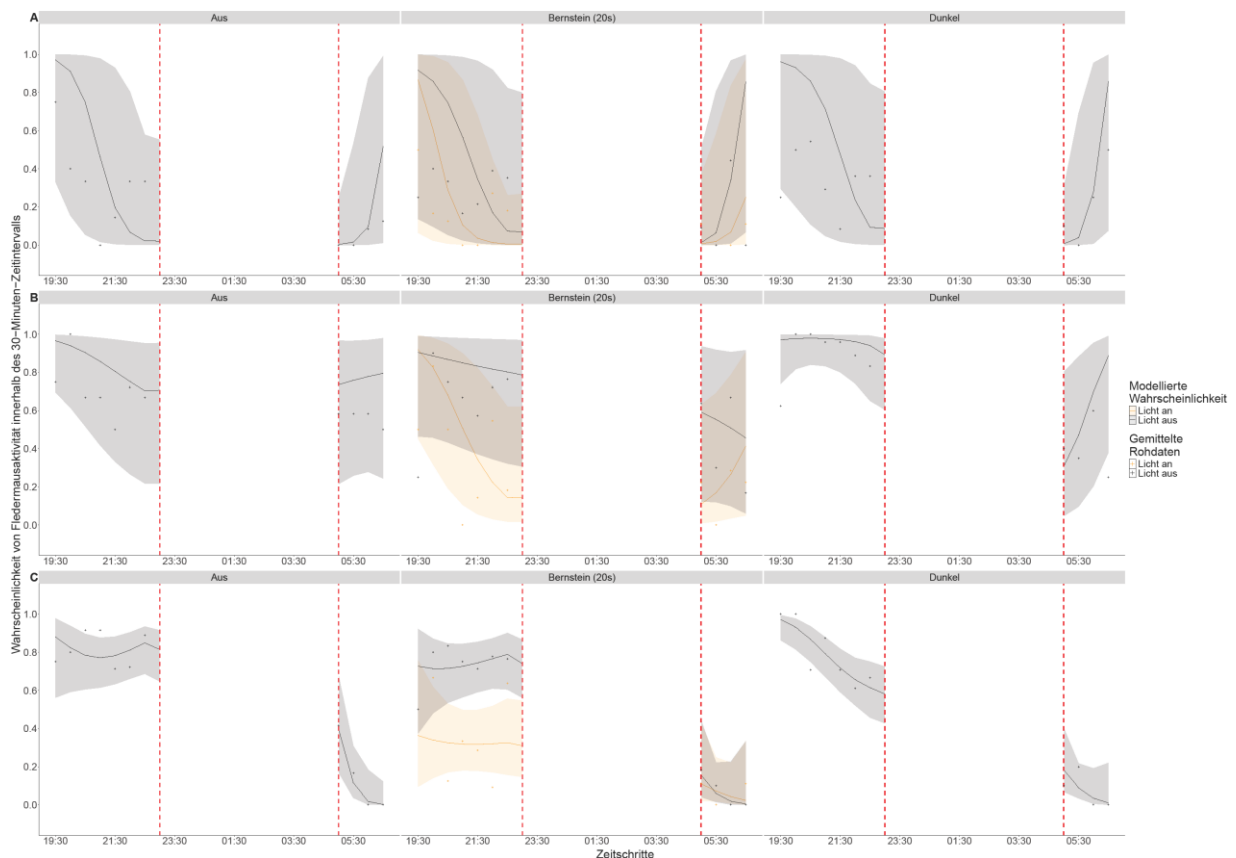


Abbildung 7 Darstellung des Einflusses von Beleuchtungsweise sowie ein- oder ausgeschaltetem Licht (gelb - „Licht an“; grau - „Licht aus“) auf die geschätzte halbstündliche Fledermausaktivität am Standort Rieselfelder. Jede Reihe ist einer funktionalen Gilde zugeordnet: A) Offenraumjäger, B) Randstrukturjäger und C) Engraumjäger. Die Linien beschreiben die geschätzte Aktivität, während farblich hinterlegte Bänder das 95%-Konfidenzintervall angeben. Kreuze in der entsprechenden Farbe (siehe Legende) charakterisieren die gemittelten Rohdaten zur halbstündlichen Aktivität. Rote, gestrichelte Linien markieren den Beginn (23 Uhr) und das Ende (5 Uhr) des Abschaltzeitraums aller Laternen. Die Beleuchtungsweisen (20s-Beleuchtungsintervall, Aus; Dunkel) sind in einzelnen Plots dargestellt. Gemischte Modelle, die ohne den Faktor „Standort“ angepasst wurden, wurden verwendet, um eine standortunabhängige Darstellung des interaktiven Effekts zwischen Beleuchtungsweise, Licht und Nachtzeit zu erhalten.

Diskussion

Wir untersuchten an einem regionalen Radweg mit adaptivem Beleuchtungskonzept, ob die Beleuchtungsdauer und das bernsteinfarbene Licht einen Einfluss auf die Fledermausaktivität haben. Am siedlungsnahen Standort Osttor konnten wir im Untersuchungszeitraum keinen signifikanten Effekt von Licht und Beleuchtungsdauer auf die Fledermausaktivität feststellen. Dies galt für alle drei Gilden und widerspricht der Ausgangshypothese einer geringeren Meidungsreaktion mit abnehmender Beleuchtungsdauer. Heim et al. (2024) stellten bei Offenraumjägern (Gattungen *Nyctalus*, *Eptesicus* und *Vespertilio*) und Engraumjägern (Gattungen *Myotis* und *Plecotus*) in den frühen Abend- und späten Morgenstunden keine oder nur eine geringe Meidungsreaktion fest (Heim et al., 2024), was dem in dieser Studie betrachteten Zeitraum bis 23 Uhr und ab 5 Uhr entspricht. Als mögliche Erklärung wurde eine hohe Bedeutung der Nahrungssuche und eine damit verbundene potenziell höhere Lichttoleranz während der Nahrungssuche angeführt (Heim et al., 2024). Andere Studien beobachteten eine relativ hohe Lichttoleranz von Zwergfledermäusen (*Pipistrellus pipistrellus*) während der Nahrungssuche (Hale et al., 2012; Lacoeuilhe et al., 2014; Laforge et al., 2019), aber nicht während der Transferflüge vom Quartier um Jagdlebensraum (Hale et al., 2015).

Am siedlungsfernen Standort (Rieselfelder) konnten wir für Engraumjäger (Gattungen *Myotis* und *Plecotus*) eine Meidung gegenüber bernsteinfarbenem Licht in den Abendstunden nachweisen. Randstrukturjäger, im Wesentlichen *Pipistrellus*-Arten, zeigten eine geringfügige Meidung gegenüber bernsteinfarbenem Licht kurz vor 23 Uhr, während hingegen Offenraumjäger keine signifikante Meidung zeigten. Jonker et al. (2022) fanden ebenfalls keinen klaren Effekt von Bernsteinlicht auf das Verhalten von Zwergfledermäusen (*Pipistrellus pipistrellus*). Die geringere Frequentierung des Radwegabschnittes an den Rieselfeldern durch Radfahrer könnte beitragen, den negativen Effekt der bernsteinfarbenen Beleuchtung auf Fledermäuse gering zu halten.

Unsere Erhebungen lieferten wichtige Hinweise darauf, inwieweit sich eine adaptive Beleuchtung auf die Aktivität der Fledermäuse auswirkt. Entgegen unseren Erwartungen konnten wir keinen Effekt der Beleuchtungsdauer auf die Fledermausaktivität feststellen. Wir können jedoch nicht ausschließen, dass ein solcher Effekt bei einer größeren Anzahl von Untersuchungs Nächten nachweisbar gewesen wäre. Insgesamt konnten deutlich weniger Engraumjäger (Gattungen *Myotis* und *Plecotus*) als Offenraum- und Randstrukturjäger nachgewiesen werden. Dies könnte zum einen an der geringeren Aktivität von Engraumjägern vor Ort liegen, zum anderen aber auch daran, dass die hochfrequenten und relativ leisen Echoortungsrufe von Engraumjägern nur über kurze Distanzen erfassbar sind (Voigt et al., 2021). Fledermäuse der beiden anderen Gilden rufen deutlich lauter und sind daher über größere Distanzen erfassbar (Voigt et al., 2021). Trotz der geringeren Erfassungswahrscheinlichkeit der Engraumjäger konnten wir nachweisen, dass sich bernsteinfarbenes Licht in den frühen Abendstunden negativ auf ihre Aktivität auswirkt. In unseren Analysen konnten wir aufgrund der ähnlichen Rufcharakteristika der *Myotis*-Arten nicht zwischen Teich- und Wasserfledermäusen sowie anderen *Myotis*-Arten unterscheiden. Einige Aufnahmen konnten wir allerdings zweifelsfrei der Teichfledermaus zuordnen. Wir gehen davon aus, dass sowohl Teich- als auch Wasserfledermäuse am Dortmund-Ems-Kanal relativ häufig vorkommen. Möglicherweise zeigen diese beiden Arten ein anderes Reaktionsverhalten auf Licht als die anderen, eher vegetationsgebundenen *Myotis*-Arten. Die statistische Analyse der Daten der NSF Gilde könnte somit durch die fehlende Differenzierung zwischen den wassergebundenen und vegetationsgebundenen *Myotis*-Arten beeinflusst worden sein. Mopsfledermäuse (*Barbastella barbastellus*) konnten wir an den Standorten nicht akustisch dokumentieren. Wir weisen aber darauf hin, dass die Echoortungsrufe dieser Art eine geringe Schallamplitude aufweisen und daher mit automatischen Fledermausdetektoren schwer zu erfassen sind. Ein Vorkommen der Mopsfledermaus und somit die Betroffenheit dieser Art kann daher nicht ausgeschlossen werden.

Referenzen

- Arlidge, W. N. S., Bull, J. W., Addison, P. F. E., Burgass, M. J., Gianuca, D., Gorham, T. M., Jacob, C., Shumway, N., Sinclair, S. P., Watson, J. E. M., Wilcox, C., & Milner-Gulland, E. J. (2018). A global mitigation hierarchy for nature conservation. *Bioscience*, 68(5), 336–347. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy029>
- Azam, C., Kerbiriou, C., Vernet, A., Julien, J. F., Bas, Y., Plichard, L., Maratrat, J., & 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.
- Bennie, J., Duffy, J. P., Davies, T. W., Correa-Cano, M. E., & Gaston, K. J. (2015). Global trends in exposure to light pollution in natural terrestrial ecosystems. *Remote Sensing*, 7(3), 2715–2730.
- Bolliger, J., Hennet, T., Wermelinger, B., Bösch, R., Pazur, R., Blum, S., Haller, J., & Obrist, M. K. (2020). Effects of traffic-regulated street lighting on nocturnal insect abundance and bat activity. *Basic and Applied Ecology*, 47, 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.06.003>

- Childs, S. B., & Buchler, E. R. (1981). Perception of simulated stars by *Eptesicus fuscus* (Vespertilionidae): A potential navigational mechanism. *Animal Behaviour*, 29(4), 1028–1035.
- Day, J., Baker, J., Schofield, H., Mathews, F., & Gaston, K. J. (2015). Part-night lighting: Implications for bat conservation. *Animal Conservation*, 18(6), 512–516.
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A., & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6), e1600377.
- Gagliardi, G., Lupia, M., Cario, G., Tedesco, F., Cicchello Gaccio, F., Lo Scudo, F., & Casavola, A. (2020). Advanced adaptive street lighting systems for smart cities. *Smart Cities*, 3(4), 1495–1512. <https://doi.org/10.3390/smartcities3040071>
- Hale, J. D., Fairbrass, A. J., Matthews, T. J., & Sadler, J. P. (2012). Habitat composition and connectivity predicts bat presence and activity at foraging sites in a large UK conurbation. *PLoS One*, 7(3), e33300. Hale, J. D., Fairbrass, A. J., Matthews, T. J., Davies, G., & Sadler, J. P. (2015). The ecological impact of city lighting scenarios: Exploring gap crossing thresholds for urban bats. *Global Change Biology*, 21(7), 2467–2478. <https://doi.org/10.1111/gcb>.
- Heim, O., Schröder, A., Eccard, J., Jung, K., & Voigt, C. C. (2016). Seasonal activity patterns of European bats above intensively used farmland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 233, 130–139.
- Heim, O., Chávez, F., Courtiol, A., Paul, F., & Voigt, C. C. (2024). Guild-specific response of bats to motion-triggered LED lighting of bicycle trails. *Conservation Science and Practice*, 6(4), e13116. <https://doi.org/10.1111/csp2.13116>
- Hölker, F., Wolter, C., Perkin, E. K., & Tockner, K. (2010). Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(12), 681–682.
- Jonker, M. N., Schillemans, M. J., & Limpens, H.J.G.A. (2022). Potential effects of PC-amber on the activity of common pipistrelles (*Pipistrellus pipistrellus*). *Zoogdierverseniging*.
- Korpach, A. M., Garroway, C. J., Mills, A. M., von Zuben, V., Davy, C. M., & Fraser, K. C. (2022). Urbanization and artificial light at night reduce the functional connectivity of migratory aerial habitat. *Ecography*, 2022(8), e05581. <https://doi.org/10.1111/ecog.05581>
- Kyba, C. C. M., Altıntaş, Y. Ö., Walker, C. E., & Newhouse, M. (2023). Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022. *Science*, 379(6629), 265–268. <https://doi.org/10.1126/science.abq7781>
- Lacoeuilhe, A., Machon, N., Julien, J. F., Le Bocq, A., & Kerbiriou, C. (2014). The influence of low intensities of light pollution on bat communities in a semi-natural context. *PLoSOne*, 9(10), e103042.
- Laforge, A., Pauwels, J., Faure, B., Bas, Y., Kerbiriou, C., Fonderflick, J., & Besnard, A. (2019). Reducing light pollution improves connectivity for bats in urban landscapes. *Landscape Ecology*, 34, 793–809.
- Mariton, L., Le Viol, I., Bas, Y., & Kerbiriou, C. (2023). Characterising diel activity patterns to design conservation measures: Case study of European bat species. *Biological Conservation*, 277, 109852. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2022.109852>
- R Core Team. (2022). R: A language and environment for statistical computing (Version 4.2.2). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rousset, F., & Ferdy, J. B. (2014). Testing environmental and genetic effects in the presence of spatial autocorrelation. *Ecography*, 37(8), 781–790. <https://doi.org/10.1111/ecog.00566>
- Rowse, E. G., Lewanzik, D., Stone, E. L., Harris, S., & Jones, G. (2016). Dark matters: The effects of artificial lighting on bats. In C. Voigt & T. Kingston (Eds.), *Bats in the Anthropocene: Conservation of bats in a changing world* (pp. 187–213). Springer.
- Rydell, J. (1992). Exploitation of insects around streetlamps by bats in Sweden. *Functional Ecology*, 6, 744–750. <https://doi.org/10.2307/2389972>

- Speakman, J. R. (2001). The evolution of flight and echolocation in bats: Another leap in the dark. *Mammal Review*, 31(2), 111–130. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2907.2001.00082.x>
- 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., Azam, C., Dekker, J., Ferguson, J., Fritze, M., Gazaryan, S., Hölker, F., Jones, G., Leader, N., Lewanzik, D., Limpens, H. J. G. A., Mathews, F., Rydell, J., Schofield, H., Spoelstra, K., & Zagamajster, M. (2018). Guidelines for consideration of bats in lighting projects. EURO-BATS Publication Series No. 8 (p. 62). UNEP/EUROBATS Secretariat.
- Voigt, C. C., Dekker, J., Fritze, M., Gazaryan, S., Hölker, F., Jones, G., Lewanzik, D., Limpens, H. J. G. A., Mathews, F., Rydell, J., Spoelstra, K., & Zagamajster, M. (2021). The impact of light pollution on bats varies according to foraging guild and habitat context. *Bioscience*, 71(10), 1103–1109. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab087>
- Voigt, C. C., Russo, D., Runkel, V., & Goerlitz, H. R. (2021). Limitations of acoustic monitoring at wind turbines to evaluate fatality risk of bats. *Mammal Review*, 51(4), 559–570. <https://doi.org/10.1111/mam.12248>
- Voigt, C. C., Scholl, J. M., Bauer, J., Teige, T., Yovel, Y., Kramer-Schadt, S., & Gras, P. (2020). Movement responses of common noctule bats to the illuminated urban landscape. *Landscape Ecology*, 35, 189–201.
- Wickham, H. (2016). *Data analysis ggplot2* (pp. 189–201). Springer.

Anhang

Tabellen

Tabelle A 1 Schaltplan der Zone 2 (Rieselfelder) der Kanalpromenade in Münster. Die Laternen wurden in Gruppen von 5 Laternen eingeteilt und den jeweiligen Lichtschaltungen zugeordnet: 20s – Bernsteinfarbenes Licht (1800 K) für 20s bei Auslösung durch Bewegung auf dem Radweg (gelb hinterlegt); aus – ausgeschaltet während der gesamten Nacht (grau hinterlegt). Zwischen 23:00 – 05:00 waren alle Laternen ausgeschaltet (Abschaltungen). Laternen, an denen passives akustisches Monitoring sowie Lichtmessungen unterhalb des Laternenkopfes durchgeführt wurden, befanden sich zentral in den einzelnen Schaltungsgruppen und sind in der Tabelle mit einem * gekennzeichnet sowie in einem dunkleren Farbton hinterlegt.

Mastnummer	Einschaltungen								Abschaltungen
	06.07.	07.07.	02.08.	04.08.	18.09.	19.09.	28.09.	29.09.	
132	aus	aus	aus	20s	aus	Aus	aus	20s	23:00-05:00
133	aus	aus	aus	20s	aus	Aus	aus	20s	23:00-05:00
134*	aus	aus	aus	20s	aus	Aus	aus	20s	23:00-05:00
135	aus	aus	aus	20s	aus	Aus	aus	20s	23:00-05:00
136	aus	aus	aus	20s	aus	Aus	aus	20s	23:00-05:00
137	aus	20s	aus	aus	aus	20s	aus	aus	23:00-05:00
138	aus	20s	aus	aus	aus	20s	aus	aus	23:00-05:00
139*	aus	20s	aus	aus	aus	20s	aus	aus	23:00-05:00
140	aus	20s	aus	aus	aus	20s	aus	aus	23:00-05:00
141	aus	20s	aus	aus	aus	20s	aus	aus	23:00-05:00
163	aus	aus	aus	20s	aus	Aus	aus	20s	23:00-05:00
164	aus	aus	aus	20s	aus	Aus	aus	20s	23:00-05:00
165*	aus	aus	aus	20s	aus	Aus	aus	20s	23:00-05:00
166	aus	aus	aus	20s	aus	Aus	aus	20s	23:00-05:00
167	aus	aus	aus	20s	aus	Aus	aus	20s	23:00-05:00
168	aus	20s	aus	aus	aus	20s	aus	aus	23:00-05:00
169	aus	20s	aus	aus	aus	20s	aus	aus	23:00-05:00
170*	aus	20s	aus	aus	aus	20s	aus	aus	23:00-05:00
171	aus	20s	aus	aus	aus	20s	aus	aus	23:00-05:00
172	aus	20s	aus	aus	aus	20s	aus	aus	23:00-05:00

Tabelle A 2 Schaltplan der Zone 1 (Osttor) der Kanalpromenade in Münster. Die Laternen wurden in Gruppen von 5 Laternen eingeteilt und den jeweiligen Lichtschaltungen zugeordnet: 20s – Warmweißes Licht (2700 K) für 20s bei Auslösung durch Bewegung auf dem Radweg (gelb hinterlegt); 40s – Warmweißes Licht (2700 K) für 40s bei Auslösung durch Bewegung auf dem Radweg (dunkelgelb hinterlegt); aus – ausgeschaltet während der gesamten Nacht (grau hinterlegt). Zwischen 23:00 – 05:00 waren alle Laternen ausgeschaltet (Abschaltungen). Laternen, an denen passives akustisches Monitoring sowie Lichtmessungen unterhalb des Laternenkopfes durchgeführt wurden, befanden sich zentral in den einzelnen Schaltungsgruppen und sind in der Tabelle mit einem * gekennzeichnet sowie in einem dunkleren Farbton hinterlegt.

Mastnummer	Einschaltungen								Abschaltungen
	06.07.	07.07.	02.08.	04.08.	18.09.	19.09.	03.10.	04.10.	
7	aus	40s	aus	aus	aus	20s	aus	20s	23:00-05:00
8	aus	40s	aus	aus	aus	20s	aus	20s	23:00-05:00
9*	aus	40s	aus	aus	aus	20s	aus	20s	23:00-05:00
10	aus	40s	aus	aus	aus	20s	aus	20s	23:00-05:00
11	aus	40s	aus	aus	aus	20s	aus	20s	23:00-05:00
12	aus	20s	aus	40s	aus	Aus	aus	40s	23:00-05:00
13	aus	20s	aus	40s	aus	Aus	aus	40s	23:00-05:00
14*	aus	20s	aus	40s	aus	Aus	aus	40s	23:00-05:00
15	aus	20s	aus	40s	aus	Aus	aus	40s	23:00-05:00
16	aus	20s	aus	40s	aus	Aus	aus	40s	23:00-05:00
17	aus	aus	aus	20s	aus	40s	aus	aus	23:00-05:00
18	aus	aus	aus	20s	aus	40s	aus	aus	23:00-05:00
19*	aus	aus	aus	20s	aus	40s	aus	aus	23:00-05:00
20	aus	aus	aus	20s	aus	40s	aus	aus	23:00-05:00
21	aus	aus	aus	20s	aus	40s	aus	aus	23:00-05:00
46	aus	40s	aus	aus	aus	20s	aus	20s	23:00-05:00
47	aus	40s	aus	aus	aus	20s	aus	20s	23:00-05:00
48*	aus	40s	aus	aus	aus	20s	aus	20s	23:00-05:00
49	aus	40s	aus	aus	aus	20s	aus	20s	23:00-05:00
50	aus	40s	aus	aus	aus	20s	aus	20s	23:00-05:00
51	aus	20s	aus	40s	aus	Aus	aus	40s	23:00-05:00
52	aus	20s	aus	40s	aus	Aus	aus	40s	23:00-05:00
53*	aus	20s	aus	40s	aus	Aus	aus	40s	23:00-05:00
54	aus	20s	aus	40s	aus	Aus	aus	40s	23:00-05:00
55	aus	20s	aus	40s	aus	Aus	aus	40s	23:00-05:00

56	aus	aus	aus	20s	aus	40s	aus	aus	23:00-05:00
57	aus	aus	aus	20s	aus	40s	aus	aus	23:00-05:00
58*	aus	aus	aus	20s	aus	40s	aus	aus	23:00-05:00
59	aus	aus	aus	20s	aus	40s	aus	aus	23:00-05:00
65	aus	aus	aus	20s	aus	40s	aus	aus	23:00-05:00

Tabelle A 3 Liste der Fledermausarten in der Bibliothek „European bats DE“ und Klassifizierung auf der Grundlage der lokalen Häufigkeit und der allgemeinen Biologie (übernommen aus Heim et al., 2024). Abkürzungen: ESF = Randstrukturjäger (Engl. „Edge-Space Forager“), NSF = Engraumjäger (Engl. „Narrow-Space Forager“), OSF = Offenraumjäger (Engl. „Open-Space Forager“)

Gattung	Art	Abkürzungen	Verbreitet	Weniger verbreitet	Abwesend	Gilde
Barbastella	barbastellus	BarBar		X		ESF
Eptesicus	serotinus	EptSer	X			OSF
	<i>nilssonii</i>				X	OSF
<i>Hypsugo</i>	<i>Savii</i>				X	ESF
<i>Miniopterus</i>	<i>schreibersii</i>				X	OSF
Myotis	<i>alcaethoe</i>				X	NSF
	bechsteinii	MyoBec	X			NSF
	<i>blythii</i>				X	NSF
	brandtii	MyoBra	X			NSF
	<i>capaccinii</i>				X	ESF
	dasycneme	MyoDas	X			ESF
	daubentonii	MyoDas	X			ESF
	emarginatus	MyoEma		X		NSF
	myotis	MyoMyo	X			NSF
	mystacinus	MyoMys	X			NSF
	nattereri	MyoNat	X			NSF
Nyctalus	<i>lasiopterus</i>				X	OSF
	leisleri	NycLei		X		OSF
	noctula	NycNoc	X			OSF
Pipistrellus	<i>kuhlii</i>				X	ESF
	nathusii	PipNat	X			ESF
	pipistrellus	PipPip	X			ESF
	pygmaeus	PipPyg		X		ESF
Plecotus	auritus	PleAur	X			NSF
	<i>austriacus</i>				X	NSF
	<i>kolombatovici</i>				X	NSF
	<i>macrobullaris</i>				X	NSF
<i>Rhinolophus</i>	<i>euryale</i>				X	NSF
	<i>ferrumequinum</i>				X	NSF
	<i>hipposideros</i>				X	NSF
<i>Tadarida</i>	<i>teniotis</i>				X	OSF
Vespertilio	murinus	VesMur		X		OSF

Tabelle A 4 Metadaten der Aufnahmenächten: Mindesttemperatur (Min Temp), Durchschnittstemperatur (Durchschnitt Temp), Maximaltemperatur (Max Temp), Datum Neumond, Abstand zum Neumond.

Zeitraum	Nacht	Min Temp [°C]	Durchschnitt Temp [°C]	Max Temp [°C]	Datum Neumond	Abstand zum Neumond [Tage]
Juli	06.07./07.07.	13,2	14,9	15,7	06.07.2024	0
	07.07./08.07.	14,3	15,5	16,3	06.07.2024	+1
August	02.08./03.08.	13,9	17,1	18,8	04.08.2024	-2
	04.08./05.08.	13,9	15,3	16,4	04.08.2024	0
Mitte September	18.09./19.09.	12,5	15,7	18,1	03.09.2024	+15
	19.09./20.09.	11,8	14,2	16,6	03.09.2024	+16
Ende September	28.09./29.09.	4,7	7,0	9,7	02.10.2024	-4
	29.09./30.09.	8,5	9,8	11,4	02.10.2024	-3
Oktober	03.10./04.10.	6,7	9,8	11,8	02.10.2024	+1
	04.10./05.10.	2,7	6,4	11,2	02.10.2024	+2

Tabelle A 5 Auflistung der Dämmerungszeiten (Dämmerungsbeginn und -ende) der Aufnahmenächte im Jahr 2024. Der Abschaltzeitraum charakterisiert den Zeitraum, indem die Straßenlaternen stets ausgeschaltet waren. „Aufnahmezeit abends“ beschreibt den Überschneidungszeitraum von Dämmerungsbeginn bis 23:00 Uhr, in der das passive akustische Monitoring lief und die Beleuchtungsweisen angeschaltet waren. „Aufnahmezeit morgens“ charakterisiert hingegen den Überschneidungszeitraum von 05:00 Uhr bis Dämmerungsende, in der das passive akustische Monitoring lief und die Beleuchtungsweisen angeschaltet waren.

Aufnahmenacht	Dämmerungsbeginn	Dämmerungsende	Abschaltzeitraum	Aufnahmezeit abends	Aufnahmezeit morgens
06.07./07.07.24	22:38:30	04:33:15	23:00-05:00	21 min 30 s	0 min
07.07./08.07.24	22:37:42	04:34:24	23:00-05:00	22 min 18 s	0 min
02.08./03.08.24	22:00:07	05:15:31	23:00-05:00	59 min 53 s	15 min 31 s
04.08./05.08.24	21:56:13	05:19:08	23:00-05:00	63 min 47 s	19 min 8 s
18.09./19.09.24	20:13:00	06:38:25	23:00-05:00	167 min	98 min 25 s
19.09./20.09.24	20:10:36	06:40:05	23:00-05:00	169 min 24 s	100 min 5 s
28.09./29.09.24	19:49:13	06:54:57	23:00-05:00	190 min 47 s	114 min 57 s
29.09./30.09.24	19:46:53	06:56:35	23:00-05:00	193 min 7 s	116 min 35 s
03.10./04.10.24	19:37:38	07:03:11	23:00-05:00	202 min 22 s	123 min 11 s
04.10./05.10.24	19:35:20	07:04:50	23:00-05:00	204 min 40 s	124 min 50 s

Abbildungen

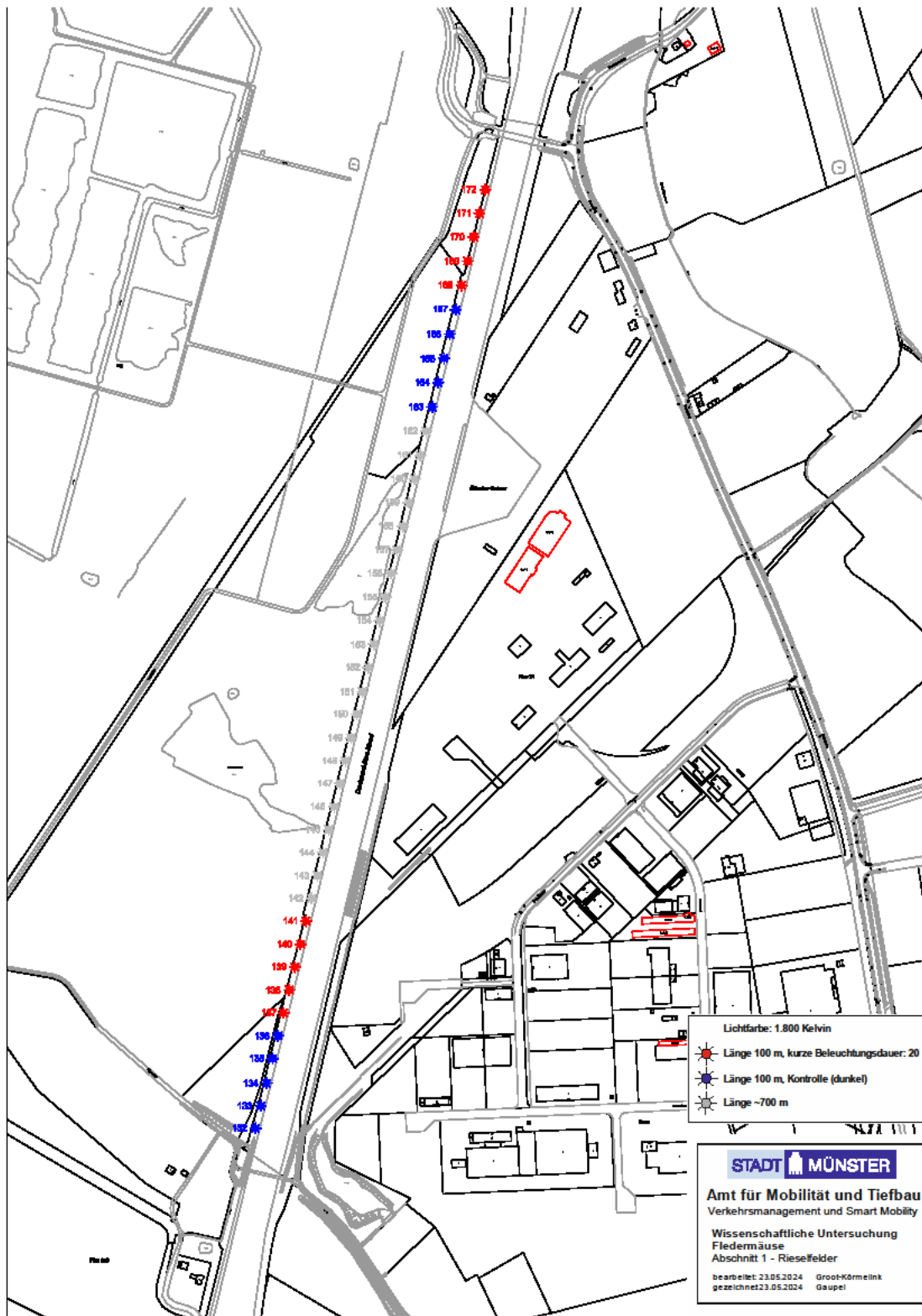


Abbildung A 1 Plan der Zone 2 (Rieselfelder) an der Kanalpromenade in Münster. Der Plan wurde durch die Stadt Münster erstellt und zeigt den Versuchsaufbau sowie die integrierten Straßenlaternen. Die akustischen Aufnahmen erfolgten jeweils an den Straßenlaternen mit den Mastnummern 134, 139, 165 und 170.

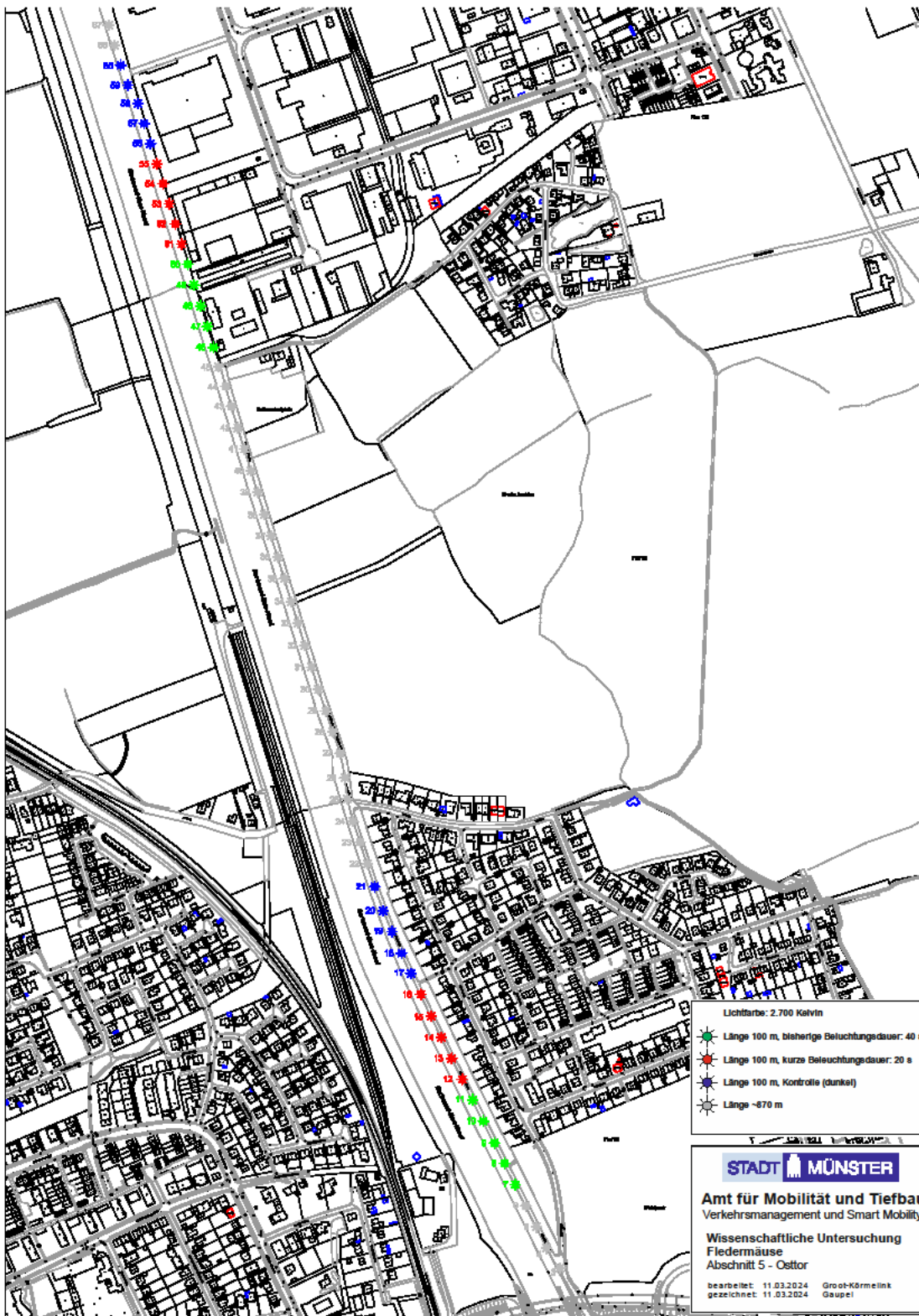


Abbildung A 2 Plan der Zone 1 (Osttor, siedlungsfern) an der Kanalpromenade in Münster. Der Plan wurde durch die Stadt Münster erstellt und zeigt den Versuchsaufbau sowie die integrierten Straßenlaternen. Die akustischen Aufnahmen erfolgten jeweils an den Straßenlaternen mit den Mastnummern 9, 14, 19, 48, 53 und 58.

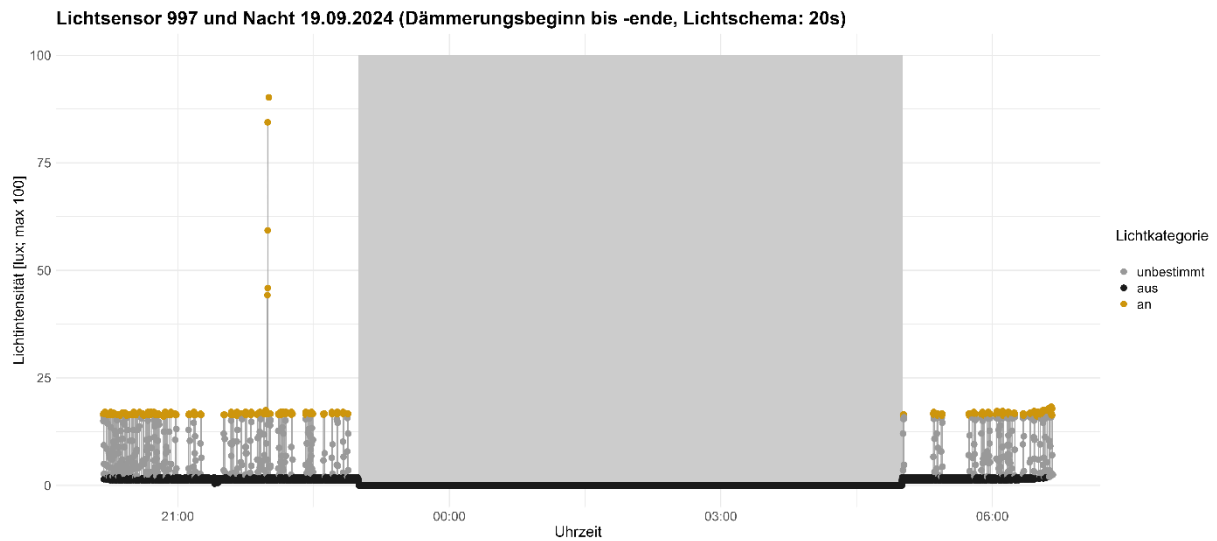


Abbildung A 3 Darstellung der Lichtintensität in Lux am Beispiel der Laterne 9 in Zone 1 (Osttor, Münster) am 19.09.2024. Der Laternen wurden in dieser Nacht für 20s angeschaltet, sobald sie ausgelöst wurden. Die y-Achse zeigt die Stunden der Nacht von Dämmerungsbeginn bis -ende. Der Lichtsensor (Nummer 997) nahm jede Sekunde einen Lux-Wert auf. Diese wurden jeweils einer der Kategorien unbestimmt (grau - Lampe wird hoch- oder runtergefahren), aus (schwarz - ausgeschaltet) und an (gelb - maximale Lichtintensität der Lampe) zugeordnet. Die graue Box kennzeichnet den Zeitraum von 23:00 bis 05:00, in dem die Laterne ausgeschaltet war. Der vergleichbar hohe Peak von etwa 88 Lux charakterisiert die Synchronisierung der Geräte mit einem Licht- und akustischen Signal.

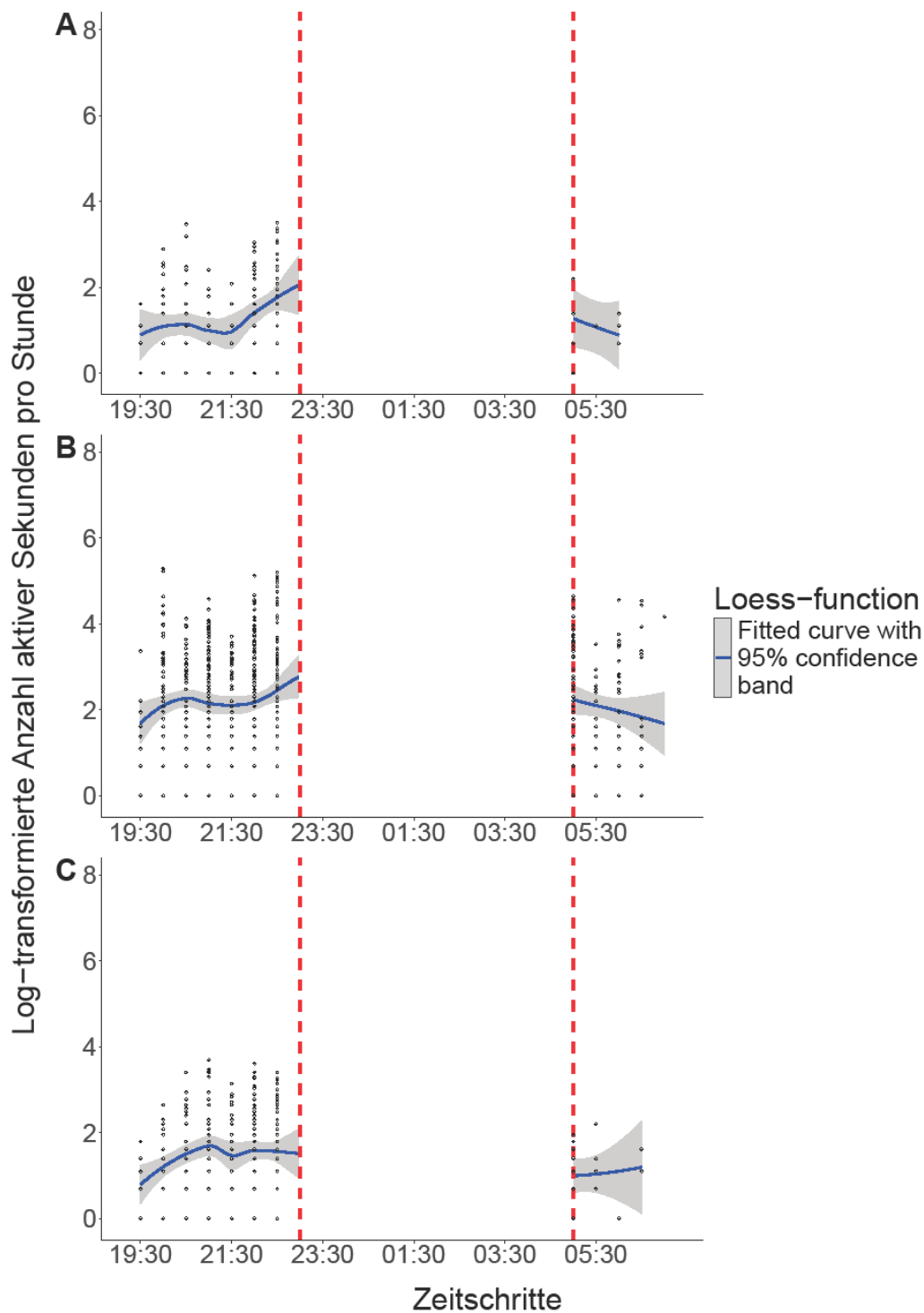


Abbildung A 4 Echoortungsaktivität von Fledermäusen (log-transformierte Anzahl aktiver Sekunden pro 30-Minuten-Zeitintervall (Zeitschritte; $n_{OSF} = 169$, $n_{ESF} = 574$ und $n_{NSF} = 288$) während der Nacht in Zone 1 (Osttor) der Kanalpromenade in Münster. Die blaue Linie in zeigt eine Lößfunktion (als $y \sim x$), die an die Daten angepasst wurde, während das graue Band die 95%-Konfidenzintervalle darstellt. Bitte beachten Sie, dass die Fledermausaktivität in (a-c) aufgrund der halbstündlichen Aggregation gepulst erscheint, aber kontinuierlich war. Jede Reihe ist einer funktionalen Gilde zugeordnet: A) Offenraumjäger (OSF), B) Randstrukturjäger (ESF) und C) Engrammjäger (NSF).

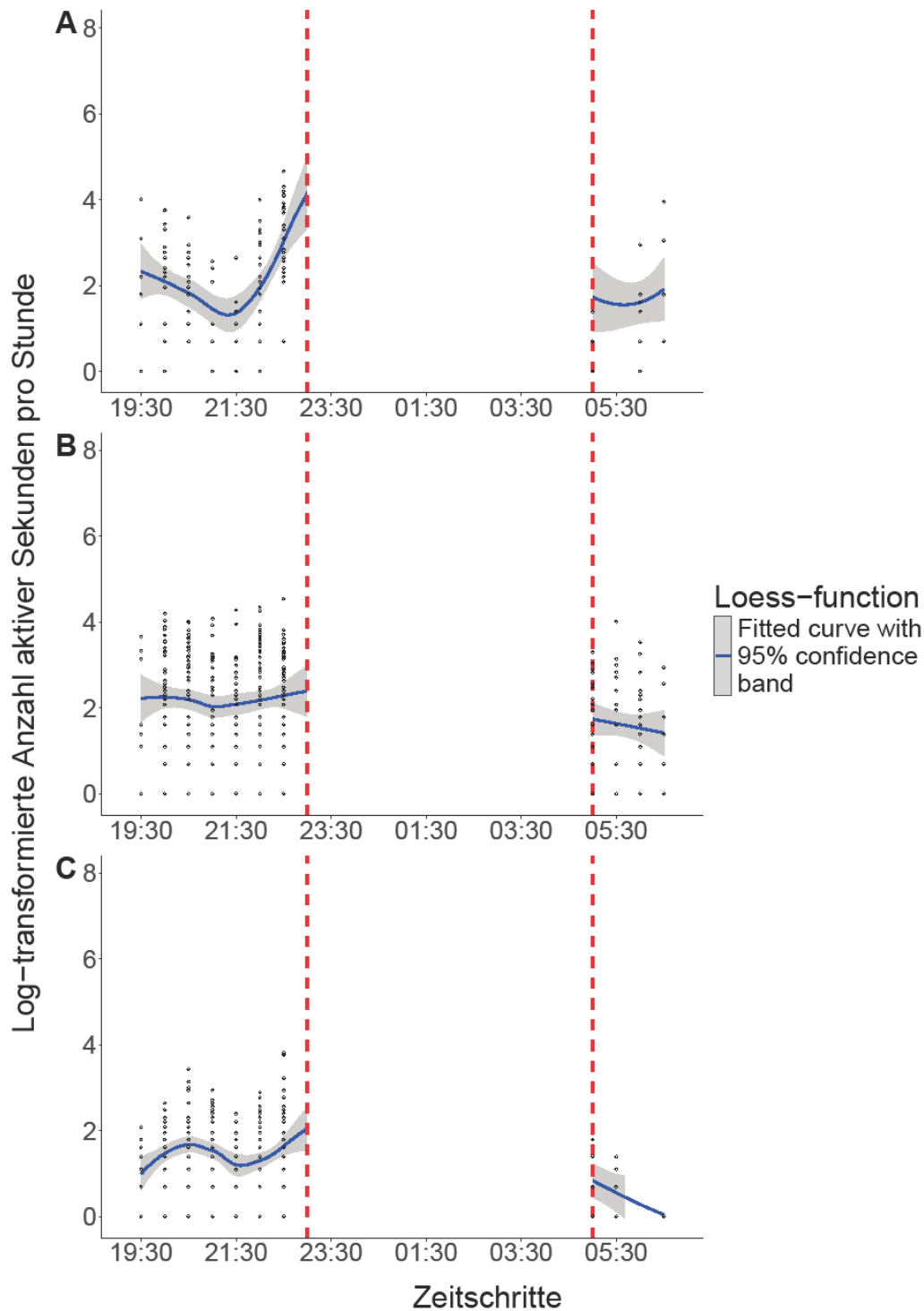


Abbildung A 5 Echoortungsaktivität von Fledermäusen (log-transformierte Anzahl aktiver Sekunden pro 30-Minuten-Zeitintervall (Zeitschritte; $n_{OSF} = 130$, $n_{ESF} = 357$ und $n_{NSF} = 290$) während der Nacht in Zone 2 (Rieselfelder) der Kanalpromenade in Münster. Die blaue Linie in zeigt eine Lößfunktion (als $y \sim x$), die an die Daten angepasst wurde, während das graue Band die 95%-Konfidenzintervalle darstellt. Bitte beachten Sie, dass die Fledermausaktivität in (a-c) aufgrund der halbstündlichen Aggregation gepulst erscheint, aber kontinuierlich war. Jede Reihe ist einer funktionalen Gilde zugeordnet: A) Offenraumjäger (OSF), B) Randstrukturjäger (ESF) und C) Engrammjäger (NSF).