

SIRASO

SICHERE RADWEGE DURCH
SOLARBELEUCHTUNG

FRANKFURT
|
NEU-ISENBURG
|
DREIEICH
|
LANGEN
|
EGELSBACH
|
ERZHAUSEN
|
DARMSTADT



Modellprojekt des Bundes

„SIRASO - Sichere Radwege durch Solarbeleuchtung“

Abschlussbericht zur „Beleuchtungssteuerung an Radschnellverbindungen und ihre Wirkung auf Fledermäuse“ im Rahmen des Ausbaus der Radschnellverbindung zwischen Frankfurt am Main und der Wissenschaftsstadt Darmstadt



Auftraggeber:

Regionalpark Rhein-Main Süd-West gGmbH
Mörfelder Str. 33
65451 Kelsterbach



Auftragnehmer:

Institut für Tierökologie und Naturbildung GmbH (ITN)
Marburger Str. 14-16
35321 Gonterskirchen
Tel.: 06405/505770



Ingenieurbüro Dr. Petry & Partner mbH (IBDP)
Wilhelm-Weber-Weg 8
63069 Offenbach
Tel.: 069/83830879

Projektleitung: Manfred Ockel

Bearbeitung: Projektbeschreibung

Regionalpark Rhein-Main Süd-West gGmbH
c/o Stadt Kelsterbach

Manfred Ockel
Barbara Thureau

Fledermäuse

Institut für Tierökologie und Naturbildung GmbH (ITN)
Dr. Markus Dietz
Elena Krannich

Beleuchtungssteuerung

Ingenieurbüro Dr. Petry & Partner mbB (IBDP)
Dr. Klaus Petry
Nils Schreck

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



April 2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis	5
1. Anlass	6
2. Beschreibung des Projektes	8
3. Projektbeteiligte.....	10
4. Erläuterung des Bauprojektes der Radschnellwegverbindung	11
5. Beleuchtung von Radschnellwegverbindungen	14
5.1. Vorgaben an die Beleuchtung	14
5.2. Außerorts.....	15
5.3. Übergang in den innerörtlichen Bereich	15
5.4. Innerorts	16
5.5. Einsatz von Photovoltaikbeleuchtung außerorts ohne externe Stromversorgung.....	16
5.6. Messergebnisse	18
5.7. Ergebnisse der Funktionalität der Beleuchtung	31
6. Auswirkungen einer Beleuchtung außerorts auf Fledermäuse.....	33
6.1. Wissenschaftlicher Kenntnisstand	33
6.1.1. Insekten	33
6.1.2. Fledermäuse	35
6.1.3. Gesetzliche Grundlagen	37
6.2. Fragestellung	38
6.3. Untersuchungsansatz	38
6.4. Ergebnisse.....	45
6.5. Bewertung der Untersuchungsergebnisse	52
7. Handlungsleitfaden für die Umsetzung von außerörtlicher Beleuchtung von Radschnellverbindungen	57
8. Zusammenfassung/Summary	58
9. Literatur	61
10. Anhang.....	65

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Ursprünglich vorgesehener Streckenverlauf der Radschnellverbindung FRM1 von Frankfurt a.M. nach Darmstadt.	11
Abb. 2: Streckenabschnitte der geplanten Radschnellverbindung FRM 1.	12
Abb. 3: Spektrale Verteilung der Solarleuchte mit 3.000 K.....	18
Abb. 4: Spektrale Verteilung der Solarleuchte mit 2.200 K.....	18
Abb. 5: Leuchtdichteaufnahme von Messpunkt Stadtwaldhaus 2023.	22
Abb. 6: Ergebnisse der Leuchtdichteauswertung samt Berechnung des TI-Wertes, angegeben in Prozent, von Messpunkt Stadtwaldhaus 2023.	22
Abb. 7: Leuchtdichteaufnahme von Messpunkt Stadtwaldhaus 2024.	23
Abb. 8: Ergebnisse der Leuchtdichteauswertung samt Berechnung des TI-Wertes, angegeben in Prozent, von Messpunkt Stadtwaldhaus 2024.	23
Abb. 9: Leuchtdichteaufnahme von Messpunkt Langen-Egelsbach 2023.....	24
Abb. 10: Ergebnisse der Leuchtdichteauswertung samt Berechnung des TI-Wertes, angegeben in Prozent, von Messpunkt Langen-Egelsbach 2023.	24
Abb. 11: Leuchtdichteaufnahme von Messpunkt Langen-Egelsbach 2024.	25
Abb. 12: Ergebnisse der Leuchtdichteauswertung samt Berechnung des TI-Wertes, angegeben in Prozent, von Messpunkt Langen-Egelsbach 2024.	25
Abb. 13: Auslösung des Bewegungsmelders (Nutzerfrequenz) in der Nacht vom 13.05.2021 auf den 14.05.2021.	26
Abb. 14: Auslösung des Bewegungsmelders (Nutzerfrequenz) Leuchte 4 Versuchsperiode 3 (25.07.2022–03.08.2022).	27
Abb. 15: Auslösung des Bewegungsmelders (Nutzerfrequenz) Leuchte 4 Versuchsperiode 3 (25.07.2022–26.07.2022).	27
Abb. 16: Auslösung des Bewegungsmelders (Nutzerfrequenz) Leuchte 4 Versuchsperiode 3 (28.07.2022–29.07.2022).	28
Abb. 17: Auslösung des Bewegungsmelders (Nutzerfrequenz) Leuchte 4 Versuchsperiode 3 (31.07.2022–01.08.2022).	28
Abb. 18: Protokollierung Dauer-EIN Stadtwaldhaus Leuchten 1–3 vom 12.05.2021 bis zum 15.05.2021.....	29
Abb. 19: Übersicht der ursprünglich geplanten Radschnellverbindung Frankfurt- Darmstadt und Lage der beprobten Abschnitte in den Jahren 2020 bis 2022. Stand 2021.	40
Abb. 20: Beprobte Lampen an der Radschnellverbindung Frankfurt-Darmstadt mit Installation eines Batcorders und Dataloggers sowie teilweise einer Eklektorfalle.	44
Abb. 21: Aktivitäten der Vertreter des Myotis-Lauttyps (alle Arten lichtscheu) an der Teststrecke im Frankfurter Stadtwald. L = Lampe; Z = Zwischen den Lampen; A = Außerhalb der Teststrecke...48	
Abb. 22: Bei Lampe 1 registrierte Radfahrer/Fußgänger-Aktivitäten entlang der Teststrecke jeweils in einer Erfassungsnacht im Juli und September sowie der Zeitraum der Fledermausaktivität.	49
Abb. 23: Anzahl gefangener Insekten je Lampe und Block getrennt nach Habitat.	50

Abb. 24: Ergebnisse der Modelle zur Fledermausaktivität in Abhängigkeit der Lichtdauer der Lampen entlang von zwei Abschnitten des Radschnellweges Frankfurt- Darmstadt im Jahr 2021.	51
Abb. 25: Ergebnisse der Analysen Fledermausaktivität vs. Licht vs. Habitat entlang eines Abschnitts des Radschnellweges Frankfurt-Darmstadt im Jahr 2022.	52
Abb. 26: Aktivitäten der Vertreter des Nyctaloiden Lauttyps (opportunistisch reagierend auf Licht) an den Standorten der Teststrecke des Radschnellweges Frankfurt-Darmstadt.	65
Abb. 27: Aktivitäten der Vertreter des Pipistrellus-Lauttyps (opportunistisch reagierend auf Licht) an den Standorten der Teststrecke des Radschnellweges Frankfurt-Darmstadt.	65
Abb. 28: Von der Lampe 7 registrierte Radfahrer/Fußgänger-Aktivitäten entlang der Teststrecke in jeweils zwei Nächten im Juli.	66

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Beleuchtungsstärkemesswerte der Teststrecke am Stadtwaldhaus.	19
Tab. 2: Fortsetzung Beleuchtungsstärkemesswerte der Teststrecke am Stadtwaldhaus.	20
Tab. 3: Beleuchtungsstärkemesswerte der Versuchsstrecken 1b im ersten Bauabschnitt zwischen Erzhausen und Wixhausen.	20
Tab. 4: Beleuchtungsstärkemesswerte der Versuchsstrecke 2a im zweiten Bauabschnitt zwischen Langen und Egelsbach.	20
Tab. 5: Designs der akustischen Erfassung in den Jahren 2020 bis 2022. Lichtmodi: an = Lampe durchgehend an; aus = Lampe durchgehend aus; BM = Bewegungsmelder.	42
Tab. 6: Nachgewiesene Fledermausarten an der Radschnellverbindung Frankfurt-Darmstadt und deren Reaktion auf Licht bei der Jagd sowie deren Schutzstatus.	46
Tab. 7: Nachgewiesene Insektengruppen am Radschnellweg zwischen Egelsbach und Wixhausen sowie im Stadtwald Frankfurt im Jahr 2021.	67

1. Anlass

Manfred Ockel

Die Verbesserung des Radwegeausbaus im öffentlichen Raum hat in den letzten Jahren unterstützt durch zahlreiche Förderprogramme vom Bund und den Ländern stark zugenommen. Ziel ist es, die Radinfrastruktur quantitativ und qualitativ zu verbessern, um den Modal Split in Deutschland zu Gunsten des Fahrradverkehrs zu verändern. Voraussetzung zur Erreichung dieses Ziels ist vor allem die Infrastruktur für verbesserte Radwegeverbindungen, insbesondere in Gebieten mit hoher Besiedlungsdichte und Großstädten.

Der Bau von Radschnellverbindungen hat insbesondere zum Ziel das Fahrrad als Transportmittel vom Wohnort zum Arbeitsplatz zu stärken.

Nach dem Deutschland Atlas des Bundes sind 60 % der sozialversicherungspflichtigen Beschäftigten im Jahr 2022 von ihrem Wohnort zum Arbeitsort gependelt. Das waren 20,3 Millionen Menschen. Im Schnitt lag der Arbeitsweg bei 17,2 km.

Das Land Hessen veröffentlichte im Jahr 2017 die Nahmobilitätsstrategie für Hessen, um die durch den Verkehr entstehenden Treibhausgase und Schadstoffe Schritt für Schritt zu reduzieren (HMWEVW, 2017). Ziel ist es den Fuß- und Radverkehr sowie den öffentlichen Nahverkehr zu fördern und auszubauen. Dafür wurde am 11.07.2023 das hessische Nahmobilitätsgesetz (NaMobG HE) verabschiedet, in dem erstmals in Hessen Radschnellwege und Raddirektverbindungen rechtlich definiert sind. Diese sollen im Ballungsraum Rhein-Main künftig insbesondere den alltäglichen Pendelverkehr dienen und die Gesamtverkehrsinfrastruktur (Autobahnen, S-Bahnen etc.) entlasten. Eine geplante Radschnellverbindung ist der FRM1 zwischen Frankfurt und Darmstadt. Im Juni 2019 wurde der erste Bauabschnitt eröffnet. Um die Attraktivität und Sicherheit der Radschnellverbindung zu erhöhen, soll der gesamte Radschnellweg beleuchtet werden. Dies entspricht den Qualitätsstandards und Musterlösungen des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen (HMWEVW, 2020), die mit § 12 (4) NaMobG rechtlich verankert

wurden. Entsprechend § 12 (1) NahMobG sollen alle Teile des Radnetzes den Qualitätsstandards und Musterlösungen entsprechen. Es gibt darüber hinaus keine Beleuchtungspflicht für die Träger der Straßenbaulast (HStrG §9).

Durch die Elektrifizierung von Fahrrädern und einer signifikanten Verbesserung von Radschnellverbindungen wäre das Fahrrad eine potenzielle Alternative für viele Menschen vom Wohnort zu ihrem Arbeitsplatz und zurückzupendeln.

Die vorliegende Studie soll für Radschnellverbindungen die Frage klären, ob Solar-Beleuchtung von Radstrecken im Außenbereich ohne weiteren Stromanschluss möglich ist und welche Auswirkungen auf Fledermäuse und Insekten zu verzeichnen sind.

2. Beschreibung des Projektes

Manfred Ockel

Im Jahr 2018 wurde die gemeinnützige Regionalpark gGmbH beauftragt, eine Radschnellverbindung zwischen Frankfurt am Main und der Wissenschaftsstadt Darmstadt zu planen und zu bauen. Vorausgegangen war eine Machbarkeitsstudie, die zum einen das Potenzial für die Anzahl der Fahrradfahrer auf der Strecke ermittelte sowie eine erste Vorzugsvariante beinhaltete.

Bei der Vorstellung und Diskussion über Radschnellverbindungen wurden insbesondere von den interessierten Personen in öffentlichen Diskussionen und Dialogrunden vier Punkte genannt, die entscheidend für die Akzeptanz und Nutzung von Radschnellverbindungen sind:

1. Gute Beschilderung der Strecke
2. Beleuchtung der Strecke
3. Gute Fahrbahnqualität der Strecke
4. Ganzjährige Befahrbarkeit der Strecke

Die Radstrecke wird nicht durch eine ganzheitliche Planfeststellung geplant und umgesetzt, sondern wird in definierte Abschnitte zeitlich versetzt ausgeführt. Die Radschnellverbindung ist ein Modellprojekt des Landes Hessen und wird bis zu 75 % gefördert. Der Hochschule Darmstadt obliegt die wissenschaftliche Begleitung. Die betroffenen Kommunen. Frankfurt am Main, Neu-Isenburg, Dreieich, Langen, Egelsbach, Erzhausen und Wissenschaftsstadt Darmstadt erbringen die Restfinanzierung. Die Strecke führt sowohl durch die jeweiligen Städte als auch durch Landschaftsbereiche, die sich teilweise an der Grenze zu Schutzgebieten befinden.

Ziel des Modellvorhabens des Bundes ist es, zu prüfen, ob eine Photovoltaik-Beleuchtung ohne direkten Stromanschluss in der Lage ist, die Anforderungen für eine Beleuchtung der

Strecke zu erfüllen. Weiterhin sind durch die Beleuchtung die ökologischen Auswirkungen, insbesondere auf Säugetiere (Fledermäuse) ferner auf Insekten, zu prüfen.

Hierfür wurde zunächst im Jahr 2020 ein Modellversuch im Frankfurter Stadtwald in einem stark beschatteten Bereich durchgeführt. Es wurden auf der potenziellen Radschnellwegstrecke acht Photovoltaikleuchten installiert, die zusätzlich an eine dort verlaufende Stromversorgung angeschlossen waren. Ziel der Versuchsreihe war es, herauszufinden wie autark die eingesetzten Photovoltaikleuchten in einem belaubten Waldbereich die Beleuchtung des Radschnellweges realisiert werden können. Zusätzlich wurde untersucht, ob sich das Flugverhalten der dort vorkommenden Fledermausarten durch die Beleuchtung in der Nacht (dauerhaft beziehungsweise über Radar gesteuert temporär) verändert und ob die Beleuchtung eine Einschränkung des Flugverhaltens der Fledermäuse impliziert.

Für die wissenschaftliche Begleitung des Versuches wurde das Ingenieurbüro, Dr. Petry & Partner mbB in Offenbach sowie das Institut für Tierökologie & Naturbildung GmbH in Gonterskirchen beauftragt.

3. Projektbeteiligte

Manfred Ockel

Folgende Zuschussgeber sind beteiligt.

Beleuchtung: Bundesministerium für Verkehr aufgrund der Richtlinie zur Förderung innovativer Projekte zur Verbesserung des Radverkehrs in Deutschland

Strecke: Hessen Mobil und Hessisches Ministerium f. Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum (HMWVW)

Kommunen: Dreieich, Erzhausen, Egelsbach, Frankfurt/M., Langen, Neu-Isenburg, Wissenschaftsstadt Darmstadt.

Planungsbüros: Büro Grün³, Frankfurt/M.

KH Planwerk GmbH, Petersberg

GTL Landschaftsarchitektur Triebswetter, Mauer, Bruns Partner mbB, Kassel

Lindschulte Ingenieurgesellschaft mbH, Düsseldorf

Externe Prüfer: Büro Dr. Petry & Partner mbB

Institut für Tierökologie & Naturbildung GmbH

Gesamtkoordination

und Ausführung: Regionalpark RheinMain Südwest gGmbH,

Klaus Wichert, Manfred Ockel und Barbara Thureau

4. Erläuterung des Bauprojektes der Radschnellwegverbindung

Manfred Ockel

Auf der Karte in Abb. 1 ist die ursprüngliche Streckenführung der Radschnellverbindung zwischen Frankfurt am Main und der Wissenschaftsstadt Darmstadt markiert (Abb. 1).

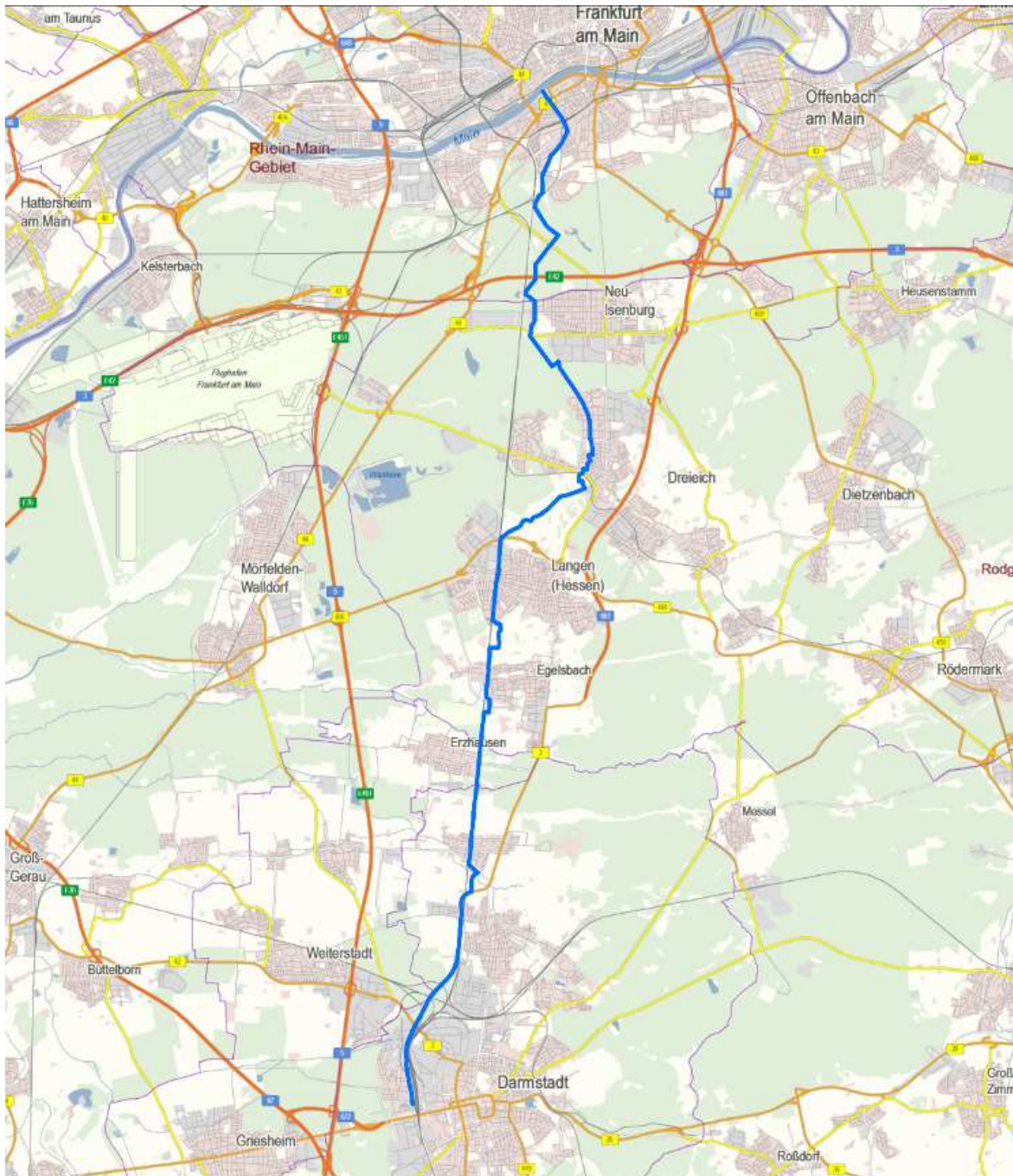


Abb. 1: Ursprünglich vorgesehener Streckenverlauf der Radschnellverbindung FRM1 von Frankfurt a.M. nach Darmstadt.

Die Machbarkeitsstudie sah vor, dass im Bereich von Dreieich die Streckenführung durch ein Streuobstgebiet sowie durch den Ortskern vom Ortsteil Dreieich-Sprendlingen führt. Nach Bearbeitung der Leistungsphasen 1 und 2 stellte sich die Streckenführung gemäß den Vorgaben einer Radschnellverbindung als nicht realisierbar dar.

Im Bereich der Streckenführung durch die Streuobstbestände mit vielen Eigentümern sowie durch die engen Straßen von Sprendlingen wären die Mindestvoraussetzungen für die Breite und die Parksituation auf langen Strecken nicht gegeben.

Deshalb wurde gemäß der Abb. 2 die Streckenführung geändert.

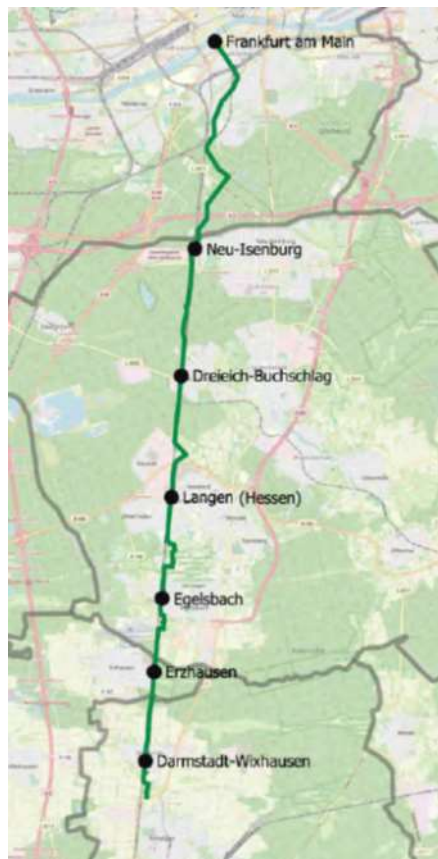


Abb. 2: Streckenabschnitte der geplanten Radschnellverbindung FRM 1.

Die Radschnellverbindung führt nunmehr auf der westlichen Seite entlang der Bahn, kreuzt die L3262 und wird über eine Spindel auf die L3117 geführt. Auf der Ostseite führt die Strecke dann gemäß der Machbarkeitsstudie weiter entlang der Bahnstrecke in den Stadtwald

Frankfurt/M. Im Bereich der Überführung der L3262 ist auch die Kreuzung der Radschnellverbindung FRM 9 von Seligenstadt zum Flughafen Rhein Main Frankfurt geplant.

Die neue Strecke reduziert sich damit auf ca. 25 km und verläuft innenstädtisch circa 10 und außerstädtisch circa 15 km. In den nicht besiedelten Außenbereichen gibt es keine Stromversorgung.

In einer Roadmap wurden Streckenabschnitte definiert für die Planung und deren Ausbau. Mittlerweile gibt es eine durchgehende ausgebaute Radstrecke zwischen der Wissenschaftsstadt Darmstadt und dem Bahnhof Langen. Die weiteren Abschnitte sind derzeit in Planung. Die Genehmigung der Streckenabschnitte erfolgt nach dem Erfordernis der jeweiligen notwendigen Genehmigungen im Bereich des Naturschutzes und Wasserschutzes sowie der Straßenverkehrsbehörde in den jeweiligen Kommunen.

Sowohl die Planungsleistung als auch der Ausbau und die Lieferung der Photovoltaikleuchten wurden öffentlich ausgeschrieben. Bis Dezember 2024 wurden auf der Strecke 167 Photovoltaikleuchten im nicht besiedelten Bereich eingebaut. Weitere 170 Leuchten sollen im Zuge der Fertigstellung der restlichen Strecke im nicht besiedelten Bereich eingebaut werden. Der Streckenausbau soll bis 2027 abgeschlossen sein.

5. Beleuchtung von Radschnellwegverbindungen

Dr. Klaus Petry, Nils Schreck

5.1. Vorgaben an die Beleuchtung

Die Beleuchtung von Radwegen ist auf Bundesebene gesetzlich nicht gefordert. In Hessen enthalten die Qualitätsstandards und Musterlösungen des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen (HMWEVW, 2020), die mit § 12 (4) NahMobG rechtlich verankert wurden, für einen Teil der Radverbindungen und insbesondere für Radschnellverbindungen entsprechende Vorgaben. Entsprechend § 12 (1) NahMobG sollen alle Teile des Radnetzes den Qualitätsstandards und Musterlösungen entsprechen. Es gibt darüber hinaus keine Beleuchtungspflicht für die Träger der Straßenbaulast (HStrG §9). Eine Beleuchtung am Fahrrad ist hingegen gesetzlich verankert (§67 StVZO) und alle Verkehrsteilnehmenden sind zur ständigen Vorsicht und Rücksicht und zu einer insbesondere auch an die Sichtverhältnisse angepassten Geschwindigkeit verpflichtet (§§ 1 und 3 der StVO).

Die erarbeiteten Qualitätsstandards und Musterlösungen für das Radnetz in Hessen (HMWEVW, 2020) sehen eine Beleuchtung von Radschnellverbindungen außer- sowie innerorts vor. Die DIN-Norm ist ein freiwilliger Standard zur technischen Vereinheitlichung, der hier angewendet wird.

Die Planung der Beleuchtung erfolgte nach der europäischen Straßenbeleuchtungsnorm DIN EN 13201-2 Klasse P5. Die Planung sieht eine 3.000 K (=warmweiß) Farbtemperatur und 6 m Lichtpunkthöhe vor. Hierbei wurden bei 40 m Lichtpunktabstand und 4 m Radwegbreite normenkonforme $E_m = 3 \text{ lx}$ Wartungswert der Beleuchtungsstärke bei einer Gleichmäßigkeit von $U_0 = 0,31$ errechnet. Die Schwellenwerterhöhung (das Maß der Blendung) wurde für die Radfahrenden mit 27,4 % bei maximal zulässigen 30 % errechnet. Je nach Bedingungen vor Ort ist die Planung jedoch gemäß einer höheren Beleuchtungsklasse auszuführen. Dies trifft vor allem dann zu, wenn der Radweg durch einen innerörtlichen Bereich führt. Hier sollte die

mittlere horizontale Beleuchtungsstärke nicht erheblich unter die Beleuchtungsstärke des jeweiligen Straßenabschnitts fallen.

5.2. Außerorts

Außerorts ist laut den erarbeiteten Qualitätsstandards und Musterlösungen für das Radnetz in Hessen (HMWEVW, 2020) eine Beleuchtung mit Beleuchtungsstärken zwischen 3 und 7 lx vorgesehen. Sind naturschutzfachliche Belange zu berücksichtigen wird eine dynamische Beleuchtung vorgeschlagen.

Im außerörtlichen Bereich gelten besondere Anforderungen an die Beleuchtung, da diese Gebiete oft unbewohnt und weniger beleuchtet sind. Die Beleuchtung soll Sicherheit gewährleisten, ohne die Umwelt stark zu belasten. Eine ausreichende Helligkeit und gleichmäßige Ausleuchtung sind wichtig, um Hindernisse und Kurven frühzeitig sichtbar zu machen und Blendungen sowie Schatten zu vermeiden. Um Blendung zu reduzieren, sollten Leuchten mit Blendschutz und gezielter Lichtlenkung eingesetzt werden. LED-Leuchten eignen sich besonders durch ihre Energieeffizienz und Langlebigkeit. Eine warmweiße Lichtfarbe (2.700–3.000 Kelvin) minimiert dabei mögliche Auswirkungen auf die Umwelt. Automatische Steuerungen wie Bewegungsmelder können in ländlichen Gebieten sinnvoll sein, um die Beleuchtung nur bei Bedarf zu aktivieren oder damit eine gedimmte Grundbeleuchtung in der Nacht bei Annäherung einer Person auf die volle Helligkeit umschalten kann. Zum Schutz vor Lichtverschmutzung sollten die Leuchten nach unten gerichtet und mit präziser Lichtlenkung ausgestattet sein, um Streulicht zu minimieren und die natürliche Dunkelheit der Umgebung zu bewahren.

5.3. Übergang in den innerörtlichen Bereich

Beim Übergang vom außerörtlichen in den innerörtlichen Bereich sind Anpassungen möglich, um den Lichtwechsel für Radfahrer angenehm zu gestalten und die Umgebung nicht unnötig zu belasten. Ein sanfter Lichtübergang verhindert eine plötzliche Blendung, indem die

Beleuchtungsstärke allmählich ansteigt. Die Beleuchtung im Übergangsbereich sollte an das innerörtliche Niveau angepasst werden, sodass Lichtfarbe und Helligkeit harmonisch und gut sichtbar wirken. Um die Aufmerksamkeit von Radfahrerenden auf den Wechsel in den innerörtlichen Bereich zu lenken, können Bodenmarkierungen oder farbige Leuchtelemente eingesetzt werden, was die Orientierung und Sicherheit erhöht. Da sich der Übergangsbereich oft in Straßennähe befindet, sollte die Beleuchtung so gestaltet sein, dass der Straßenverkehr nicht geblendet wird.

5.4. Innerorts

Im innerörtlichen Bereich spielt die Beleuchtung eine wesentliche Rolle für die Verkehrssicherheit und das Sicherheitsgefühl von Radfahrenden. Die Beleuchtung des Radwegs sollte in das städtische Beleuchtungssystem integriert sein, um ein einheitliches und harmonisches Stadtbild zu schaffen. Idealerweise muss das vorhandene städtische Beleuchtungssystem nicht angepasst werden um die neu entstandene Situation ausreichend zu beleuchten. Wird eine eigene Beleuchtungsanlage benötigt, so muss diese so gestaltet sein, dass sie Anwohner und andere Verkehrsteilnehmende nicht blendet. Energieeffiziente, langlebige und wartungsarme LED-Technologie ist sinnvoll, da diese Bereiche häufig und langfristig genutzt werden. Eine klare, gut abgestimmte Beleuchtung verbessert die Wahrnehmung des Radwegs, reduziert Unfallrisiken und stärkt das allgemeine Sicherheitsgefühl im Stadtgebiet. In den erarbeiteten Qualitätsstandards und Musterlösungen für das Radnetz Hessen (HMWEVW, 2020) sind innerorts Beleuchtungsstärken von 3 – 7 lx vorgesehen.

5.5. Einsatz von Photovoltaikbeleuchtung außerorts ohne externe Stromversorgung

Die Farbtemperatur von 3000 K stellt ein Optimum zwischen der Energie- bzw. Beleuchtungseffizienz der Solarleuchte und den Lichtimmissionen auf die Flora und Fauna dar. Auf der Versuchsstrecke wurde Im Bereich des Stadtwaldhauses aufgrund der Nutzung

von Solarleuchten in einem Waldgebiet als beleuchtungsschwächere P6-Klasse geplant. Dies führt dazu, dass ein Wartungswert von 3 lx als Planungsgrundlage angenommen wurde. Um einen sicheren Betrieb der Solarleuchten direkt im Stadtwald zu gewährleisten, wurde für die Versuchsstrecke am Stadtwaldhaus das Beleuchtungsstärkeniveau ohne Gleichmäßigkeitsverlust auf 2 lx abgesenkt. Zudem besitzen die acht verbauten Solarleuchten eine Hybrid-Einspeisung. Sollte die Akkuspannung durch zu wenig Sonne bzw. durch zu viel Energieentnahme für Beleuchtung zu stark absinken, so wird über das parallellaufende Straßenbeleuchtungsnetz kontrolliert (=gezählt) Energie nachgeladen. Da auf der Teststrecke zwei verschiedene Leuchtentypen mit jeweils vier und acht Solarmodulen verwendet werden, wird die nachgeladene Energie für jeden Leuchtentyp separat erfasst. Auf Grund der Schaltung vor Ort kann jedoch nicht jede Leuchte einzeln protokolliert werden, sondern nur die jeweilige Vierer-Gruppe.

Die restlichen Solarleuchten, welche auf der Radschnellverbindung verbaut werden, arbeiten autark und sind mit einem 36Ah-Akku ausgestattet, welcher mindestens einen Betrieb für eine Woche ohne Sonneneinstrahlung garantiert. Im September 2022 wurde die Teststrecke in der Nähe des Stadtwaldhauses im Frankfurter Stadtwald auf der Kuhpfadschneise auf Amber-LEDs mit einer Lichtfarbe von 2.200 K umgerüstet. Wie allgemein bekannt ist besitzen heutige LEDs mit einer niedrigeren Lichtfarbe eine geringere Effizienz. So besitzen LEDs mit einer Lichtfarbe von 2.200 K in Relation zu LEDs mit einer Lichtfarbe von 3000K Stand heute eine ca. um 20 % niedrigere Lichtausbeute pro Leistungseinheit (lm/W). Bei gleichbleibendem Beleuchtungsniveau würde mit den Amber-LEDs der Stromverbrauch ansteigen und somit die Laufzeit sinken. Für eine Straßenbeleuchtung, welche auf Solarenergie basiert, ist eine der wichtigsten Eigenschaften die Verfügbarkeit. Aus diesem Grund wurde das Beleuchtungsniveau bei gleichbleibender Gleichmäßigkeit und Verfügbarkeit um ca. 20 % gesenkt. Mit den, auf Amber-LEDs umgerüsteten Solarleuchten wird bei einer Gleichmäßigkeit von 0,21 eine mittlere Beleuchtungsstärke von 1,9 lx erreicht. Die mit einem Spektrometer

gemessene Farbtemperatur liegt mit 2.130 K im Toleranzbereich der Herstellerangabe von 2.200 K.

5.6. Messergebnisse

Zunächst wurde bei der Inbetriebnahme der Beleuchtung die spektrale Verteilung messtechnisch überprüft.

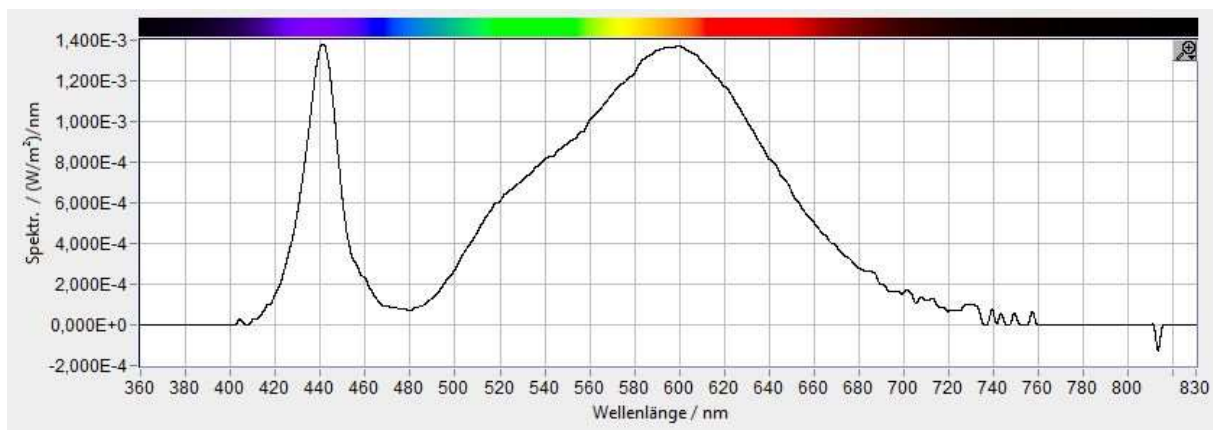


Abb. 3: Spektrale Verteilung der Solarleuchte mit 3.000 K.

Die gemessene Farbtemperatur der Leuchten liegt bei den Messungen zwischen 3.099 K und 3.133 K, was mit Berücksichtigung des Messfehlers den angegeben 3.000 K entspricht. Eine beispielhafte Messung ist in Abb. 3 zu sehen.

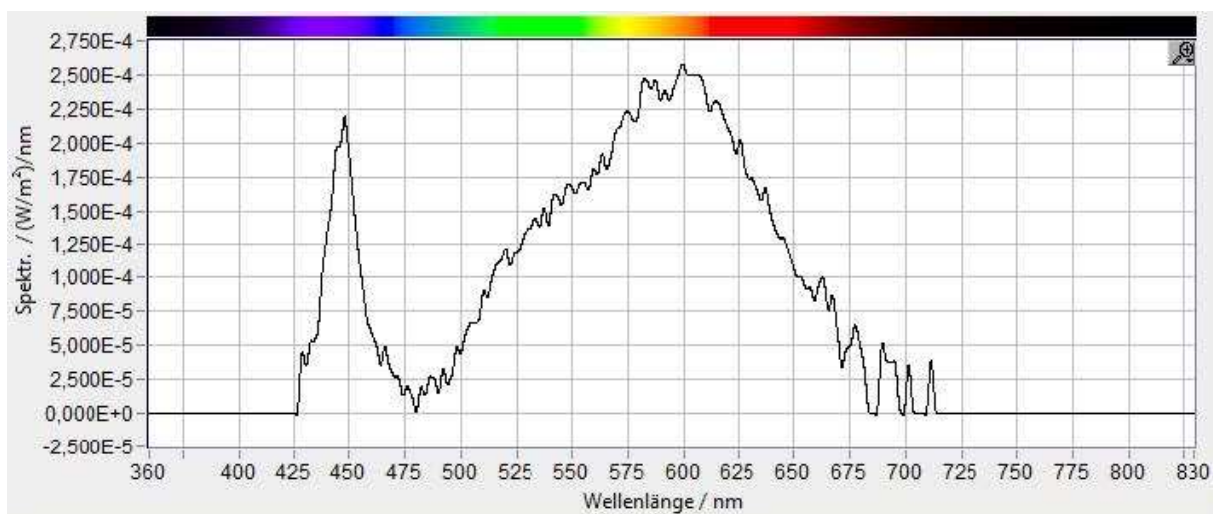


Abb. 4: Spektrale Verteilung der Solarleuchte mit 2.200 K.

Nach dem Umbau wurde mit einem Spektrometer eine Farbtemperatur von 2.130 K gemessen und liegt damit im Toleranzbereich der Herstellerangabe von 2.200 K, zu sehen in Abb. 4.

Beleuchtungsstärkemessungen

Die Messungen am Stadtwaldhaus, dargestellt in Tab. 1 und Tab. 2, zeigen insgesamt konstante Ergebnisse. Geringe Abweichungen sind auf die variierende Vegetationsdichte im Randbereich sowie auf Schwankungen der Umgebungstemperatur zurückzuführen. Die Messergebnisse im ersten Bauabschnitt setzen sich aus den Ergebnissen der Teststrecken 1a und 1b zusammen. Für 1a wurde eine mittlere Horizontalbeleuchtungsstärke von 4,4 lx bei einer Gleichmäßigkeit von 0,25 gemessen. Bei einem konservativen Wartungsfaktor von 0,8 ergibt sich ein Wartungswert der Beleuchtungsstärke von 3,5 lx. Die Ergebnisse der Messungen auf der Teststrecke 1b werden durch Tab. 3 aufgezeigt. Die Diskrepanz der Messergebnisse vom 28.07.2021 und 07.09.2021 lässt sich dadurch erklären, dass während des Testbetriebs das Beleuchtungsstärkeniveau der Verbindungsstrecke Erzhausen-Wixhausen an das niedrigere Niveau der Teststrecke am Stadtwaldhaus angepasst wurde. Unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit stimmen die Ergebnisse der Leuchten der ersten und letzten Messung im Normalbetrieb überein. Tab. 4 zeigt den Verlauf der Messungen im zweiten Bauabschnitt zwischen Langen-Egelsbach. Schwankungen der Messerergebnisse lassen sich auf Messungenauigkeiten zurückführen.

Tab. 1: Beleuchtungsstärkemesswerte der Teststrecke am Stadtwaldhaus.

Messdatum	13.07.20	16.11.20	20.05.21	28.07.21	10.09.21	17.11.21	12.07.22
E_m (lx)	2,4	2,3	2,3	2,3	2,4	2,3	2,1
E_{min} (lx)	0,7	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4
E_{max} (lx)	6,9	6,9	6,9	6,8	6,9	7,2	6,7
Wartungswert	1,9	1,8	1,8	1,8	1,9	1,8	1,7
Gleichmäßigkeit g_1	0,22	0,21	0,26	0,26	0,24	0,26	0,19

Tab. 2: Fortsetzung Beleuchtungsstärkemesswerte der Teststrecke am Stadtwaldhaus.

Messdatum	02.03.23	02.09.24
E_m (lx)	1,9	2,0
E_{min} (lx)	0,5	0,4
E_{max} (lx)	5,4	5,8
Wartungswert	1,5	1,6
Gleichmäßigkeit g_1	0,26	0,19

Tab. 3: Beleuchtungsstärkemesswerte der Versuchsstrecken 1b im ersten Bauabschnitt zwischen Erzhausen und Wixhausen.

Messdatum	20.05.21	28.07.21	21.09.21	17.11.21
E_m (lx)	3,8	2,5	2,4	3,7
E_{min} (lx)	1,0	0,5	0,5	0,8
E_{max} (lx)	11,3	9,9	9,8	11,0
Wartungswert	3,0	2,0	1,9	2,9
Gleichmäßigkeit g_1	0,28	0,22	0,20	0,23

Tab. 4: Beleuchtungsstärkemesswerte der Versuchsstrecke 2a im zweiten Bauabschnitt zwischen Langen und Egelsbach.

Messdatum	02.03.23	20.08.24
E_m (lx)	4,1	4,5
E_{min} (lx)	0,6	0,8
E_{max} (lx)	13,4	13,8
Wartungswert	3,3	3,6
Gleichmäßigkeit g_1	0,14	0,19

Im Rahmen der Messungenauigkeit stimmt das Ergebnis der Leuchten im Normalbetrieb auf der Strecke zwischen Langen und Egelsbach mit den Ergebnissen der Planung überein.

Leuchtdichtemessung

Gemäß DIN 13201-2 für Straßenbeleuchtung wurde der Radschnellweg in die Beleuchtungsklasse P5 eingeordnet. Die folgenden Ergebnisse zeigen, dass die installierte Beleuchtung, entsprechend der Vergleichstabelle in DIN 13201-1, je nach Asphalttyp im besten Fall die Anforderungen der Klasse P3 erfüllen könnten, allerdings mindestens die

Klasse P5 erfüllen. Im Stadtwald wurde die Beleuchtung aufgrund von Energiemanagementmaßnahmen und der Nutzung von Solarstrom in einer bewaldeten Umgebung auf die Klasse P6 ausgelegt. Die gemessenen Leuchtdichtewerte entsprechen den Anforderungen der Beleuchtungsklasse. Im Stadtwald liegen die Werte jedoch, bedingt durch das geringere Beleuchtungsniveau sowie den alten und stark abgenutzten Asphalt, um den Faktor 3 unter denen der anderen Teststrecken.

Blendungsmessung

Laut der Straßenverkehrsnorm DIN EN 13201 dürfen im Sichtfeld des Verkehrsteilnehmers keine blendenden Lichtquellen vorhanden sein. Das Sichtfeld eines Verkehrsteilnehmers ist im Allgemeinen mit einem Winkelbereich von $\pm 20^\circ$ um den Mittelpunkt des Sichtfeldes definiert. Als das Sichtfeld wird die Sicht entlang der Straßen verstanden, um das Fahrzeug sicher navigieren zu können. Die maximale Schwellenwerterhöhung wird in der DIN 13201 auf einen maximalen TI-Wert von 15 % begrenzt. Der Beobachterstandort befindet sich jeweils am Beginn der jeweiligen Teststrecke in Fahrtrichtung blickend. Es wurden kein grenzwertüberschreitender Wert der Schwellenwerterhöhung an der ausgewählten Messposition ermittelt, wobei ein maximaler TI-Wert von 6 gemessen wurde.

Die Ergebnisse der Leuchtdichtekamera sind in den nachfolgenden Abb. 5 bis Abb. 12 aufgeführt:

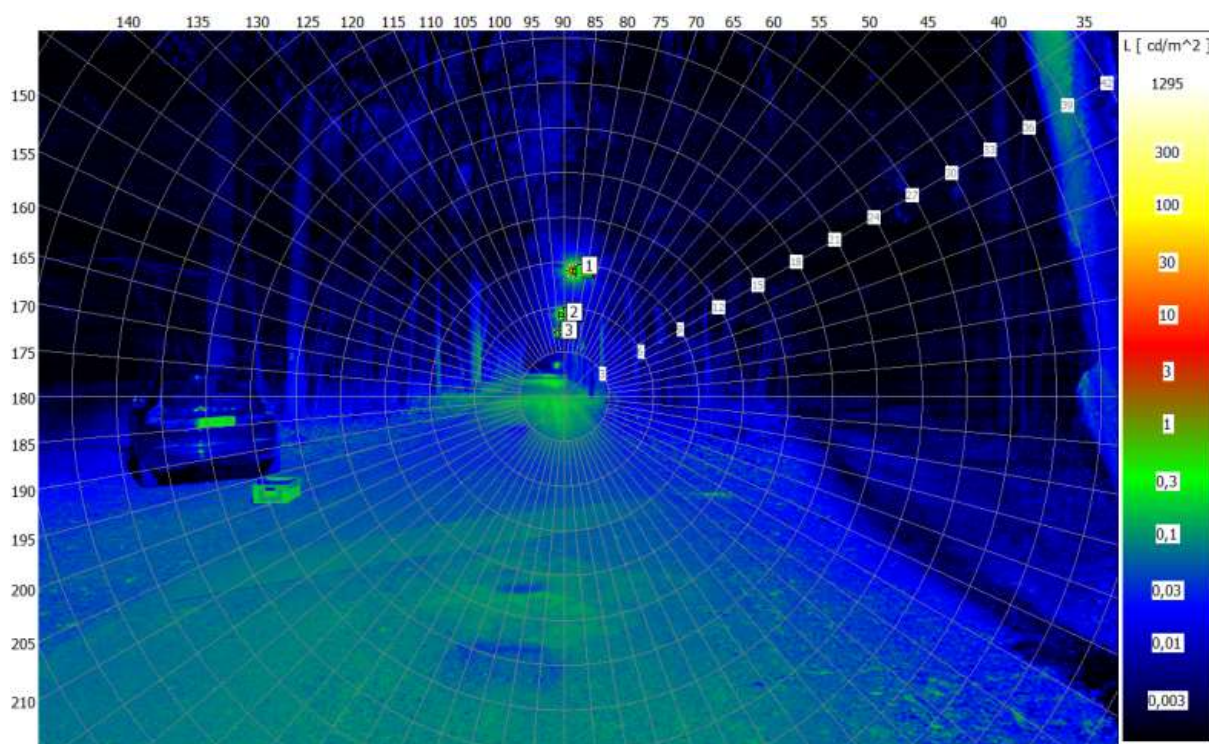


Abb. 5: Leuchtdichteaufnahme von Messpunkt Stadtwaldhaus 2023.

<u>Leuchte 1</u>	Mittlere Leuchtdichte 17,22 cd/m²	Fläche 2,53E-04	Winkel 8,4	Schleierleuchtdichte 0,000603
<u>Leuchte 2</u>	Mittlere Leuchtdichte 36,34 cd/m²	Fläche 7,07E-05	Winkel 5,5	Schleierleuchtdichte 0,000848
<u>Leuchte 3</u>	Mittlere Leuchtdichte 8,53 cd/m²	Fläche 3,88E-05	Winkel 4,3	Schleierleuchtdichte 0,000179
	Fahrbahnleuchtdichte 0,12 cd/m²		Alter 23	
				TI-Wert 1

Abb. 6: Ergebnisse der Leuchtdichteauswertung samt Berechnung des TI-Wertes, angegeben in Prozent, von Messpunkt Stadtwaldhaus 2023.

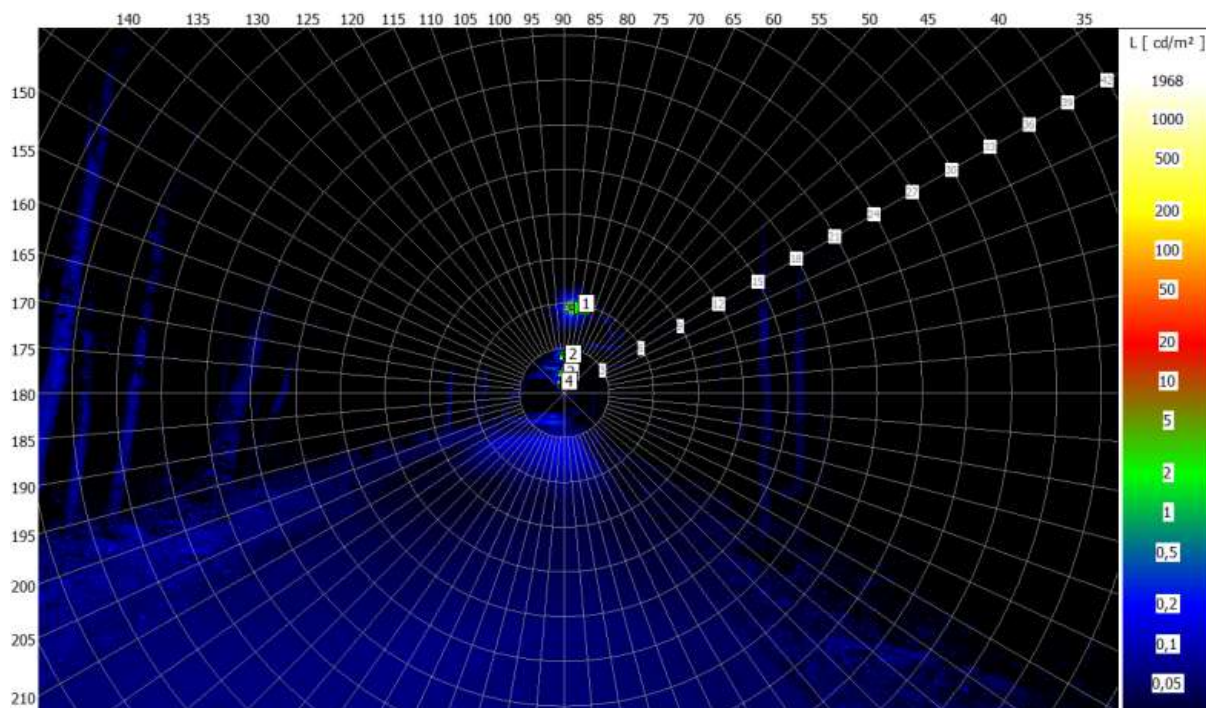


Abb. 7: Leuchtdichteaufnahme von Messpunkt Stadtwaldhaus 2024.

<u>Leuchte 1</u>	Mittlere Leuchtdichte 17,22 cd/m²	Fläche 2,53E-04	Winkel 8,4	Schleierleuchtdichte 0,000603
<u>Leuchte 2</u>	Mittlere Leuchtdichte 36,34 cd/m²	Fläche 7,07E-05	Winkel 5,5	Schleierleuchtdichte 0,000848
<u>Leuchte 3</u>	Mittlere Leuchtdichte 8,53 cd/m²	Fläche 3,88E-05	Winkel 4,3	Schleierleuchtdichte 0,000179
	Fahrbahnleuchtdichte 0,12 cd/m²		Alter 23	
				TI-Wert 1

Abb. 8: Ergebnisse der Leuchtdichteauswertung samt Berechnung des TI-Wertes, angegeben in Prozent, von Messpunkt Stadtwaldhaus 2024.

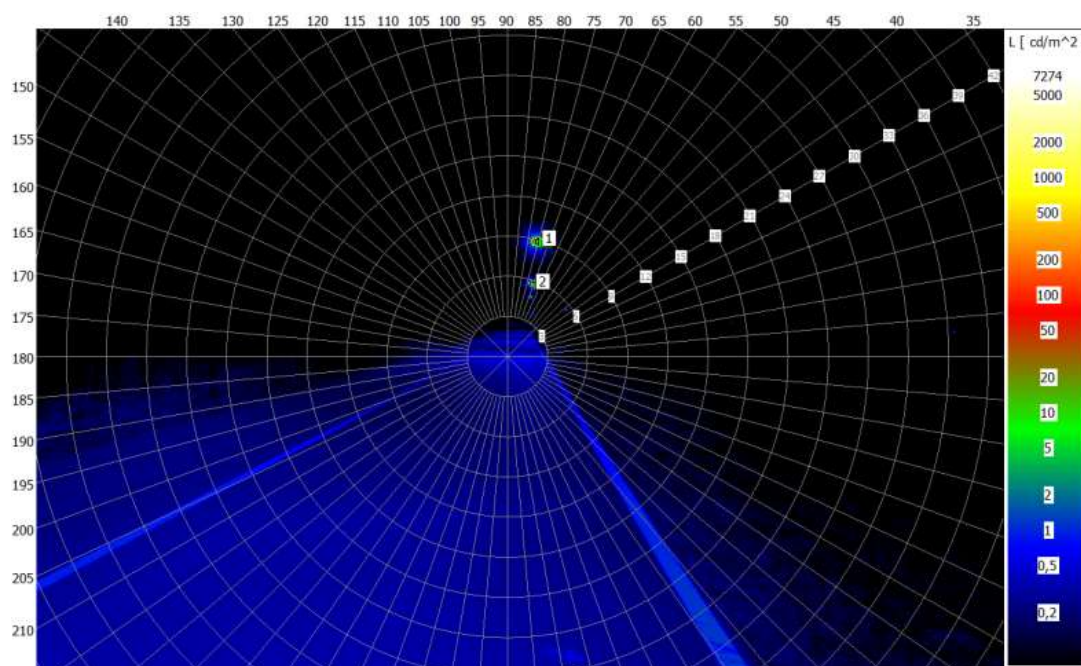


Abb. 9: Leuchtdichteaufnahme von Messpunkt Langen-Egelsbach 2023.

<u>Leuchte 1</u>	Mittlere Leuchtdichte 241,2 cd/m²	Fläche 1,47E-04	Winkel 8,8	Schleierleuchtdichte 0,004415
<u>Leuchte 2</u>	Mittlere Leuchtdichte 68,82 cd/m²	Fläche 4,43E-05	Winkel 5,7	Schleierleuchtdichte 0,000921
	Fahrbahnleuchtdichte 0,36 cd/m²		Alter 23	
				TI-Wert 1

Abb. 10: Ergebnisse der Leuchtdichtebewertung samt Berechnung des TI-Wertes, angegeben in Prozent, von Messpunkt Langen-Egelsbach 2023.

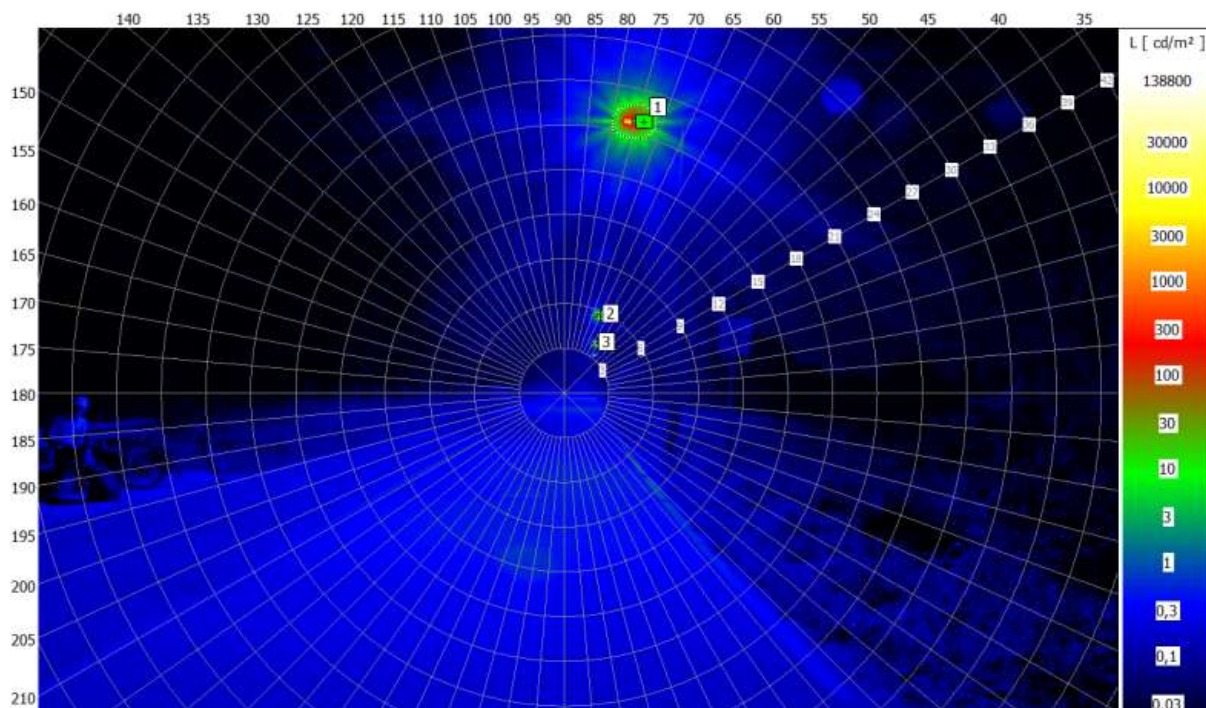


Abb. 11: Leuchtdichteaufnahme von Messpunkt Langen-Egelsbach 2024.

<u>Leuchte 1</u>	Mittlere Leuchtdichte 648,80 cd/m²	Fläche 1,62E-03	Winkel 18,82	Schleierleuchtdichte 0,026592
<u>Leuchte 2</u>	Mittlere Leuchtdichte 266,70 cd/m²	Fläche 5,77E-05	Winkel 5,678	Schleierleuchtdichte 0,004723
<u>Leuchte 3</u>	Mittlere Leuchtdichte 107,90 cd/m²	Fläche 3,01E-05	Winkel 6,8	Schleierleuchtdichte 0,000692
	Fahrbahnleuchtdichte 0,3684 cd/m²		Alter 23	
				TI-Wert 5

Abb. 12: Ergebnisse der Leuchtdichteauswertung samt Berechnung des TI-Wertes, angegeben in Prozent, von Messpunkt Langen-Egelsbach 2024.

Nutzerfrequenz

Teststrecke 1b (Erzhausen-Wixhausen)

Zeitgleich zu den Probennahmen des Instituts für Tierökologie und Naturbildung wurden mit 2 Datenloggern, die an ausgewählten Leuchten am Mast hinten den Fangkörben montiert waren, die Beleuchtungsstärke über die Zeit mit protokolliert. Für die Nacht vom 13.Mai 2021 (Christi Himmelfahrt) auf den 14. Mai ergibt sich folgendes Bild (Abb. 13):

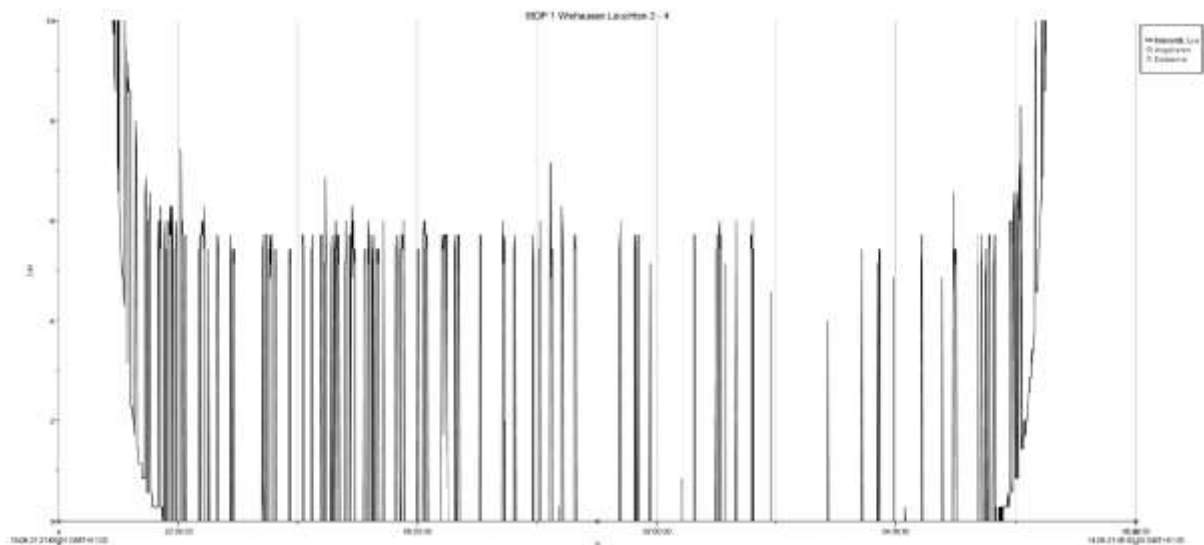


Abb. 13: Auslösung des Bewegungsmelders (Nutzerfrequenz) in der Nacht vom 13.05.2021 auf den 14.05.2021.

In dieser Nacht werden ca. 108 Auslösungen (=Bewegungen durch Radfahrer etc.) für den Bereich Erzhausen-Wixhausen (Leuchten 1–4) ausgewertet.

Teststrecke 2a (Langen-Egelsbach)

Auf der Teststrecke am Stadtwaldhaus wurde zeitgleich zu den Probennahmen des Instituts für Tierökologie und Naturbildung, mit vier Datenloggern, welche an ausgewählten Leuchten am Mast hinter den Fangkörben montiert waren, die Beleuchtungsstärke über die Zeit mit protokolliert. Für die Versuchsperiode 3 vom 25.07.2022 bis zum 03.08.2022 wurden die Leuchten jeden Tag umprogrammiert: Erster Tag: Bewegungsorientiert, zweiter Tag: Dauer AN, dritter Tag: Dauer AUS, usw. bis Tag 9. Für alle neun Tage ergibt sich für die Nutzerfrequenz an Leuchte 4 folgendes Bild auf der Folgeseite als Abb. 14. In der Nacht vom 25.07.2022 auf den 26.07.2022 werden ca. 120 Auslösungen (=Bewegungen durch Radfahrer etc.) für den Bereich Langen (Leuchte 4) ausgewertet (Abb. 15). Drei Nächte später wurden ca. 108 Bewegungen (Abb. 16) und am 31.07.2022 ca. 98 Bewegungen registriert (Abb. 17).

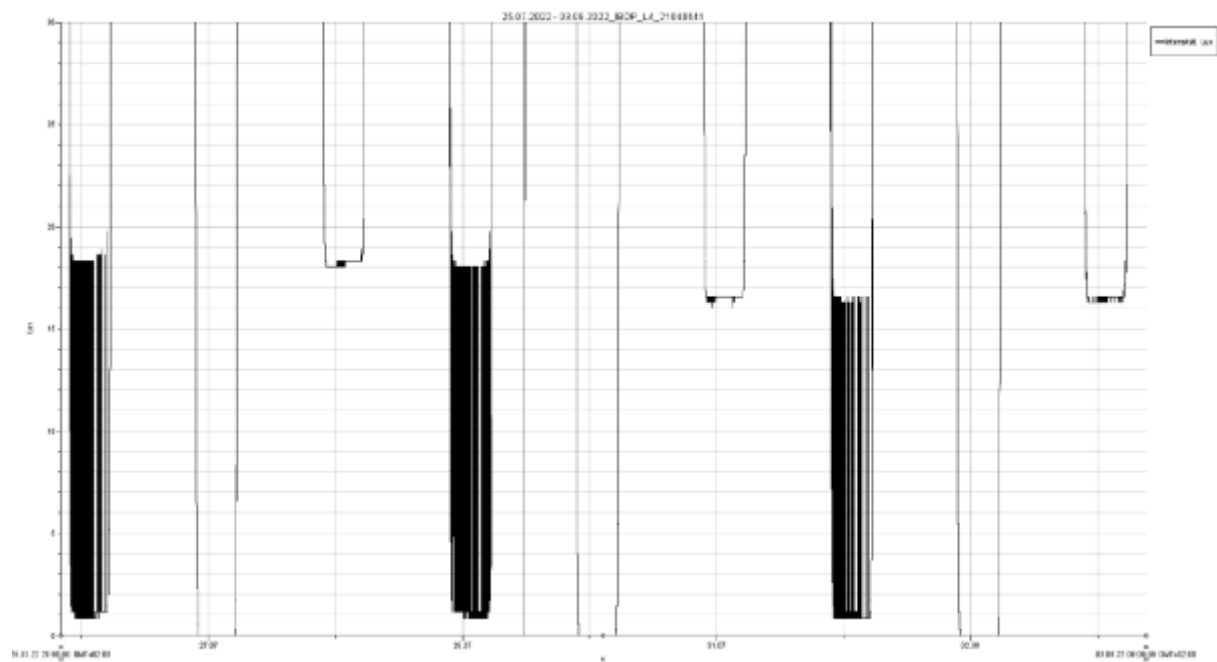


Abb. 14: Auslösung des Bewegungsmelders (Nutzerfrequenz) Leuchte 4 Versuchsperiode 3 (25.07.2022–03.08.2022).

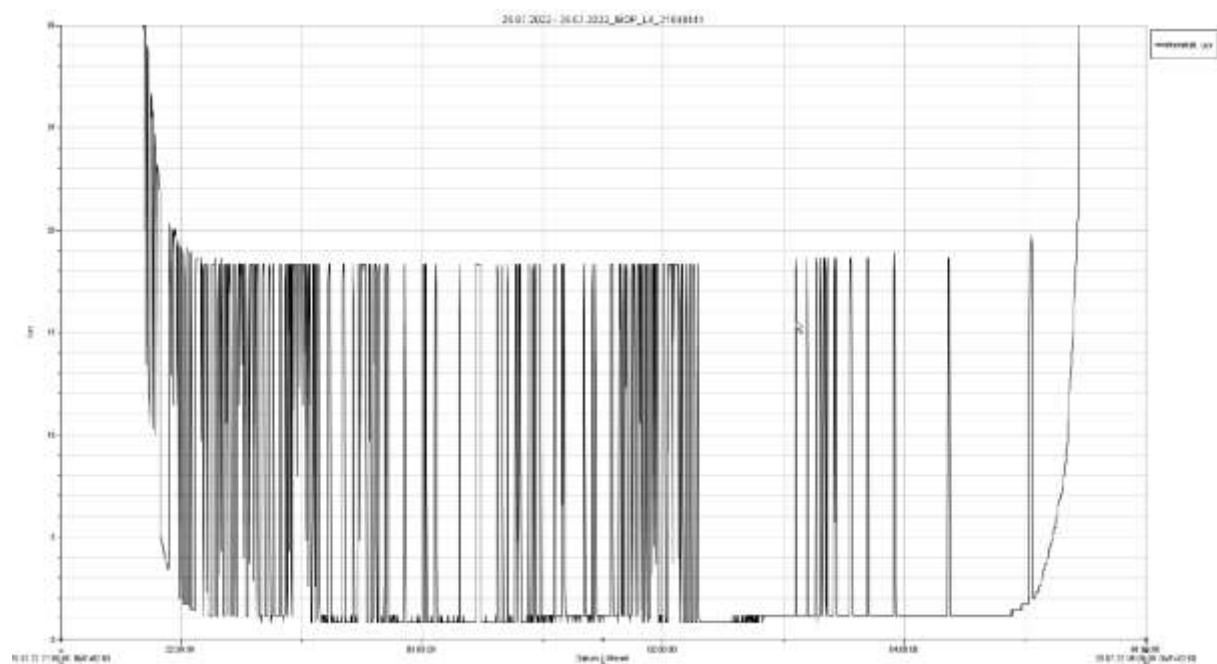


Abb. 15: Auslösung des Bewegungsmelders (Nutzerfrequenz) Leuchte 4 Versuchsperiode 3 (25.07.2022–26.07.2022).

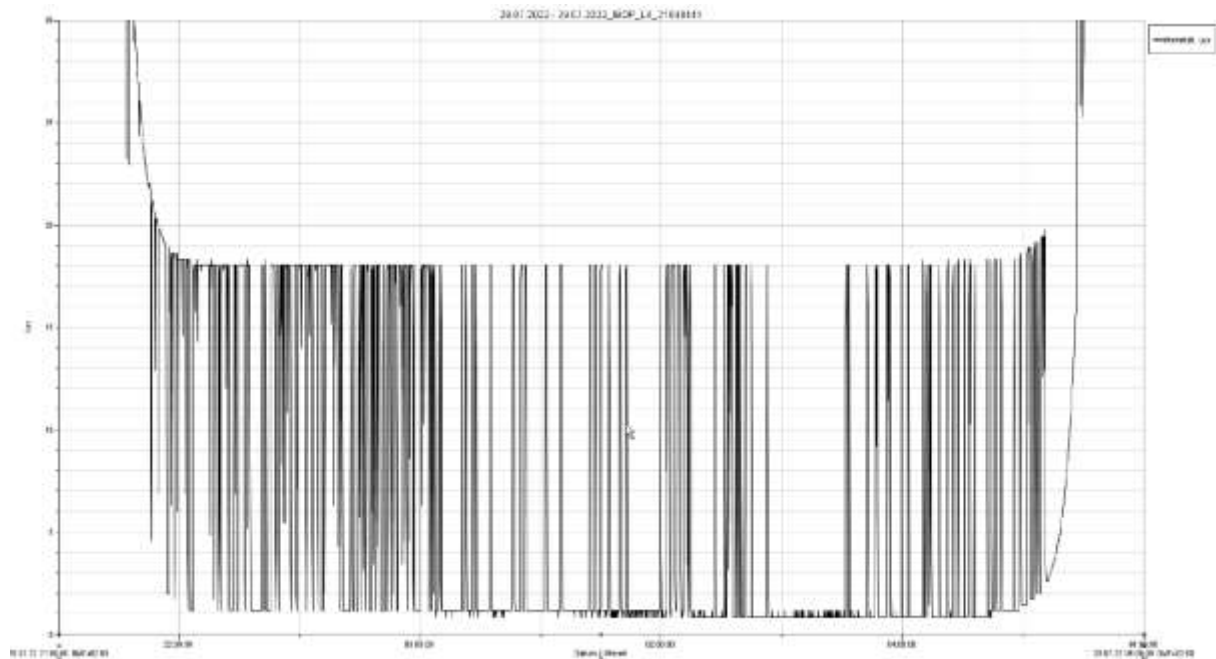


Abb. 16: Auslösung des Bewegungsmelders (Nutzerfrequenz) Leuchte 4 Versuchsperiode 3 (28.07.2022–29.07.2022).

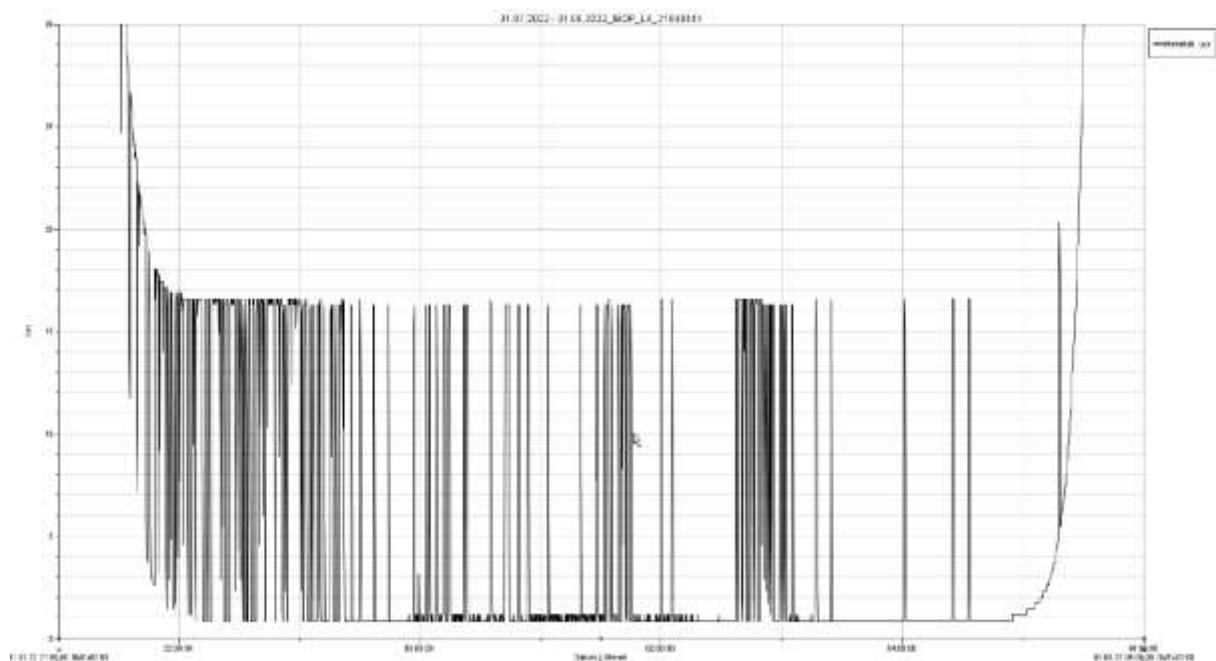


Abb. 17: Auslösung des Bewegungsmelders (Nutzerfrequenz) Leuchte 4 Versuchsperiode 3 (31.07.2022–01.08.2022).

Akkuleistung-Solareinstrahlung

Die Stromzähler der Leuchten werden monatlich abgelesen. Für die Teststrecke im Stadtwaldhaus wurde zwischen der Ablesung vom 02.09.2021 und dem 01.10.2021 auf dem

Zähler ein Anstieg der bezogenen Leistung von 3,64 kWh für die einfach bestückten Leuchten protokolliert. Dies ist der Nachweis, dass die Leuchten ihren Akku über das angeschlossene Spannungskabel aufgeladen haben. Da aber die ersten drei Leuchten für die Versuchsdurchführung vom Institut für Tierökologie und Naturbildung auf Dauer-Ein während der Dunkelstunden programmiert waren (Abb. 18), wurde seit Mitte Mai weniger Solarenergie gespeichert als nachts abgegeben. Die Akkus wurden systematisch belastet und hatten immer weniger Kapazität. Dies erklärt auch die Tatsache, dass am 28.07.2021 vom Mess-Team des IBDP die ersten drei Leuchten als „ausgeschaltet“ protokolliert wurden. Bei einer zweiten Messung am 11.08.2021 funktionierten die ersten drei Leuchten wieder. Offensichtlich war in der Zwischenzeit der Sonneneintrag so groß, dass die Leuchten nicht in der Schutzschaltung (also AUS) waren, sondern im Normalbetrieb.

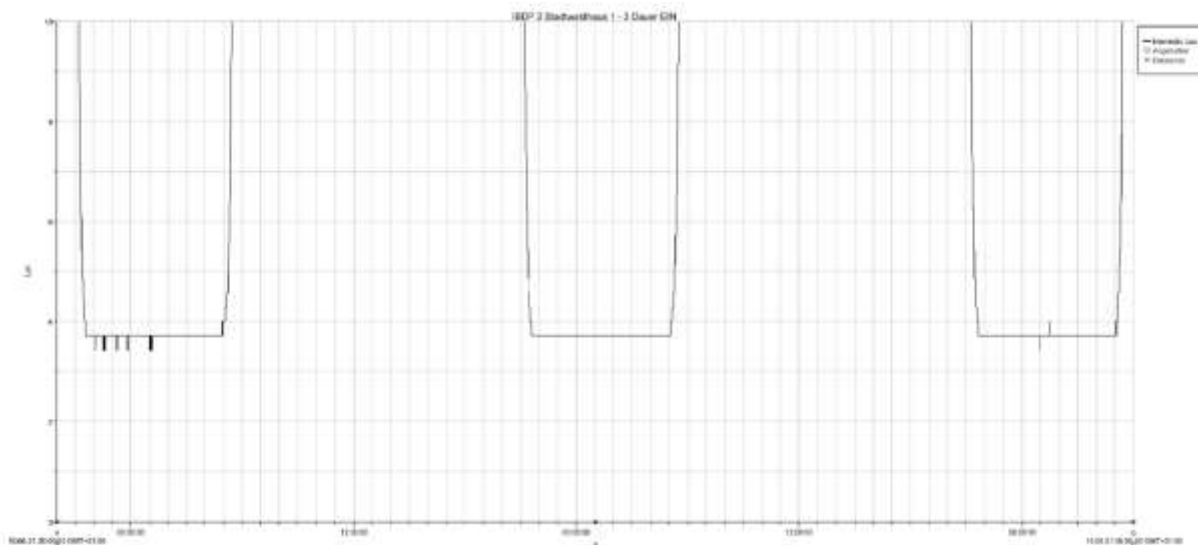


Abb. 18: Protokollierung Dauer-EIN Stadtwaldhaus Leuchten 1–3 vom 12.05.2021 bis zum 15.05.2021. Im gesamten Jahr 2022 für die ersten vier Solarleuchten ein Verbrauch von 0,6 kWh protokolliert. Diese Leistung liegt im Bereich des Eigenverbrauchs des elektronischen Zählers. Für die zweiten vier Leuchten wurde im gleichen Zeitraum 2022 ein Verbrauch von 1,7 kWh gemessen. Erhöhte Verluste des Zählers und der Kabelwege sowie der Umschalteneinheiten erklären den höheren Stromverbrauch. Eine Nachladung im größeren Stil ist nicht erfolgt bzw. wenn, dann nur singulär und für eine Leuchte.

Für die Radschnellverbindung generell wurde die Betriebszeit der Solarleuchten analog zum Nachtflugverbot auf dem Flughafen Frankfurt auf die Dunkelstunden bis 23:00 Uhr und nach 05:00 Uhr festgelegt. Dabei wird eine Bewegung per Radarmelder detektiert und die Beleuchtung bedarfsorientiert nur für die Verweildauer eingeschaltet. Ohne Personendetektion leuchten (glimmen) die Solarleuchten minimal, um eine optische Wegeföhrung zu gewährenleisten aber ohne den Weg zu beleuchten. Unter diesen Bedingungen ist in den Jahren 2021 bis 2024 bei den übrigen Testleuchten am Stadtwaldhaus und im Offenlandbereich Erzhausen-Wixhausen und Langen kein Ausfall aufgrund zu geringer Solareinstrahlung aufgetreten.

Schaltzeiten der Beleuchtung und Sicherheitsgeföhl der Nutzer

Durch eine radarbasierte Bewegungserkennung von Personen, Zweirädern und Fahrzeugen wird die Beleuchtung mit integrierter Dimm- Steuerung und Funkvernetzung bei Bewegungserkennung hochgedimmt und nach ca. 30 s wieder herabgedimmt, sofern keine neue Bewegung erkannt wird. Aus Energiespargründen wird auf der Versuchsstrecke im Wald am Stadtwaldhaus bei Bewegungserkennung nur eine weitere Leuchte in Laufrichtung per Funk aktiviert (=eingeschaltet bzw. auf ca. 2 lx hochgefahren). Bei keiner Bewegungserkennung sind die Leuchten komplett ausgeschaltet. In den Offenland-Abschnitten in Langen und zwischen Egelsbach und Darmstadt werden zwei weitere Leuchten auf ca. 3 lx hochgefahren. Alle Leuchten auf der Strecke glimmen (leuchten) mit minimaler Intensität und ermöglichen so dem menschlichen Auge eine optische Föhrung.

Die im Dezember 2021 erschienene Publikation „Beleuchtung und Kriminalität“ der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft verifiziert die Planungs- und Schaltungsgrundlagen der Radschnellverbindung:

„In Bezug auf adaptiv gesteuerte Beleuchtungsanlagen sollten im Fall einer Personendetektion die Leuchten, welche sich in direkter Umgebung dieser Person befinden, den höchsten Lichtstrom aufweisen. Dies betrifft alle Leuchten in einem Abschnitt von mindestens 30 Metern

und es sollte sich dabei um mindestens zwei Leuchten handeln. Des Weiteren sollten die übrigen Leuchten nach jetzigem Wissen nicht ganz ausgeschaltet sein und einen möglichst weiten und zusammenhängenden Überblick gewährleisten.“

Die in dieser Veröffentlichung aufgeführte mittlere Beleuchtungsstärke von 4 lx für ein „ausreichendes“ Sicherheitsgefühl basiert auf Untersuchungen im innerstädtischen Bereich und wird mit 3,8 lx auf der Strecke Langen-Egelsbach nahezu erreicht. Auf der Strecke im Wald am Stadtwaldhaus wird mit einer mittleren Beleuchtungsstärke von 1,9 lx bis 2,4 lx diese nicht ganz erreicht. Außerhalb geschlossener Ortschaften kann auf Grund der geringeren Umfeldhelligkeit ein niedrigeres Beleuchtungsstärkeniveau als ausreichend empfunden werden.

5.7. Ergebnisse der Funktionalität der Beleuchtung

Die Planung der gesamten Radschnellweg-Beleuchtung erfolgte nach der europäischen Straßenbeleuchtungsnorm DIN EN 13201-2 Klasse P5. Für das ausgewählte Solarleuchten-Fabrikat mit der Lichtfarbe warmweiß 3.000 K wurden bei 40 m Lichtpunktabstand und 4 m Radwegbreite normenkonforme 3 lx Wartungswert der Beleuchtungsstärke bei einer Gleichmäßigkeit von 0,31 errechnet. Diese Werte wurden durch mehrere Messungen bestätigt. Für die Versuchsreihen des Instituts für Tierökologie und Naturbildung 2021 und 2022 wurden einige Leuchten bewusst auf Dauer-EIN umprogrammiert. Auf Grund der Lage am Wald und der von Mai bis Anfang August 2021 herrschenden Witterung war die Sonneneinstrahlung für einen durchgehenden Nachtbetrieb von ca. 22:00–06:00 Uhr mit 100 % Lichtstrom nicht ausreichend. Da für die Radschnellverbindung die Betriebszeit der Solarleuchten auf die Dunkelstunden bis 23:00 und nach 05:00 Uhr generell festgelegt wurde und die Beleuchtung mittels Radarsensoren bedarfsorientiert nur für die Verweildauer eingeschaltet wird, wurde in den Jahren 2021 bis 2024 bei den übrigen Testleuchten am Stadtwaldhaus und im Offenlandbereich Langen-Erzhausen-Wixhausen kein Ausfall aufgrund zu geringer Solareinstrahlung protokolliert. Auf der Versuchsstrecke im Wald am

Stadtwaldhaus wurde 2022 die Lichtfarbe der Leuchten (= die LED-Baugruppe) von warmweiß 3.000 K auf Amber 2.200 K umgestellt. Auf Grund der geringeren Lichtausbeute reduziert sich die Beleuchtungsstärke auf 2 lx bei annähernd gleicher elektrischer Leistung und unveränderter, normenkonformen Gleichmäßigkeit von 0,26. Die Ergebnisse der Leuchtdichtemessung zeigen, dass die installierte Beleuchtung gemäß DIN 13201-1 je nach Asphaltbeschaffenheit die Anforderungen der Klasse P3 und mindestens der Klasse P5 erfüllt. Am Stadtwaldhaus werden die Anforderungen ebenfalls erreicht; jedoch führen der stark abgenutzte Asphalt und das geringere Beleuchtungsniveau zu um den Faktor 3 niedrigeren Leuchtdichtewerten im Vergleich zu den anderen Teststrecken. Die für die Blendung der Verkehrsteilnehmer in der DIN 13201 festgelegte maximale Schwellenwerterhöhung wird nicht erreicht. Da die Beleuchtung im Stadtwald erfolgreich gemäß der P6-Klasse im Rahmen der Energiemanagement-Maßnahmen umgesetzt wurde, wäre es sinnvoll, zu prüfen, ob eine Umsetzung auf P5-Niveau in Zukunft ebenfalls realisierbar ist. Momentan gibt es auf dem Markt noch keine Amber-LED's mit entsprechender Lichtausbeute, die einen wirtschaftlichen Betrieb der Leuchte auf P5-Niveau ermöglichen. Der Stromverbrauch zur Erzeugung der P5-Beleuchtungsstärke würde den Akku sehr (zu) stark langfristig belasten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren die LED-Technik weiter fortschreiten wird, sodass statt der Amber-Beleuchtung auch eine warmweiße Beleuchtung mit höherer Lichtintensität auf P5-Niveau erzielt werden kann.

Durch die adaptive LED-Beleuchtung wird die Lichtverschmutzung in den Zeiten ohne Radverkehr auf nahezu null reduziert. Letztlich entsteht eine, durch die Lichtplanung minimierte Lichtverschmutzung durch die LED-Beleuchtung nur zu solchen Zeiten, in welchen sie auch durch Radverkehr genutzt wird.

6. Auswirkungen einer Beleuchtung außerorts auf Fledermäuse

Elena Krannich und Markus Dietz

Im Folgenden wird der Einfluss künstlichen Lichts im Allgemeinen und im speziellen im Projektgebiet auf Fledermäuse und deren Beute (Insekten) auf Grundlage gezielter Untersuchungen analysiert und erläutert.

6.1. Wissenschaftlicher Kenntnisstand

Lichtverschmutzung ist eine durch Menschen verursachte Störung der nächtlichen Umwelt infolge des Einsatzes von künstlichem Licht. Der natürliche Wechsel von Helligkeit und Dunkelheit bedingt durch die Sonneneinstrahlung und der Rotation der Erde um sich selbst bestimmt die zeitliche Organisation aller Lebewesen auf der Erde. Diese haben sich über Jahrmillionen evolutionär daran angepasst und ihr Verhalten und ihre Lebenszyklen daran ausgerichtet.

Der Einsatz von künstlichem Licht in der Nacht (ALAN – artificial light at night) hat in den letzten Jahren durch die Entwicklung kostengünstiger, energieeffizienter Leuchtdioden (LED) stark zugenommen. Weltweit nimmt die Helligkeit in den eigentlichen Dunkelphasen der Nacht jährlich um 10 % zu (Kyba et al., 2023). Künstliches Licht verändert die Lichtintensität, die Terminierung und die Farbeigenschaften des natürlichen Lichts (Davies et al., 2013). Dies hat physiologische und verhaltensökologische Auswirkungen auf alle nahe der Oberfläche lebenden Organismen (Rich & Longcore, 2006). Künstliches Licht beeinflusst das Verhalten und die Orientierung, die Physiologie und die Rhythmik (diurnal und saisonal) von Tieren (Falcón et al., 2020).

6.1.1. Insekten

Für nachtaktive Organismen ist die Nacht ein wesentlicher Teil ihrer ökologischen Nische. Dazu zählen 60 % der Insekten, u.a. die nachtaktiven Falterarten. Sie sind wiederum in unterschiedlichen Anteilen Beute aller in Mitteleuropa vorkommenden Fledermausarten. Eine

Verhaltensveränderung oder Störung der Insekten kann somit auch zu Verhaltensveränderungen oder Störungen bei Fledermäusen führen. Die meisten nachtaktiven Insekten werden durch künstliche Lichtquellen wie z. B. von Straßenlampen angelockt und verbleiben dort (Altermatt et al., 2009; Perkin et al., 2014; Van Grunsven et al., 2014; Verovnik et al., 2015). Dadurch erfolgt eine räumliche Konzentration von Insekten, die wiederum im angrenzenden unbeleuchteten Raum fehlen („Licht-Anlockwirkung“ oder „Staubsauger-Effekt“, Eisenbeis, 2006; Verovnik et al., 2015). Dabei lockt kurzwelliges Licht mit einem hohen Anteil an UV- und blauen Spektralbereich Insekten am stärksten an (van Langevelde et al., 2011). Bei den zunehmend eingesetzten LED-Lampen für die Beleuchtung ist durch das breite Lichtspektrum auch der Anteil an blauen Wellenlängen hoch, sodass Insekten angelockt werden. Straßen- und andere Wegebeleuchtungen haben zudem als „Lichtkette“ eine Barrierewirkung, da die Insekten bei der Durchquerung aufgrund der engen Anordnung der Lampen (25–40 m Abstand) im Licht gefangen werden. Kunstlicht führt zu erhöhter Sterblichkeit bei Insekten, zum einen direkt durch die Hitze des Lichtes (nicht bei LED's), als auch indirekt durch Erschöpfung aufgrund des permanent Umkreisens der Lampe oder erhöhter Prädation durch Fledermäuse (Eisenbeis, 2006). Einige Nachtfalter können zwar mit Hilfe ihres Tympanalorgans die Echoortungsrufe von Fledermäusen erkennen und ausweichen. Diese Funktion wird aber durch Licht gestört, wodurch die Nachtfalter schneller gefressen werden (Wakefield et al., 2015). Weitere Einflüsse durch künstliches Licht sind eine Produktionsverringerung von Sexualpheromonen bei Nachtfaltern, womit das Paarungsverhalten und letztendlich die Populationsentwicklung beeinflusst werden können (Van Geffen, Groot, et al., 2015; Van Geffen, Van Eck, et al., 2015). Viele Insekten nutzen zudem in der Dunkelheit der Nacht den Mond und die Sterne als Orientierungshilfe. Werden diese durch künstliches Licht überstrahlt, wirkt sich dies negativ auf die räumliche Orientierung und Ausbreitung von Insekten aus, womit wieder eine räumliche Verschiebung der Insektenverteilung einhergeht (Kyba & Hölker, 2013). Schlussendlich kann dauerhaftes Kunstlicht die Aktivität nachtaktiver Insekten unterbinden (Williams, 1936), da das Kunstlicht

Tageslicht nachahmt. Lichtverschmutzung ist nachweislich ein Treiber des Insektensterbens (Grubisic et al., 2018).

6.1.2. Fledermäuse

In Deutschland kommen 25 Fledermausarten vor. Sie sind alle nachtaktive Insektenfresser und brauchen die Dunkelheit zum Überleben (Rydell & Speakman, 1995). Quartiere in Baumhöhlen oder an und in Gebäuden dienen tagsüber als Versteck, während Fledermäuse nachts auf Transferwegen zu ihren Jagdgebieten oder Trinkstellen fliegen (Dietz et al., 2007). In der insektenreichen Sommerzeit erfolgt die energieintensive Aufzucht der Jungtiere in sogenannten Wochenstubenkolonien. Dies sind matrilinear aufgebaute Sozialstrukturen von überwiegend reproduzierenden Weibchen. In dieser Zeit haben die Weibchen einen enorm hohen Energie- und damit Nahrungsbedarf. Fledermäuse sind hochmobil und haben im Verhältnis zu ihrer Körpergröße einen großen Aktionsradius, was den Energiebedarf weiter erhöht (Winter & Helversen, 1998; Currie et al., 2023). Jeder negative Einfluss auf den Jagderfolg, kann dementsprechend den Reproduktionserfolg und somit die Populationsentwicklung negativ beeinflussen.

Nach Auflösung der Kolonien im Spätsommer und Herbst findet die Paarung statt und die Tiere unternehmen Erkundungsflüge u.a. zu möglichen Winterquartieren. Diese suchen sie schließlich artspezifisch ab Mitte/Ende September auf, um die insektenarme Winterzeit ruhend verbringen (Horáček & Zima, 1978; Bauerová & Zima, 1988). Einige Arten migrieren dafür über weite Strecken zwischen verschiedenen Teilen Europas (Fischer, 1999; Petersons, 2004; Vasenkov et al., 2023).

In einer groben Einteilung können lichtsensitive Arten unterschieden werden von lichttoleranten Arten (Voigt et al., 2018). Aufgrund der bisher bekannten verschiedenen Reaktionen auf künstliches Licht, können Fledermäuse drei Verhaltensarten zeigen: lichtscheu, neutral und opportunistisch (Voigt et al., 2018). Dieses unterschiedliche Verhalten

beruht auf der Tatsache, dass die Dunkelheit den wichtigsten Schutz vor Fressfeinden bildet. Verlassen Fledermäuse diese Dunkelheit, z. B., um im Lichtschein der Straßenlaterne zu jagen, gehen sie ein höheres Prädationsrisiko ein. Durch die Anpassung an verschiedene Lebensräume, sind Fledermäuse in ihrer Morphologie, Echoorientierung und dem Verhalten unterschiedlich. Fledermäuse mit kurzen, breiten Flügeln fliegen langsam, aber sind sehr wendig und perfekt an die Jagd im hindernisreichen Raum, z. B. im Kronenbereich von Bäumen, angepasst. Diese Arten meiden aufgrund ihres langsamen Fluges künstliches Licht in jeglichen Situationen, um Fressfeinden zu entgehen, da das Risiko gefressen zu werden größer ist als der höhere Jagderfolg im Licht. Schnell fliegende Fledermausarten, mit langen, schmalen Flügeln, fliegen im offenen Luftraum und können an Straßenlaternen jagend beobachtet werden, da der höhere Jagderfolg aufgrund des erhöhten Insektenaufkommens am Licht das Risiko der Prädation überwiegt. Diese Arten verhalten sich während der Jagd opportunistisch gegenüber künstlichem Licht. Die in der vorliegenden Untersuchung auftretenden Arten und deren Reaktion auf künstliches Licht nach Voigt et al. (2018) sind in Kap.6.4 Tab. 6 aufgeführt.

Künstliches Licht hat Einfluss auf alle genannten Verhaltensweisen der Fledermäuse (Stone et al., 2015; Rowse et al., 2016).

Eine Beleuchtung in Quartieren oder von außen auf Quartiereingänge führt bei allen Fledermausarten zu massiven Störungen, was z.B. dazu führt, dass sie ihr Quartier erst später am Abend verlassen, wodurch sich die effektive Jagdzeit verkürzt (Downs et al., 2003; Boldogh et al., 2007) oder sie meiden ihr Quartier vollständig, weil ihr Sicherheitsbedürfnis gestört ist. Künstliches Licht beeinflusst ebenso Transferwege von Fledermäusen, z. B. Flugwege vom Quartier ins Jagdgebiet. Sie können als Barriere wirken, sodass Fledermäuse energieintensivere Umwege fliegen müssen oder das Ziel, z. B. eine Trinkstelle oder ein Nahrungshabitat meiden (Stone et al., 2009, 2015; Hale et al., 2015; Mathews et al., 2015).

6.1.3. Gesetzliche Grundlagen

Der „Schutz von Lebewesen vor Beleuchtung“ ist im am 08.06.2023 in Kraft getretenen Hessisches Gesetz zum Schutz der Natur und zur Pflege der Landschaft (HeNatG) verankert (§4 HeNatG): „Über § 1 Abs. 2 Nr. 1 und Abs. 3 Nr. 5 des Bundesnaturschutzgesetzes hinaus sollen Lichtemissionen grundsätzlich vermieden werden, um den ungestörten Wechsel von Aktivitäts- und Ruhephasen tag- und nachaktiver Arten zu unterstützen.“ Dies verpflichtet bei einer Planung vorrangig zu prüfen, ob eine Beleuchtung vermeidbar ist. Konkret wird dies in § 35 „Schutz von lichtempfindlichen Tier- und Pflanzenarten sowie Insekten“ definiert. Ist eine Beleuchtung nicht vermeidbar, sind das erforderliche Maß zu prüfen und die Beschränkungen auf die Bereiche, für die es bestimmt ist, umzusetzen (§ 35 Abs. 1 HeNatG). Nach § 35 Abs. 2 ist zudem die spektrale Zusammensetzung des Lichts so zu wählen, dass eine möglichst geringe Anlockwirkung nachtaktiver Tiere, insbesondere Insekten entfaltet wird, soweit die Anforderungen an die Verkehrssicherheit eingehalten sind.

Aufgrund der Bestimmungen des HeNatG § 4 und § 35 ist die Beleuchtung der Radschnellverbindung auf das erforderliche Minimum zu reduzieren. Dafür eignen sich Lampen mit bedarfsorientierter Funktionalität. Am FRM1 wurde Photovoltaiklampen vom Typ Merkur der Firma Photinus, Österreich installiert (für technische Daten siehe Kap. 5). Diese Lampen funktionieren bedarfsorientiert durch eine Radarsteuerung (im folgenden Bewegungsmelder = BM). D. h. sie leuchten nur dann, wenn ein Radfahrer oder eine andere mobile Person im Radarfeld auftaucht und gehen nach ca. 30 s wieder aus, wenn keine neue Person im Radarfeld auftaucht. Im Umfeld geht im Abschnitt Stadtwald eine weitere Lampe an und in den Abschnitten außerhalb des Stadtwaldes (Langen-Egelsbach, Erzhausen-Wixhausen) zwei weitere Lampen.

6.2. Fragestellung

Die hier untersuchte Trasse der geplanten Radschnellverbindung Frankfurt a.M. – Darmstadt gliedert sich in drei Abschnitte.

Der FRM 1 führt durch den Stadtwald Frankfurt und durch die Wälder südwestlich Neu-Isenburgs bis Langen, die für Fledermäuse wichtige Rückzugsorte im Stadtgebiet Frankfurts sind (Dietz & Mehl-Rouschal, 2007; ITN, 2013; Dietz et al., 2020). Südlich der Ortschaft Langen führt die Radschnellverbindung zum Teil durch strukturiertes Offenland, das durch Kleingärten, Baum- und Heckenreihen charakterisiert ist. Zwischen Egelsbach und Erzhausen führt der Radschnellweg zuerst entlang eines Waldrandes und durchquert anschließend Agrarland. Im Abschnitt südlich Erzhausen bis Darmstadt werden mit Ausnahme zweier Waldabschnitte vorwiegend Agrarlandflächen vom Radschnellweg durchquert.

Inwieweit sich die Beleuchtung der Radschnellverbindung auf die Aktivität der Fledermäuse auswirkt, wurde im Zeitraum von 2020 bis 2022 untersucht. Folgende Fragen sollten beantwortet und Empfehlungen erarbeitet werden:

1. Wie wirken sich verschiedene Beleuchtungsmodi (Lampen an, aus oder BM) Radschnellverbindungen auf die Fledermausaktivität aus?
2. Gibt es Art-/Rufgruppenspezifische Unterschiede?
3. Gibt es standortspezifische und saisonale Unterschiede in der Lichtwirkung?

6.3. Untersuchungsansatz

Die Untersuchung erstreckte sich über drei Jahre im Zeitraum von Juni 2020 bis September 2022. Dabei erfolgten die Erfassungen in der Reproduktionsphase der Fledermäuse und den Randzeiten von Mitte Mai bis Mitte September. Es wurden ausschließlich akustische Erfassungen der Fledermausultraschallrufe durchgeführt, um die Artendiversität und Fledermausaktivität an fertig gestellten Abschnitten des Radschnellweges und an einer Teststrecke, beide ausgestattet mit Photovoltaiklampen der Fa. Photinus, Österreich,

aufzunehmen. Die Methode der akustischen Erfassung ist im Vergleich zu anderen Erfassungsmethoden (z. B. dem Fang der Tiere) nicht-invasiv, flexibel zu gestalten und einfach in der Durchführung (sowohl in Bezug auf Material als auch Handhabung).

Für die akustische Erfassung von Fledermäusen durch die automatische Aufnahme ihrer Echoortungsrufe wurden hochauflösende bioakustische Messgeräte, so genannte Batcorder (Firma EcoObs) verwendet. Batcorder sind mit einem Ultraschalllaute aufnehmenden Mikrofon ausgestattet. Weiter beinhaltet das Gerät einen Vorverstärker, der diese Aufnahmen verstärkt, einen Bandpassfilter, der Frequenzen unterhalb von 15 kHz (für den Menschen hörbar) und oberhalb von 170 kHz (keine Fledermausrufe mehr) eliminiert und einen Verstärker, der die Rufe im Anschluss an die Filterung nochmals verstärkt. Die Rufsequenzen werden mit einer Endspannung von ca. 2,5 V und einer hohen Qualität (500 kHz und 16 bit) auf einer auswechselbaren Speicherkarte (hier: 32 GB SDHC-Karte), die in das Batcorder-Gehäuse integriert werden kann, gespeichert. Jede positive Erkennung eines Fledermausruf-ähnlichen Signals löst das Schreiben einer neuen, fortlaufend nummerierten Datei aus, die mit dem exakten Aufnahmezeitpunkt (Datum, Uhrzeit) gespeichert wird. Jeder Batcorder verfügt über einen Akku, der je nach Situation bis zu sieben Nächte hält. Die Einstellungen der Batcorder waren: threshold -36 dB, posttrigger 400 ms, quality 20, critical frequency 16 kHz.

Die Untersuchungsdesigns wurden iterativ weiterentwickelt und waren dadurch in den drei Untersuchungsjahren unterschiedlich (Übersicht Tab. 5).

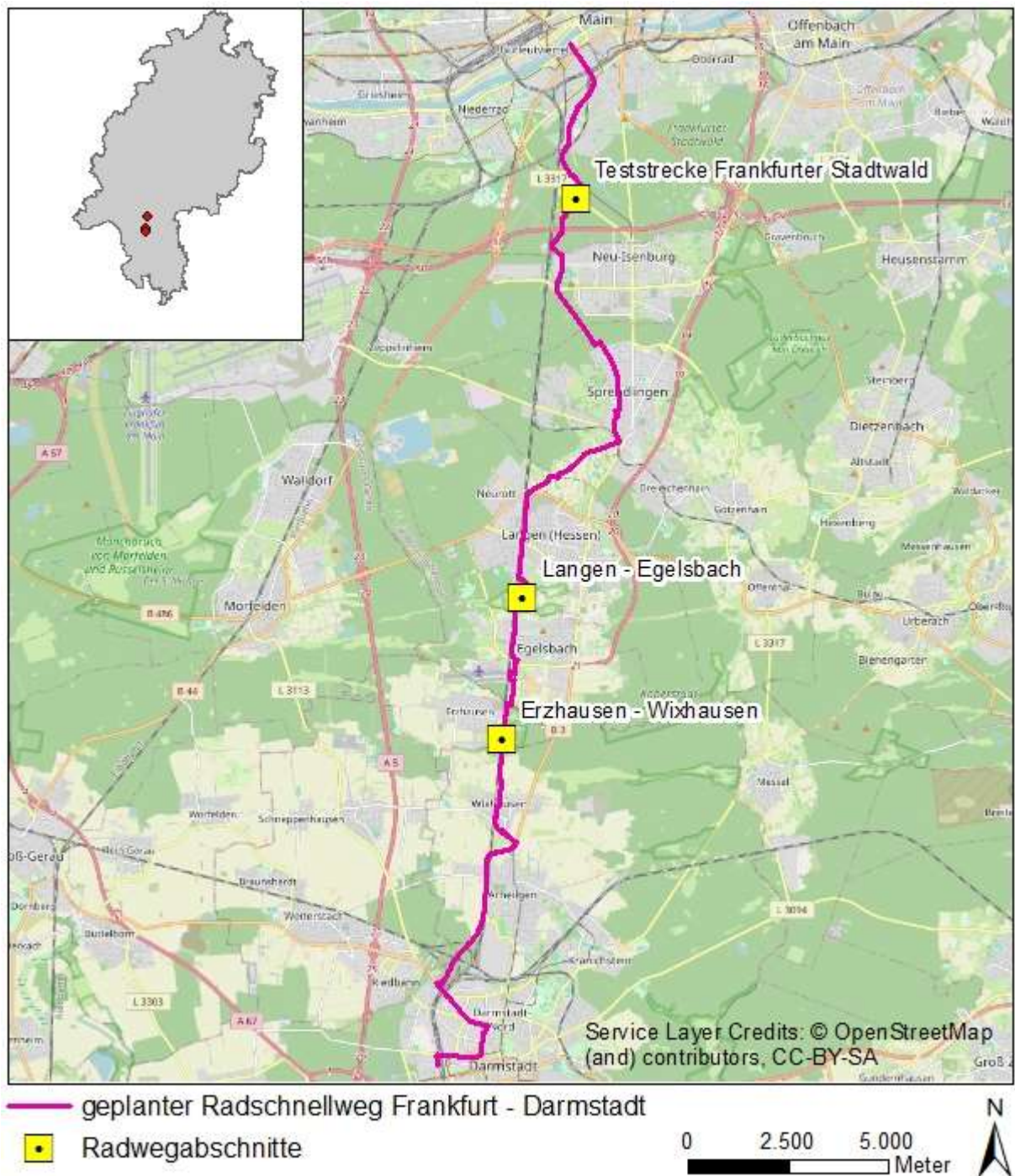


Abb. 19: Übersicht der ursprünglich geplanten Radschnellverbindung Frankfurt- Darmstadt und Lage der beprobten Abschnitte in den Jahren 2020 bis 2022. Stand 2021.

Untersuchungsjahr 2020

Im Jahr 2020 kamen acht Batcorder zum Einsatz. Diese wurden in vier Blöcken auf der Teststrecke im Frankfurter Stadtwald genutzt (Abb. 19). Die Teststrecke befindet sich im geschlossenen Wald, in dem die LED-Photovoltaiklampen der Firma Photinus getestet

wurden. Vier Batcorder wurden in direkter Nachbarschaft zu den Lampen und jeweils zwei Geräte in die Zwischenräume der Lampen bzw. außerhalb der Lampen installiert. Im ersten Block blieben die Lampen komplett aus, im zweiten Block blieben die Lampen komplett an. Im dritten und vierten Block wurden die Lampen bewegungsinduziert gesteuert, d. h. bei einer vorbeifahrenden (Fahrrad, Roller etc.) oder laufender Person gehen die Lampen an und verbleiben etwa 30 s an, wenn keine weitere Bewegung erfolgt.

Im Protokoll der Lampen wurde nicht die Leuchtdauer erfasst. Deswegen wurden in den folgenden Jahren die Lichtintensität ($\text{lux} = \text{lx}$) mit Dataloggern gemessen. Es wurden Datalogger der Firma Onset Computer Corporation (Hobo Pendant UA-002-64 und MX2202), die neben der Lichtintensität die Temperatur ($^{\circ}\text{C}$) messen, genutzt. Zusätzlich wurden zwei Datalogger des Typs Hobo MX1104, die zusätzlich die relative Luftfeuchte (%) messen, vom Ingenieurbüro Dr. Petry & Partner GmbH zur Verfügung gestellt. Durch die gemessene Lichtintensität konnte eine Leuchtdauer ermittelt werden.

Untersuchungsjahr 2021

Im Jahr 2021 erfolgten akustische Erfassungen mit insgesamt zwölf Batcordern, zwölf Dataloggern und zwölf Insektenfallen (Eklektoren) an zwölf Lampen im Bereich der Teststrecke im Stadtwald und im fertig gestellten Abschnitt des Radschnellweges zwischen Erzhausen und Wixhausen (Abb. 19). Dafür wurden drei Batcorder erneut entlang der Teststrecke im Frankfurter Stadtwald sowie drei Batcorder im angrenzenden geplanten Radschnellweg direkt an die Lampen installiert. Die Lampen im angrenzend geplanten Radschnellweg waren herkömmliche LED-Lampen (Fa. Schuch, Typ Koffer 46/L50, 3.000 K), die dauerhaft in der Nacht angeschaltet waren (Abb. 20 Mitte). Sechs weitere Batcorder wurden im bereits fertig gestellten Radschnellweg zwischen Erzhausen und Wixhausen an sechs Lampen (LED-Photovoltaiklampen der Fa. Photinus) installiert (Abb. 20 links). Je drei Standorte befanden sich am Waldrand und im Offenland (Verweis Karte). Zusätzlich wurden an allen beprobten Lampen je ein Datalogger zur Messung der Lichtintensität sowie eine

Eklektorfalle zum Insektenfang installiert. Die Installationen erfolgten in drei Blöcken. Dabei waren in jedem Block parallel Lampen an, aus oder im BM-Modus.

Untersuchungsjahr 2022

Im Jahr 2022 wurde ein dritter, ebenso fertig gestellter, Abschnitt des Radschnellweges, der zwischen Langen und Egelsbach liegt, untersucht (Abb. 19). Dieser Abschnitt führt durch Kleingartenanlagen und das Naturschutzgebiet „Kammereckswiesen und Herchwiesen“, das ein Teil des Natura-2000-Gebietes „Kammereckswiesen und Kirchnereckgraben von Langen“ ist (FFH-Gebiet 6017-305). Das Gebiet ist durch strukturreiches Offenland und Offenland charakterisiert. Hier wurden neun Batcorder und Datalogger an neun Lampen (LED-Photovoltaiklampen der Fa. Photinus) in insgesamt vier Blöcken installiert (Bsp. Abb. 20 rechts). In jedem Block wurden neun aufeinanderfolgende Nächte beprobt, in denen jeweils drei Nächte, alle beprobten Lampen an oder aus oder im BM-Modus waren.

Tab. 5: Designs der akustischen Erfassung in den Jahren 2020 bis 2022. Lichtmodi: an = Lampe durchgehend an; aus = Lampe durchgehend aus; BM = Bewegungsmelder.

Jahr	2020	2021	2022
Anzahl Aufnahmeblöcke	4 (je 7 Nächte)	3 (je 9 Nächte)	4 (je 9 Nächte)
Akustische Erfassung Fledermäuse	Ja	Ja	Ja
Erfassung Lichtintensität/ Temperatur	Nein	Ja	Ja
Erfassung Insekten	Nein	Ja	Nein
Anzahl Standorte (Geräte) je Block	8	12	9
Lichtmodus	An/aus/BM	An/aus/BM	An/aus/BM
Schaltung Lichtmodi	Je Block	Je Lampe	Je 3 Nächte
Ort	Teststrecke Frankfurter Stadtwald	Teststrecke Frankfurter Stadtwald Erzhausen-Wixhausen	Langen-Egelsbach
Habitat	Wald	Wald Offenland Waldrand	Offenland strukturiertes Offenland

Auswertung der Fledermausrufe

Zur Auswertung wurden die Aufnahmen mittels einer speziellen Erfassungs- und Verwaltungssoftware (bcAdmin 4.0, batIdent 1.0, bcAnalyze 2.0, Firma Ecoobs, ergänzt durch das Lautanalyseprogramm Batsound 3.1, Firma Pettersson) am PC analysiert. Trotz der Bestimmungsvorschläge des Programms batIdent wurde eine umfangreiche Stichprobe relevanter unmittelbar nachbestimmt, da die automatisierte Bestimmung qualitativ nicht sicher ist. Die Bestimmung der Fledermäuse anhand ihrer Sonogramme erfolgte unter Berücksichtigung der gängigen Werke (z.B. Russo & Jones, 2002; Siemers & Schnitzler, 2004; Schaub & Schnitzler, 2007; Skiba, 2009; LfU, 2020, 2022; Russ, 2021).

Die Rufe einiger Fledermausarten überlappen sich in ihren Rufmerkmalen und lassen sich somit allein anhand ihrer Ultraschalllaute nicht differenzieren. Die Fledermausrufe können anhand ihrer Rufmerkmale und entsprechenden ökologischen Anpassung zu drei funktionellen Lauttypen zusammengefasst, dem Myotis-, dem Pipistrellus- sowie dem Nyctaloiden Lauttyp. Zu den mitteleuropäischen Vertretern des Myotis-Lauttyps gehören die Arten der Gattung *Myotis*, die beiden Langohr-Arten *Plecotus auritus* und *P. austriacus* sowie die Mopsfledermaus *Barbastella barbastellus*. Der Pipistrellus-Lauttyp vereint die Gattung *Pipistrellus* mit den drei Arten *P. nathusii*, *P. pipistrellus* und *P. pygmaeus*, der Nyctaloide Lauttyp umfasst die Arten *Nyctalus leisleri*, *N. noctula*, *Eptesicus serotinus*, *E. nilssonii* sowie die Zweifarbfledermaus *Vespertilio murinus* (Höhne, 2011).

Die Eklektorfallen zum Insektenfang bestanden aus senkrecht angeordneten Plexiglasscheiben, an denen die Insekten abprallen und dann in ein darunter gehängtes mit Spiritus gefülltes Glas fallen (Fa. Bioform). Dieses wurde nach jedem Untersuchungsblock geleert, um ein phasenbezogenes Ergebnis der Insektenfauna für einen Standort zu erhalten. Anschließend wurden die gefangenen Insekten anhand ihrer Merkmale unter zu Hilfe Nutzung eines Binokulars nach Ordnungen sortiert und die Ergebnisse tabellarisch und grafisch dargestellt.

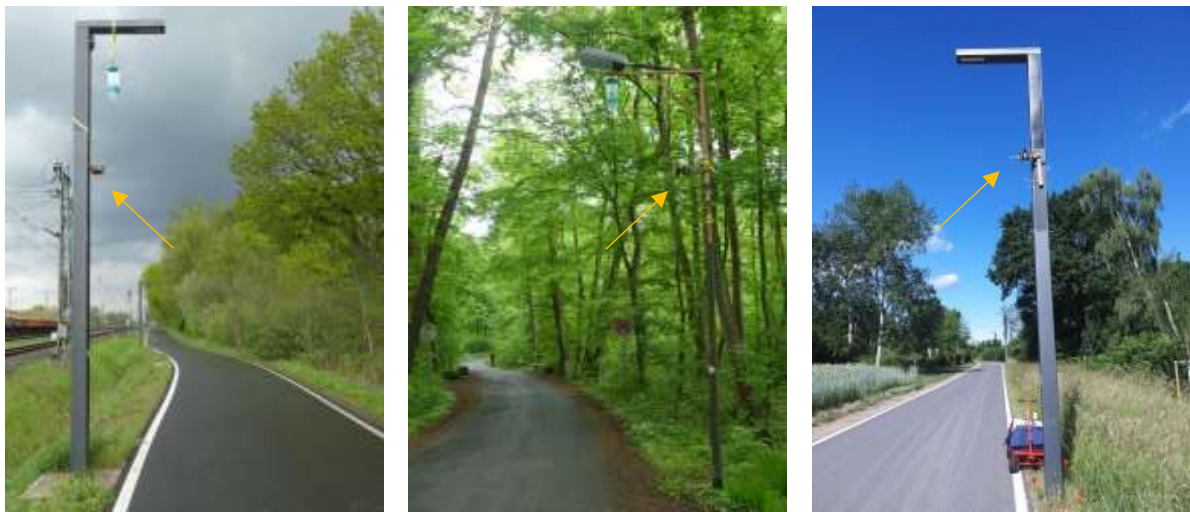


Abb. 20: Beprobte Lampen an der Radschnellverbindung Frankfurt-Darmstadt mit Installation eines Batcorders und Dataloggers sowie teilweise einer Eklektorfalle. Linkes und rechtes Bild: LED-Photovoltaiklampen der Fa. Photinus. Mittleres Bild: Herkömmliche LED-Lampe im Frankfurter Stadtwald.

Die Auswertungen der Messungen erfolgte durch verschiedene statistische Ansätze von grafischen Darstellungen (Boxplots) über einfache vergleichende Statistik (Kruskal-Wallis-Test) bis zu Modellberechnungen (GLMM = Generalized linear mixed effects models und GLM = generalized linear models), anhand derer eine Vorhersage der Fledermausaktivität in Abhängigkeit der Beleuchtung berechnet wird. Für alle Berechnungen wurde das frei verfügbare Programm R (Version 4.0.2, R Development Core Team 2020) genutzt. Die Aktivität der Fledermäuse wurde als abhängige Variable definiert (Aktive Minuten pro Nacht). Alle weiteren Merkmale der Untersuchungen wurden als mögliche erklärende Variablen herangezogen (z. B. Block, Habitat, Beleuchtungsmodus, Lichtintensität, Standort/Lampe, Leuchtdauer, Erfassungsdauer). Die genauen Vorgehensweisen sind in den jeweiligen Gutachten beschrieben (ITN , 2020, 2022, 2023). Die Daten aus 2020 wurden für den vorliegenden Abschlussbericht für eine bessere Vergleichbarkeit erneut in aktive Minuten pro Nachtstunde exportiert. Da Daten zur Leuchtdauer fehlten, erfolgte eine Auswertung auf nominaler Ebene (Licht aus, an, BM) mittels einfacher vergleichender Statistik (Varianzanalyse).

6.4. Ergebnisse

Entlang der fertiggestellten Abschnitte und der Teststrecke der Radschnellverbindung Frankfurt-Darmstadt wurden in den Jahren 2020 bis einschließlich 2022 insgesamt mindestens 14 verschiedene Arten bzw. Artenpaare der Fledermäuse nachgewiesen. Schutzstatus sowie Nachweisjahre sind Tab. 6 zu entnehmen. Die Artenpaare Brandt-/Bartfledermaus sowie Braunes und Graues Langohr sind akustisch nicht voneinander zu differenzieren (vgl. Kap. 6.3). Das Vorkommen jeweils beider Arten der Artenpaare ist wahrscheinlich (Malten et al., 2002; ITN, 2013, 2023), wodurch sich die Artenzahl auf 16 Fledermausarten erhöhen würde. Mehr als die Hälfte der aufgelisteten Fledermausarten reagieren „lichtscheu“, d. h. meiden Licht bei der Jagd. Zu den lichtscheuen Arten zählen alle Arten der Gattung *Myotis spec.* und *Plecotus spec.* sowie die Mopsfledermaus. Alle Arten der Gattungen *Pipistrellus spec.*, *Nyctalus spec.* und die Breitflügelfledermaus reagieren opportunistisch (Voigt et al., 2018). Der Erhaltungszustand der Fledermausarten für Hessen gilt für je sechs der nachgewiesenen Fledermausarten als günstig (Breitflügelfledermaus, Wasserfledermaus, Großes Mausohr, Fransenfledermaus, Zwergfledermaus, Braunes Langohr) bzw. als ungünstig - unzureichend (Bechsteinfledermaus, Brandtfledermaus, Bartfledermaus, Kleinabendsegler, Mückenfledermaus, Graues Langohr) und für die zwei Arten Mopsfledermaus und Abendsegler als ungünstig – schlecht (Tab. 6). Für die Fledermausarten Nymphenfledermaus und Rauhautfledermaus ist die Datenlage defizitär. Es kann kein Erhaltungszustand bestimmt werden. Als vom Aussterben in Hessen bedroht gelten zudem die Nymphenfledermaus, der Abendsegler und das Graue Langohr (Tab. 6). Acht weitere nachgewiesene Fledermausarten gelten als stark gefährdet sowie drei weitere als gefährdet. Für die Wasserfledermaus ist eine Gefährdung anzunehmen, für die Gefährdungsbeurteilung der Mückenfledermaus ist die Datenlage dieser zu defizitär.

Tab. 6: Nachgewiesene Fledermausarten an der Radschnellverbindung Frankfurt-Darmstadt und deren Reaktion auf Licht bei der Jagd sowie deren Schutzstatus.

Fledermausart		Schutzstatus					Nachweis		
Deutscher Name	Wissenschaftlicher Name	Erhaltungszustand	FFH	RL D	RL Hessen	Reaktion auf Licht bei der Jagd**	2020	2021	2022
Mopsfledermaus	<i>Barbastella barbastellus</i>	U2	II, IV	2	2	Lichtscheu			•
Breitflügelfledermaus	<i>Eptesicus serotinus</i>	G	IV	3	2	Opportunistisch	•	•	•
Nymphenfledermaus	<i>Myotis alcaethoe</i>	xx	IV	1	1	Lichtscheu		•	
Bechsteinfledermaus	<i>Myotis bechsteinii</i>	U1	II, IV	2	2	Lichtscheu		•	•
Brandt-/Bartfledermaus*	<i>Myotis brandtii/mystacinus</i> *	U1	IV	n	2	Lichtscheu	•	•	
		U1	IV	n	2	Lichtscheu			
Wasserfledermaus	<i>Myotis daubentonii</i>	G	IV	n	G	Lichtscheu	•	•	•
Großes Mausohr	<i>Myotis myotis</i>	G	II, IV	n	2	Lichtscheu	•	•	•
Fransenfledermaus	<i>Myotis nattereri</i>	G	IV	n	3	Lichtscheu	•	•	•
Kleinabendsegler	<i>Nyctalus leisleri</i>	U1	IV	D	2	Opportunistisch	•	•	•
Abendsegler	<i>Nyctalus noctula</i>	U2	IV	V	1	Opportunistisch	•	•	•
Rauhautfledermaus	<i>Pipistrellus nathusii</i>	xx	IV	n	2	Opportunistisch	•	•	•
Zwergfledermaus	<i>Pipistrellus pipistrellus</i>	G	IV	n	3	Opportunistisch	•	•	•
Mückenfledermaus	<i>Pipistrellus pygmaeus</i>	U1	IV	n	D	Opportunistisch	•	•	•
Langohrfledermaus, unbestimmt*	<i>Plecotus auritus/austriacus</i> *	G	IV	3	3	Lichtscheu	•	•	•
		U1	IV	1	1	Lichtscheu			

* = eine akustische Unterscheidung der jeweiligen Schwesterarten Brandtfledermaus/Bartfledermaus bzw. Langohrfledermäuse ist nicht möglich

** nach Voigt et al., 2018

• = Nachweis

Der Erhaltungszustand der Arten gilt für Hessen: G = günstig, U1 = ungünstig - unzureichend, U2 = ungünstig - schlecht, xx = Daten defizitär (HLNUG, 2019).

FFH = Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie, Anhänge II & IV (EU-Kommission, 1992).

Kategorien der Roten Listen: 1 - vom Aussterben bedroht, 2 - stark gefährdet, 3 - gefährdet, G - Gefährdung anzunehmen, D - Daten defizitär, V - Vorwarnliste, n - derzeit nicht gefährdet.

Angaben für Hessen nach Dietz et al. (2023), für Deutschland nach Meinig et al. (2009).

Im ersten Untersuchungsjahr 2020 wurden entlang der Teststrecke im Frankfurter Stadtwald insgesamt elf Fledermausarten bzw. -artenpaare nachgewiesen. Verteilt über vier Aufnahmeblöcke von Anfang Juni bis Anfang September wurden in 215 Gerätenächten 46.186 Aufnahmen mit Fledermausrufen erfasst. Die Aktivitäten der Fledermäuse waren dabei im September deutlich niedriger als in den Monaten zuvor, sodass für die Auswertungen nur die Aktivitäten der ersten drei Blöcke miteinander verglichen wurden. Unterschiedliche Aktivitäten in Abhängigkeit der Lichtmodi/Blöcke konnten für die Vertreter des Myotis-Lauttyps an einzelnen Standorten festgestellt werden (Abb. 21). Signifikante Unterschiede traten nur am Standort Z6_7 auf, dieser Standort liegt mittig zwischen der Lampe 6 und Lampe 7. Dort wurden im Block I (Lampen aus), signifikant mehr aktive Minuten pro Nacht der Vertreter des Myotis-Lauttyps erfasst als in den Blöcken II (Lampen an) und Block III (bewegungsinduzierte Beleuchtung) (Varianzanalyse, $p < 0,05$). Ein ähnliches Muster trat an den Standorten L7 (Lampe 7) und L8 (Lampe 8) auf. Im unbeleuchteten Block I waren die Aktivitäten an diesen Lampen signifikant höher als während der beiden folgenden Blöcke mit Beleuchtung. An den A1 und A2 außerhalb der Teststrecke gab es keinerlei Beleuchtung. Nichtsdestotrotz treten hier Aktivitätsunterschiede auf. Die Aktivität war im letzten Block signifikant geringer als im ersten Block. Die Ergebnisse für die Vertreter des Nyctaloiden und des Pipistrellus-Lauttyps sind grafisch im Anhang dargestellt (Abb. 26, Abb. 27).

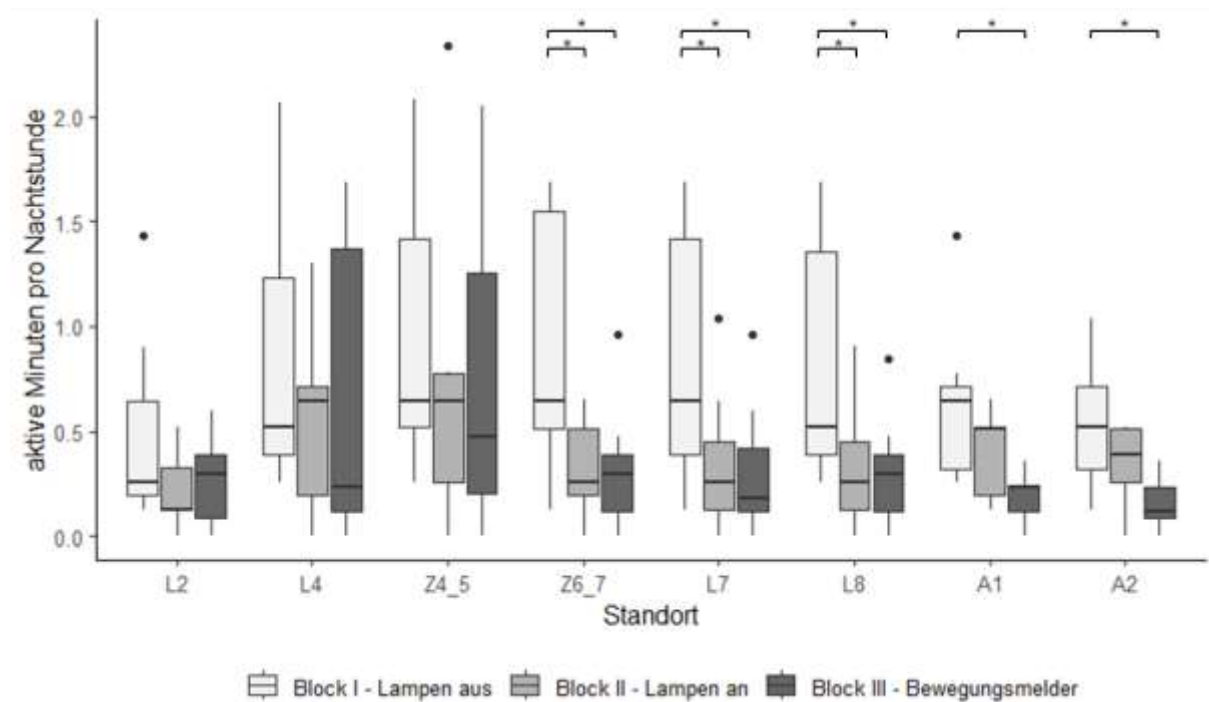


Abb. 21: Aktivitäten der Vertreter des Myotis-Lauttyps (alle Arten lichtscheu) an der Teststrecke im Frankfurter Stadtwald. L = Lampe; Z = Zwischen den Lampen; A = Außerhalb der Teststrecke.

Anhand des Lampenprotokolls konnte ein Aktivitätsmuster der Radfahrer und Fußgänger entlang der Teststrecke ermittelt werden. In der Zeit, in der Fledermäuse aktiv sind (etwa Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang) schalteten sich die Lampen v. a. in der Abenddämmerung ein, da zu dieser Zeit die meisten Bewegungen wahrgenommen wurden (Abb. 22). In der zweiten Nachthälfte wurden so gut wie keine Bewegungen registriert und somit kein Licht eingeschaltet.

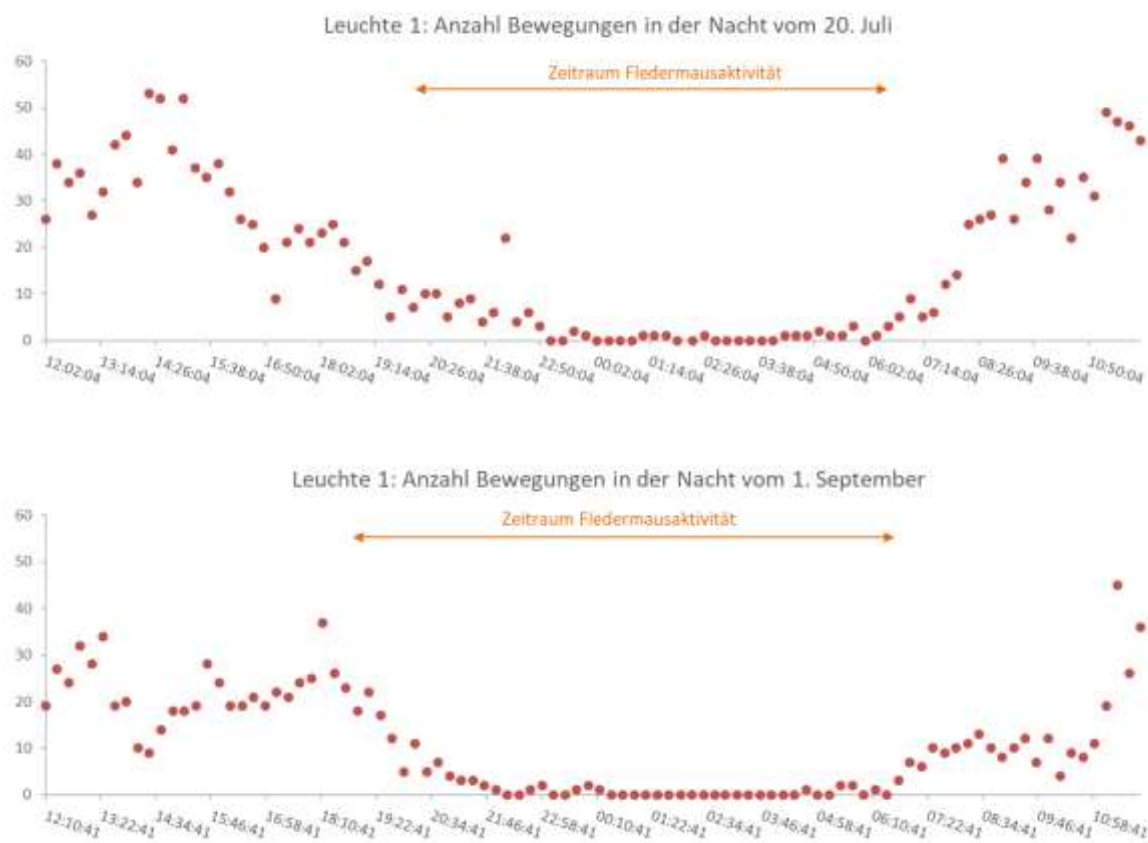


Abb. 22: Bei Lampe 1 registrierte Radfahrer/Fußgänger-Aktivitäten entlang der Teststrecke jeweils in einer Erfassungsnacht im Juli und September sowie der Zeitraum der Fledermausaktivität.

Im darauffolgendem Jahr 2021 wurden 13 Arten bzw. Artenpaare der Fledermäuse entlang in den Abschnitten der Teststrecke Frankfurter Stadtwald und Erzhausen-Wixhausen des Radschnellweges erfasst. Neben den bereits 2020 nachgewiesenen Arten wurden die Bechstein- und Nymphenfledermaus neu erfasst (beides lichtscheue Arten). Zusätzlich wurden 15 Gruppen von Gliedertieren (Insekten und Spinnen) durch die Eklektorfallen gefangen (Tab. 7 im Anhang). Mehr als die Hälfte der Insekten waren Käfer (66,4 %), gefolgt von Hautflüglern (16,2 %) und Zweiflüglern (14,5 %). Der Anteil der Schmetterlinge betrug 1 %, während die Anteile aller weiteren Gruppen weit weniger als 1 % ausmachten. In

Abb. 23 ist die Anzahl der gefangenen Insekten pro Lampe und Block (I, II, III) dargestellt. Die Gesamtanzahl der gefangenen Insekten nimmt im Laufe des Sommers, also pro Block zu, jedoch nur wenig an den Lampen im Offenland. Deutliche Zunahmen sind an den Lampen am Waldrand und im Wald zu erkennen. Die Lampen SW 1 bis SW 3 im Wald waren dauerhaft

an. Die Anzahl der gefangenen Insekten ist dort immer höher als an den übrigen Lampen im Wald SW 4 bis SW 6, unabhängig davon, ob diese aus, an oder bewegungsinduziert geschaltet waren.

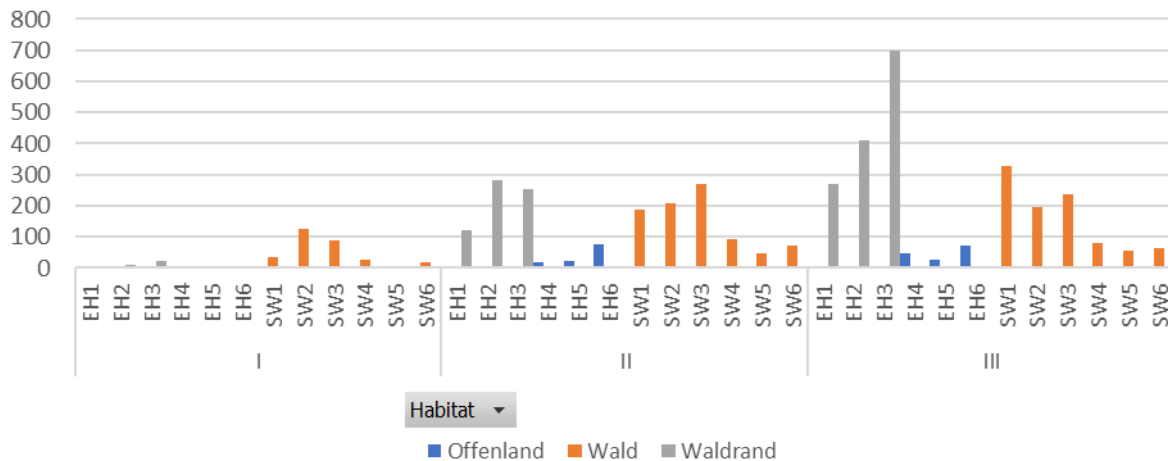


Abb. 23: Anzahl gefangener Insekten je Lampe und Block getrennt nach Habitat.

Die Lichtintensität als auch die Lichtdauer der Lampen wurde in Bezug zur gemessenen Fledermausaktivität gesetzt.

Es wurde ein Einfluss der Lichtdauer auf die Aktivitäten einzelner Fledermausartengruppen festgestellt. Die Aktivität der lichtscheuen Arten nahm mit zunehmender Beleuchtungsdauer pro Nacht ab (Abb. 24 A). Dagegen stieg die Aktivität der Vertreter der Gattung *Nyctalus spec.* (reagieren opportunistisch auf Licht) im Habitat Offenland und Waldrand mit zunehmender Beleuchtungsdauer pro Nacht an (Abb. 24 B). Zudem beeinflusste die Zeit die Aktivitäten der Fledermäuse. Die Aktivitäten der Gruppe der lichtscheuen Arten war Mitte August (Block III) signifikant höher als im Mai und Juni (Block I, Block II). Die Aktivitäten der opportunistisch auf Licht reagierenden Fledermausarten war im Mai (Block I) signifikant niedriger als im Juni und Juli (Block II und III).

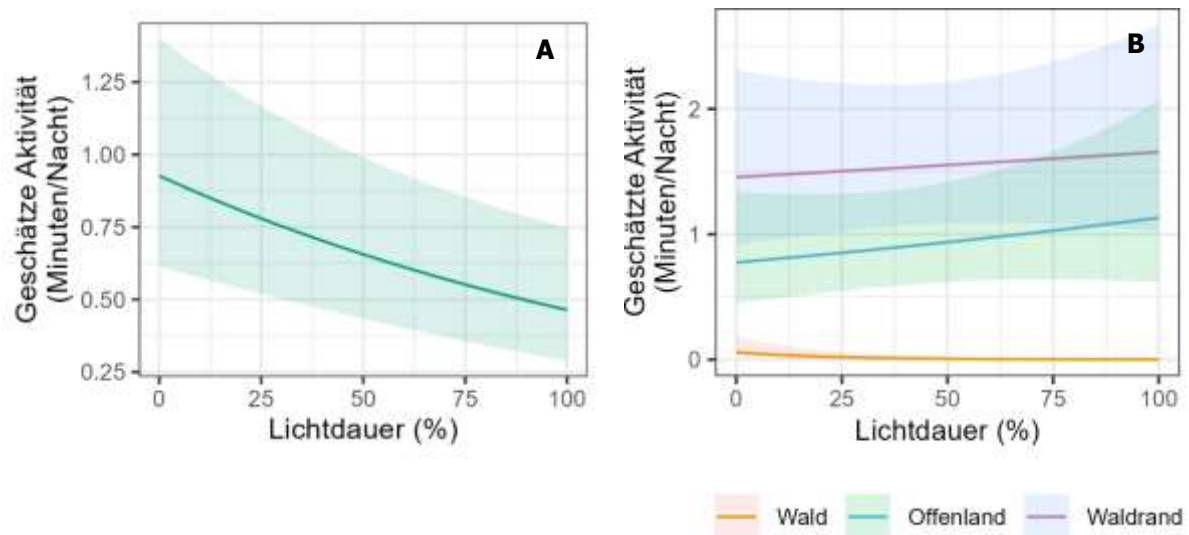


Abb. 24: Ergebnisse der Modelle zur Fledermausaktivität in Abhängigkeit der Lichtdauer der Lampen entlang von zwei Abschnitten des Radschnellweges Frankfurt- Darmstadt im Jahr 2021. Dargestellt sind die geschätzten Aktivitäten in aktiven Minuten pro Nacht für A) lichtscheue Arten und B) Arten der Gattung *Nyctalus spec.* (=opportunistisch auf Licht reagierende Arten).

Im Jahr 2022 wurden entlang des Abschnittes Langen – Egelsbach zwölf Arten bzw. Artenpaare von Fledermäusen erfasst. Erstmals wurde die Mopsfledermaus am Radschnellweg nachgewiesen, die zu den lichtscheuen Arten zählt. Die gemessenen Aktivitäten der Vertreter des *Nyctaloiden* und *Pipistrellus*-Lauttyps waren bei dauerhaftem und bewegungsinduziertem Licht am höchsten und ohne Licht am geringsten. Für die Vertreter des *Myotis*-Lauttyps wurde kein statistisch signifikanter Lichteinfluss auf die Aktivität festgestellt, hingegen überwog der Einfluss des Habitats. Insgesamt war die gemessene Aktivität dieser Vertreter im Vergleich zu den beiden anderen Rufgruppen sehr gering.

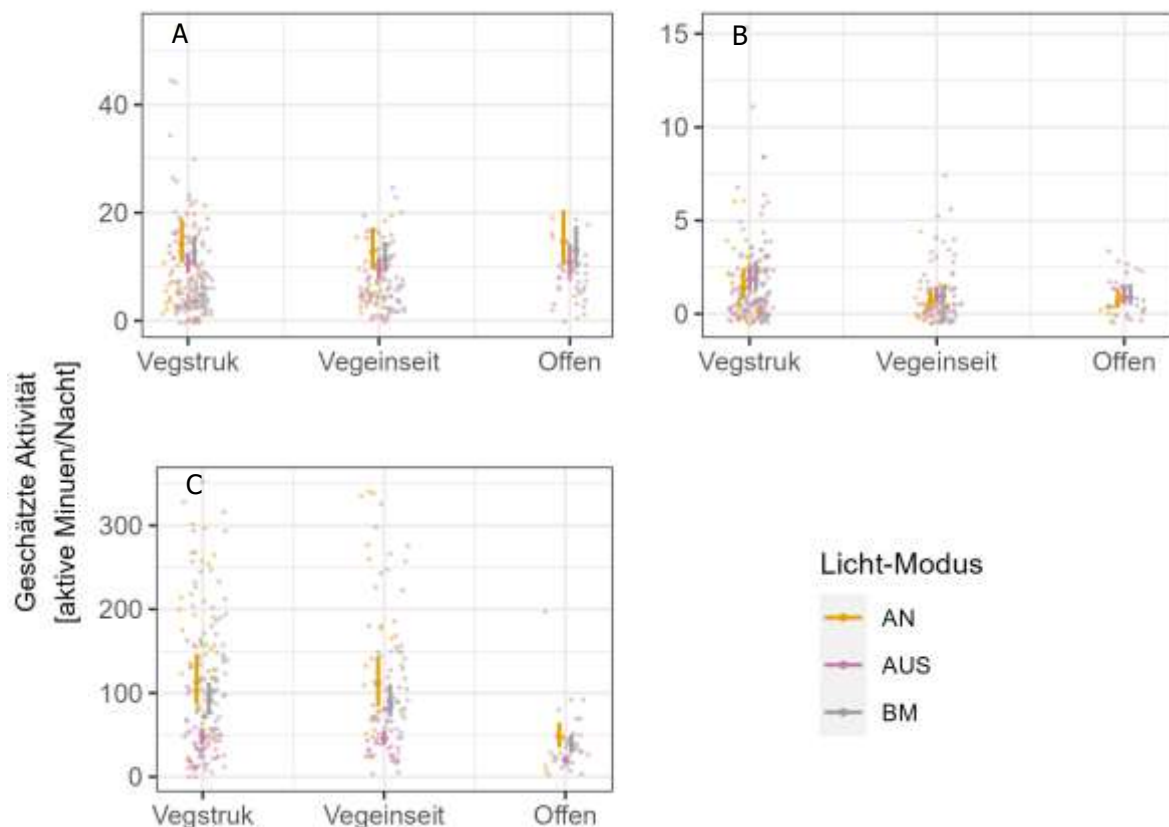


Abb. 25: Ergebnisse der Analysen Fledermausaktivität vs. Licht vs. Habitat entlang eines Abschnitts des Radschnellweges Frankfurt-Darmstadt im Jahr 2022. Aus den Modellen vorhergesagte Aktivität mit 95 % Konfidenzintervall zum Einfluss des Beleuchtungsmodus sowie des Habitats auf die Aktivitäten von A) Nyctaloider Lattyp, B) Myotis-Lattyp und C) Pipistrellus-Lattyp. Die Rohdaten sind als Punktwolke im Hintergrund dargestellt. Vegstruk: beidseitige Vegetationsstruktur, Vegeinseit: einseitige Vegetationsstruktur, Offen: Offenland.

6.5. Bewertung der Untersuchungsergebnisse

In den drei Untersuchungsjahren wurden durch verschiedene methodische Ansätze an drei verschiedenen Stellen des Radschnellweges Frankfurt-Darmstadt der Einfluss des Lichts der am Radschnellweg installierten LED-Photovoltaikleuchten untersucht.

1. Es wurde ein Einfluss der Lichtmodi der Lampen auf die Aktivität der Fledermäuse gemessen.
2. Die Lichtwirkung war art- und habitatspezifisch.
3. Es gibt keine standortspezifischen oder saisonalen Unterschiede bezüglich der Lichtwirkung.

Es wurden mindestens 14 Fledermausarten erfasst, von denen acht Arten als lichtscheu und sechs Arten als opportunistisch auf Licht reagierend gelten (nach Voigt et al., 2018). Fast die Hälfte der Arten hat in Hessen einen ungünstigen Erhaltungszustand und mehr als die Hälfte der Arten gilt als stark gefährdet bzw. vom Aussterben bedroht. Der hier untersuchte Wald als auch das reich strukturierte Offenland ist im dicht besiedelten und stark von Verkehrsinfrastruktur fragmentierten Rhein-Main-Gebiet für die vorkommenden Fledermausarten enorm wichtig. Die nachgewiesene Fledermausartenvielfalt entlang des Radschnellweges ist als hoch zu bewerten. Vergleichbare Artenzahlen wurden in hessischen Naturwaldreservaten und im Nationalpark Kellerwald-Edersee, die naturnahe Lebensräume für Fledermäuse bieten, erfasst (Dietz et al., 2018, 2021). Umso wichtiger ist es weitere Beeinträchtigungen des Lebensraums z.B. durch künstliches Licht zu vermeiden und gleichzeitig das Ziel der Verbesserung des Radwegenetzes durch konkrete Lösungsvorschläge zu unterstützen. Mit der hier gewählten innovativen adaptiven Beleuchtung gibt es eine neue Möglichkeit, die sich hinsichtlich der Lichtverschmutzung und Lichtreaktion völlig von einer permanenten konventionellen Beleuchtung unterscheidet.

Die in Voigt et al. (2018) dargestellte Klassifizierung der Lichtreaktion der unterschiedlichen Fledermausgattungen spiegelt sich auch in den Ergebnissen wieder. Die Arten der Gattung *Myotis* sowie die Vertreter des *Myotis*-Lauttyps, zu denen auch Arten der Gattungen *Plecotus* und *Barbastella* gehören, gelten als lichtscheu, was sich in den Untersuchungen bestätigte. In ihrem Kernhabitat Wald ergab sich eine negative Abhängigkeit vom Licht, d.h. je länger das Licht einwirkte, umso weniger aktiv waren diese Arten im Bereich der Lampen. Außerhalb des Waldes wurde die Aktivität eher durch Strukturen wie Gehölze erklärt als durch die Lichtwirkung der Beleuchtung des Radschnellweges. Die gemessene Aktivität der Vertreter des *Myotis*-Lauttyps war außerhalb des Waldes zu gering. Zu diesen Vertretern gehören Fledermausarten, die eine mittlere bis starke Waldbindung aufweisen (Dietz & Krannich, 2019). Diese Arten jagen strukturgebunden, d. h. sie fliegen innerhalb dichter Strukturen, wie z. B. Baumkronen, oder entlang von Strukturen, wie z. B. Waldwege oder Waldrand. Insbesondere

Letztere werden auch als Transferwege genutzt. Da langsamer und strukturgebunden fliegende Arten Helligkeit meiden, um ihr eigenes Prädationsrisiko zu minimieren (Rydell, 2006), führt eine Beleuchtung im Wald und am Waldrand zu geringerer bis gar keiner Fledermausaktivität der genannten Artengruppe. Wie stark der Einfluss des Lichtes ist, hängt von der Ausrichtung und Stärke sowie der Leuchtdauer der Lampen ab. Neben des Aktionsraumverlustes für Jagd und Transfer, führt eine Beleuchtung im Wald und Waldrand zur sogenannten „Licht-Anlockwirkung“ und somit zum geringeren Jagderfolg (Eisenbeis, 2006; Verovnik et al., 2015). Für lichtscheue Fledermausarten hat somit die Beleuchtung im Wald eine direkte (Meidung) als auch indirekte negative Wirkung (geringeres Beuteangebot).

Die Vertreter des *Pipistrellus*- und *Nyctaloiden* Lauttyps gehören zu den opportunistisch auf Licht reagierenden Arten. Vertreter beider Gruppen fliegen bei Beleuchtung des Quartiers nicht bzw. später aus und meiden Licht auf Transferflügen (Downs et al., 2003, Stone et al., 2009, 2015; Hale et al., 2015; Mathews et al., 2015), sind also lichtscheu. Bei der Jagd hingegen reagieren sie opportunistisch auf Licht. Typisch ist die Jagd und der Flug im offenen Luftraum über Vegetationen und Siedlungsraum und ebenso im Bereich von künstlichem Licht, wie z. B. Straßenlaternen. Dabei jagen sie vom Licht angelockte Insekten (Kronwitter, 1988; Rydell, 1992). Am Radschnellweg konnte zum einen keine Reaktion auf das Licht der Beleuchtung als auch eine Anlockung der Vertreter des *Pipistrellus*- und des *Nyctaloiden* Lauttyps durch Licht festgestellt werden. Dieser war gattungs- und habitatspezifisch. Die Beobachtungen bestätigen bisherige Untersuchungen, dass diese Arten von den Insektenkonzentrationen an den künstlichen Lichtquellen angelockt werden können, dies aber spezifisch ausfallen kann. Vertreter der Gattung *Nyctalus spec.* mieden im Wald Bereiche, je länger sie beleuchtet wurden, während am Vegetationsrand und im Offenland die Aktivität mit zunehmender Lichtdauer stieg.

Die erfasste Insektenhäufigkeit war je nach am Radschnellweg angrenzenden Lebensraum unterschiedlich hoch. Die geringsten Anzahlen an Insekten wurden im Offenland unabhängig des Erfassungsbereiches gefangen. An den Lampen am Waldrand und im Wald war die

Insektenhäufigkeit höher und nahm im Laufe des Sommers zu. Im Wald wurden höhere Insektenzahlen an dauerhaft angeschalteten Lampen erfasst. Es ist von einer stärkeren Störwirkung des Lichtes in den Lebensräumen Wald und Waldrand auszugehen als im Lebensraum Offenland. Genauere Aussagen zur Störwirkung des Lichts auf Insekten konnten aufgrund der begrenzten Möglichkeiten im Untersuchungsdesign nicht erfolgen.

Entlang der Radschnellverbindung wurde die vom Land Hessen als Musterlösung erarbeitete und geforderte Beleuchtung durch ein adaptives Beleuchtungskonzept auf ein Minimum reduziert. Das Licht der Lampen wird durch radargestützte Bewegungsmelder durch Fuß- und Radverkehr ausgelöst und geht, wenn keine erneute Bewegung registriert wird, nach etwa 30 s wieder aus. Messungen im Stadtwald Frankfurt haben gezeigt, dass das Licht v. a. zu Beginn der Fledermausaktivitätszeit am Abend, durch vorbeigehende/-fahrende Personen sowie am Morgen, wenn die Fledermausaktivität vorbei war, ausgelöst wurde (vgl. Kap. 6.4). Eine Überschneidung der Dämmerungszeit und Dunkelheit mit der Fledermausaktivität ist im Hochsommer, während der für Fledermäuse sehr wichtigen Wochenstubenzeit, relativ kurz. In dieser Zeit ist die Störwirkung des Lichts für Fledermäuse am größten. Mit zunehmender Nachtlänge wird die Überschneidung dieser Zeit größer, fällt jedoch nicht mehr in die Wochenstubenzeit der Fledermäuse. Im Radwegabschnitt, der direkt zwischen den Ortschaften Erzhausen und Wixhausen liegt und nur teilweise einseitig bewaldet ist, war die Frequentierung durch Fußgänger und Radfahrer höher als im Stadtwald und das Auslösen der Lampen verteilte sich über die gesamte Nacht (vgl. Kap. 5.6). Da dieser Abschnitt jedoch nicht im Wald liegt, ist die Störwirkung des Lichts auf Fledermäuse niedriger zu bewerten. Zudem ist vorgesehen, dass das Licht nach Beendigung der Untersuchungen auf dem gesamten Radschnellweg zwischen 23:00 und 05:00 Uhr komplett ausgeschaltet bleibt bzw. nur ein Glimmen der Lampen zur optischen Wegeführung erfolgt.

Weiterhin wurden im Stadtwald im Jahr 2022 die Lampen ausgetauscht (vgl. Kap. 5.5). Es erfolgte der Einbau sogenannter Amber-LEDs, deren Lichtfarbe mit 2.200 Kelvin niedriger als bei den bisher verbauten LEDs mit 3.000 Kelvin ist. Die gemessene Beleuchtungsstärke war

niedriger, kann jedoch als ausreichend empfunden werden, da die Umgebung insgesamt dunkler ist. Da Fledermäuse schon von sehr niedrigen lx-Werten negativ beeinflusst werden können (Kuijper *et al.*, 2008; Stone *et al.*, 2012; Lacoëuilhe *et al.*, 2014; Lewanzik & Voigt, 2016), ist der Einsatz von Amber-LEDs mit den einhergehenden niedrigeren lx-Werten als positiv zu bewerten und deren Einbau bei allen Lampen zu empfehlen.

Der Einfluss von künstlichem Licht auf Fledermäuse ist durch das adaptive Beleuchtungskonzept, die Abschaltung zwischen 23:00 und 05:00 Uhr und den teilweisen Einsatz von Amber-LEDs im Wald sehr gering. Sofern eine Beleuchtung eines Radweges außerorts unumgänglich ist (in Hessen nach HMWEVW, 2020 auf Radschnellverbindungen, Raddirektverbindungen und Schulwegen vorgesehen), stellt ein adaptives Beleuchtungskonzept mit Beleuchtungspausen und möglichst niedrigen lx-Werten in Waldbereichen die Möglichkeit mit den geringsten Störwirkungen dar. Im Vergleich mit einer konventionellen Beleuchtung ist ein adaptives Beleuchtungskonzept mit den Belangen des Fledermaus-Schutzes gut verträglich.

7. Handlungsleitfaden für die Umsetzung von außerörtlicher Beleuchtung von Radschnellverbindungen

Manfred Ockel, Markus Dietz, Elena Krannich, Klaus Petry und Nils Schreck

Entsprechend der festgelegten Qualitätsstandards und Musterlösungen für das hessische Radnetz (HMWEVW, 2020) sind Radschnellverbindungen bzw. Raddirektverbindungen (d.h. Verbindungen mit mehr als 2.000 bzw. 1.500 Fahren am Tag) außerorts zu beleuchten (siehe Abschnitte 3.1 bis 3.3.). Für Radverbindungen gilt dies in der Regel nicht. Ausnahmen sind hier insbesondere wichtige Schulwege. Eine weitergehende Beleuchtungspflicht für die Träger der Straßenbaulast (HStrG §9) besteht nicht.

Die Notwendigkeit einer Beleuchtung ist deshalb für jede neue Planung, v. a. hinsichtlich der örtlichen Gegebenheiten (Voraussichtliche Nutzungsintensität, -art und -zeiten, Umweltauswirkungen infolge von Lichtverschmutzung) fachlich überprüft werden.

Grundsätzlich gilt, dass keine Beleuchtung die beste Vermeidung von Lichtverschmutzung und ungünstigen Umweltwirkungen ist. Ist die Beleuchtung entsprechend der Prüfung erforderlich, werden folgende Empfehlungen gegeben, um eine Lichtwirkung zu minimieren. Die Empfehlungen basieren auf den Untersuchungen entlang der Radschnellverbindung Frankfurt-Darmstadt und dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand:

1. Bedarfszeiten einer Beleuchtung ermitteln.
2. Dunkelzeiten durch Abschaltzeiten definieren, mindestens jedoch von 23:00–05:00 Uhr.
3. Installation ausschließlich bedarfsorientierter Lampen.
4. Möglichst niedrige, planspezifisch zu konkretisierende Lichtpunkthöhen der Lampen.
5. Voll abgeschirmte Lampen, die nur die Nutzfläche beleuchten und kein Licht über die Horizontale abgeben, Upward Light Ratio ULR 0 % (= nach oben abgegebener Lichtanteil).

6. Möglichst niedriges Beleuchtungsniveau (Werte < 2,5 lx) und LEDs mit 3.000 Kelvin, im Hinblick auf die technische Entwicklung zukünftig Farbtemperaturen von 2.200 Kelvin (Amber), verwenden.

8. Zusammenfassung/Summary

Manfred Ockel, Markus Dietz, Elena Krannich, Klaus Petry und Nils Schreck

Radschnellverbindungen bieten v.a. durch die E – Mobilität der Fahrräder eine gute Alternative für Pendler, um vom Wohnort zum Arbeitsplatz zu kommen. Eine Beleuchtung der Radschnellverbindung ist entsprechend der Qualitätsstandards und Musterlösungen vorgesehen (siehe ausführlich Abschnitte 3.1 bis 3.3 der Qualitätsstandards und Musterlösungen). Dies soll zu einer höheren Akzeptanz und einer ganzjährigen Nutzung der Radschnellverbindung führen und kann gleichzeitig zu Störungen in der Natur führen. Durch eine sorgfältige Planung der Beleuchtung sollen mögliche Störwirkungen in die an die Radschnellverbindung angrenzend liegenden Lebensräume so gering wie möglich gehalten werden. Weitere Voraussetzungen für eine signifikante Akzeptanz und die ganzjährige Nutzung der Radschnellverbindung sind eine gute Ausbauqualität, ganzjährige Unterhaltung und Beschilderung.

Ziel des Vorhabens war eine autonome Stromversorgung durch Photovoltaik-Lampen zu testen sowie deren Störwirkung auf Fledermäuse zu überprüfen. Dadurch sollte eine dauerhafte Beleuchtung der Radschnellverbindung mit gleichzeitig geringster Störwirkung auf die umgebenden Lebensräume ermöglicht werden.

Die Installation von Photovoltaiklampen in verschiedenen Abschnitten der Radschnellverbindung, die sowohl durch geschlossene Waldbestände als auch durch Offenland und strukturierte Lebensräume führen, bestätigte die Annahme, dass die Photovoltaiklampen für Gebiete ohne Stromversorgung eine gute Alternative sind, um Strecken bzw. Objekte zu beleuchten. Die Solarmodule und die LED-Technik sind inzwischen so leistungstark, dass sie ganzjährig die erforderliche Beleuchtungsstärke auch in

beschatteten Bereichen, wie im geschlossenen Waldbestand, erzielen können. Die Messungen der Beleuchtungsstärke und weiterer Kennwerte erfüllten trotz Einschränkungen die europäische Straßenbeleuchtungsnorm.

Die eingebaute Sensortechnik an den Solarleuchten auf der Radschnellverbindung FRM1 in Hessen hat sich hinsichtlich einer Minimierung der Lichtverschmutzung und damit als eine günstige Umweltverträglichkeit bewährt. Bei dem bedarfsorientierten Betrieb schalten sich im Offenland die nächsten zwei vor der Rad fahrenden Person liegenden Lampen und im Wald die nächste vor der Rad fahrenden Person liegende Lampe für etwa 30 s ein. Werden keine Bewegungen durch Personen detektiert, glimmen die Lampen, sodass eine weitgehende Ortung des Radschnellweges möglich ist, ohne dass eine Lichtwirkung in die Umgebung vorhanden ist. Zudem werden die Lampen zwischen 23:00 und 05:00 Uhr abgeschaltet, d.h. es erfolgt nur ein Glimmen der Lampen zur optischen Wegeführung. Die verpflichtende Ausstattung der Fahrräder mit Licht (§67 StVZO) ermöglicht weiterhin die Nutzung des Radweges in der Zeit ohne Beleuchtung. Radverkehr und vor allem Pendlerverkehr ist in dieser Zeit nahezu nicht vorhanden.

Um die Auswirkungen der Beleuchtung auf Fledermäuse zu untersuchen, wurden in den mit den hier erprobten Solarlampen ausgestatteten Abschnitten mittels akustischer Erfassungen die Fledermausaktivitäten in drei Sommern erfasst. Dabei wechselten die Untersuchungsabschnitte bzw. die Untersuchungsdesigns, um unterschiedliche Situationen zu untersuchen. Insgesamt wurden mindestens 14 Fledermausarten erfasst. Dies ist für den Ballungsraum Rhein-Main eine vergleichbar hohe Vielfalt an Fledermausarten und unterstreicht damit die Bedeutung der an der Radschnellverbindung angrenzend liegenden Lebensräume. Die Auswertungen bestätigten die aktuell in der Wissenschaft bestehende Einteilung der Fledermausarten in lichtscheue Arten (v.a. *Myotis*-, *Plecotus* und *Barbastellus*) und opportunistisch (v.a. *Nyctaus*-, *Eptesicus* und *Pipistrellus*) reagierende Arten. Arten beider Gruppen wurden entlang der Radschnellverbindung erfasst. Die Meidung von künstlichem Licht durch lichtscheue Arten war stärker, je länger die Lampen in Betrieb waren. Die Reaktion

der opportunistisch reagierenden Fledermausarten fiel spezifisch aus. Im Offenland wurden höhere Aktivitäten beider *Nyctalus*-Arten und der Zwergfledermaus an dauerhaft beleuchteten oder bewegungsinduzierten als an ausgeschalteten Lampen registriert. Im Wald mieden Arten der Gattung *Nyctalus spec.*, Bereiche, je länger sie beleuchtet wurden. Bei einer solchen an die Anforderungen des Naturschutzes abgestimmten Beleuchtung mit einem adaptiven Lichtkonzept kann eine gute Verträglichkeit für Insekten und Fledermäuse sichergestellt werden.

Die Insektenhäufigkeit wurde von dem an der Radschnellverbindung angrenzenden Lebensraum und von der Zeit bestimmt. Im Verlauf des Sommers nahm die Insektenhäufigkeit zu. Insgesamt war die Insektenhäufigkeit an den Lampen im Offenland deutlich geringer als im Wald und am Waldrand. In Wäldern ist von einer höheren Störwirkung des Lichts auf die Insekten auszugehen.

Ist eine Beleuchtung von Radverbindungen entsprechend der Qualitätsstandards und Musterlösungen erforderlich, steht die Minimierung von Lichtwirkungen im Vordergrund. Dafür ist eine bedarfsorientierte „adaptive“ Beleuchtung vorzusehen. Hierzu werden im Handlungsleitfaden (siehe oben) konkrete Kriterien formuliert. Die Beleuchtung wird in der Regel zwischen 23:00 und 05:00 Uhr auf ein Glimmen reduziert, da der Radverkehr in den meisten Fällen in dieser Zeit bis auf wenige Einzelereignisse nicht vorhanden ist. Die Lampen sollten in die Umgebung abgeschirmt sein und nur die Nutzfläche beleuchten, eine Farbtemperatur von 3.000 Kelvin (entsprechend der Weiterentwicklung der Lichttechnik zukünftig 2.200 Kelvin) und vor allem in sensiblen Lebensräumen eine möglichst geringe Lichtstärke von < 2,5 lx aufweisen.

9. Literatur

- Altermatt, F., Baumeyer, A. & Ebert, D. (2009): Experimental evidence for male biased flight-to-light behavior in two moth species. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, Bd. 130, S. 259–265.
- Bauerová, Z. & Zima, J. (1988): Seasonal changes in visits to a cave by bats. *Folia Zoologica (Brno)*, Bd. 37, S. 97–111.
- Boldogh, S., Dobrosi, D. & Samu, P. (2007): The effects of the illumination of buildings on house-dwelling bats and its conservation consequences. *Acta Chiropterologica*, Bd. 9, S. 527–534.
- Currie, S.E., Johansson, L.C., Aumont, C., Voigt, C.C. & Hedenström, A. (2023): Conversion efficiency of flight power is low, but increases with flight speed in the migratory bat *Pipistrellus nathusii*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, Bd. 290, S. 20230045.
- Davies, T.W., Bennie, J., Inger, R., de Ibarra, N.H. & Gaston, K.J. (2013): Artificial light pollution: are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions? *Global Change Biology*, Bd. 19, S. 1417–1423.
- Dietz, C., von Helvesen, O. & Nill, D. (2007): Handbuch der Fledermäuse Europas und Nordwestafrikas. Biologie, Kennzeichen, Gefährdung. Kosmos Verlag, Stuttgart, 399 Seiten.
- Dietz, M., Bögelsack, K., Krannich, A. & Simon, O. (2020): Woodland fragments in urban landscapes are important bat areas: an example of the endangered Bechstein's bat *Myotis bechsteinii*. *Urban Ecosystems*, Bd. 23, S. 1359–1370.
- Dietz, M., Höcker, L., Lang, J. & Simon, O. (2023): Rote Liste der Säugetiere Hessens – 4. Fassung, Aufl. 1. Wiesbaden, 196 Seiten.
- Dietz, M. & Krannich, A. (2019): Die Bechsteinfledermaus *Myotis bechsteinii* - eine Leitart für den Waldnaturschutz. Handbuch für die Praxis. <https://www.bechsteinfledermaus.eu>, 188 Seiten.
- Dietz, M., Krannich, A. & Krannich, E. (2021): Akustisches Dauermonitoring von Fledermäusen im Nationalpark Kellerwald-Edersee. In: Nordhessische Gesellschaft für Naturkunde und Naturwissenschaften (NGNN) e. V. (Hrsg.), *Jahrbuch Naturschutz in Hessen 20/2021*. Cognito, S. 135–144.
- Dietz, M., Krannich, E. & Weitzel, M. (2018): Fledermäuse in hessischen Naturwaldreservaten. In: *Jahrbuch Naturschutz in Hessen*. Cognito Verlag, Niedenstein, S. 137–146.
- Dietz, M. & Mehl-Rouschal, C. (2007): Frankfurter Nachtleben – ein Projekt zum Schutz von Fledermäusen in der Stadt. *Conturec*, Bd. 2, S. 95–106.
- Downs, N.C., Beaton, V., Guest, J., Polanski, J., Robinson, S.L. & Racey, P.A. (2003): The effects of illuminating the roost entrance on the emergence behaviour of *Pipistrellus pygmaeus*. *Biological Conservation*, Bd. 111, S. 247–252.
- Eisenbeis, G. (2006): Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany. In: *Ecological consequences of artificial night lighting*. Island Press, Washington D.C., S. 281–304.
- EU-Kommission (1992): Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen. *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Reihe L*, Bd. 206.
- EUROBATS (2019): EUROBATS Publication Series No. 8: Leitfaden für die Berücksichtigung von Fledermäusen bei Beleuchtungsprojekten. Bonn.
- Falcón, J., Torriglia, A., Attia, D., Viénot, F., Gronfier, C., Behar-Cohen, F., Martinsons, C. & Hicks, D. (2020): Exposure to Artificial Light at Night and the Consequences for Flora, Fauna, and Ecosystems. *Frontiers in Neuroscience*, Bd. 14, S. 1–39.
- Fischer, J.A. (1999): Zu Vorkommen und Ökologie des Kleinabendseglers, *Nyctalus leisleri* (Kuhl, 1817), in Thüringen, unter besonderer Berücksichtigung seines Migrationsverhaltens im mittleren Europa. *Nyctalus*, Bd. 7, S. 155–174.
- Grubisic, M., van Grunsven, R.H.A., Kyba, C., Manfrin, A. & Hölker, F. (2018): Insect declines and agroecosystems: does light pollution matter? *Annals of Applied Biology*, Bd. 173, S. 180–189.
- 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*, Bd. 21, S. 2467–2478.
- HLNUG - Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2019): Bericht nach Art. 17 FFH-Richtlinie 2019 Erhaltungszustand der Arten, Vergleich Hessen - Deutschland (Stand: 23.10.2019). 4 Seiten.

- HMWEVW – Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen (2020): Radnetz Hessen: Qualitätsstandards und Musterlösungen (Nr. 2. Auflage). Wiesbaden, 199 Seiten.
- Höhne, E. (2011): Raum – Zeitliches Aktivitätsmuster von Fledermäusen (Chiroptera) in Streuobstwiesen (Diplomarbeit). Friedrich-Schiller Universität Jena, Jena, 131 Seiten.
- Horáček, I. & Zima, J. (1978): Net-revealed cave visitation and cave dwelling in European bats. *Folia Zoologica (Brno)*, Bd. 27, S. 135–148.
- ITN – Institut für Tierökologie und Naturbildung (2013): Höhlenbäume im urbanen Raum. Leitfaden. Entwicklung eines Leitfadens zum Erhalt eines wertvollen Lebensraumes in Parks und Stadtwäldern unter Berücksichtigung der Verkehrssicherung. Gonterskirchen & Frankfurt, 95 Seiten.
- ITN – Institut für Tierökologie und Naturbildung (2020): Akustische Fleermauserfassung am Radschnellweg (Teststrecke) im Frankfurter Stadtwald (Unveröffentl. Gutachten im Auftrag des Regionalparks Rhein-Main Süd-West GmbH). Gonterskirchen, 24 Seiten.
- ITN – Institut für Tierökologie und Naturbildung (2022): Tierökologische Untersuchungen möglicher Auswirkungen auf Fledermäuse und Insekten durch die Beleuchtung an der Radschnellwegverbindung zwischen Frankfurt und Darmstadt (Unveröffentl. Gutachten im Auftrag des Regionalparks Rhein-Main Süd-West GmbH). Gonterskirchen, 21 Seiten.
- ITN – Institut für Tierökologie und Naturbildung GmbH (2023): Untersuchung möglicher Auswirkungen auf Fledermäuse durch die Beleuchtung an der Radschnellwegverbindung zwischen Frankfurt und Darmstadt, Abschnitt Südlich Langen (Unveröffentl. Gutachten im Auftrag des Regionalparks Rhein-Main Süd-West GmbH). Gonterskirchen, 26 Seiten.
- ITN – Institut für Tierökologie und Naturbildung GmbH (2023): Bundesstichprobenmonitoring 2020-2023 von Fledermausarten (Chiroptera) in Hessen (Gutachten im Auftrag des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie). Gonterskirchen, 223 Seiten.
- Kronwittter, F. (1988): Population structure, habitat use and activity patterns of the noctule bat, *Nyctalus noctula* Schreb., 1774 (Chiroptera: Vespertilionidae) revealed by radio-tracking. *Myotis*, Bd. 26, S. 23–85.
- Kuijper, D.P.J., Schut, J., van Dulleman, D., Toorman, H., Goossens, N. & Ouwehand, J. (2008): Experimental evidence of light disturbance along the commuting routes of pond bats (*Myotis dasycneme*). *Lutra*, Bd. 51, S. 37–49.
- 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*, Bd. 379, S. 265–268.
- Kyba, C.C.M. & Hölker, F. (2013): Do artificially illuminated skies affect biodiversity in nocturnal landscapes? *Landscape Ecology*, Bd. 28, S. 1637–1640.
- Lacoeuilhe, A., Machon, N., Julien, J.-F., Bocq, A.L. & Kerbiriou, C. (2014): The Influence of Low Intensities of Light Pollution on Bat Communities in a Semi-Natural Context. *PLOS ONE*, Bd. 9, S. e103042.
- Lewanzik, D. & Voigt, C.C. (2016): Transition from conventional to light-emitting diode street lighting changes activity of urban bats. *Journal of Applied Ecology*, Bd. 54, S. 264–271.
- LfU – Bayerisches Landesamt für Umwelt (2020): Bestimmung von Fledermausrufaufnahmen und Kriterien für die Wertung von akustischen Artnachweisen - Teil 1 – Gattungen *Nyctalus*, *Eptesicus*, *Vespertilio*, *Pipistrellus* (nyctaloide und pipistrelloide Arten), Mopsfledermaus, Langohrfledermäuse und Hufeisennasen Bayerns. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 86 Seiten.
- LfU – Bayerisches Landesamt für Umwelt, S. (2022): Bestimmung von Fledermausrufaufnahmen und Kriterien für die Wertung von akustischen Artnachweisen - Teil 2. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 48 Seiten.
- Malten, A., Bönsel, D., Fehlow, M. & Zizka, G. (2002): Erfassung von Flora, Fauna und Biotoptypen im Umfeld des Flughafens Frankfurt am Main. Forschungsinstitut Senckenberg, AG Biotopkartierung, Teil I-V, Frankfurt am Main, 104 Seiten.
- Mathews, F., Roche, N., Aughney, T., Jones, N., Day, J., Baker, J. & Langton, S. (2015): Barriers and benefits: implications of artificial night-lighting for the distribution of common bats in Britain and Ireland. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Bd. 370, S. 20140124.
- Meinig, H., Boye, P. & Hutterer, R. (2009): Rote Liste und Gesamtartenliste der Säugetiere (Mammalia) Deutschlands. In: Haupt, H., Ludwig, G., Gruttke, H., Binot-Hafke, M., Otto, C. & Pauly, A.
-

- (Hrsg.), *Rote Liste - Gefährdete Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands*, Naturschutz und Biologische Vielfalt. Bundesamt für Naturschutz (BfN), S. 115–153.
- Perkin, E.K., Hölker, F. & Tockner, K. (2014): The effects of artificial lighting on adult aquatic and terrestrial insects. *Freshwater Biology*, Bd. 59, S. 368–377.
- Petersons, G. (2004): Seasonal migrations of north-eastern populations of Nathusius' bats *Pipistrellus nathusii* (Chiroptera). *Myotis*, Bd. 41/42, S. 29–56.
- Rich, C. & Longcore, T. (2006): *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press, Washington, DC, 458 Seiten.
- Rowse, E.G., Lewanzik, D., Stone, E.L., Harris, S. & Jones, G. (2016): Dark Matters: The Effects of Artificial Lighting on Bats. In: Voigt, C.C. & Kingston, T. (Hrsg.), *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World*. Springer International Publishing, Cham, S. 187–213.
- Russ, J. (2021): *Bat Calls of Britain and Europe: A Guide to Species Identification*. Pelagic Publishing, Exeter, 432 Seiten.
- Russo, D. & Jones, G. (2002): Identification of twenty-two bat species (Mammalia: Chiroptera) from Italy by analysis of time-expanded recordings of echolocation calls. *Journal of Zoology*, Bd. 258, S. 91–103.
- Rydell, J. (1992): Exploitation of Insects around Streetlamps by Bats in Sweden. *Functional Ecology*, Bd. 6, S. 744–750.
- Rydell, J. (2006): Bats and their insect prey at streetlights. In: Rich, C. & Longcore, T. (Hrsg.), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press, Washington DC, S. 43–60.
- Rydell, J. & Speakman, J.R. (1995): Evolution of nocturnality in bats: Potential competitors and predators during their early history. *Biological Journal of the Linnean Society*, Bd. 54, S. 183–191.
- Schaub, A. & Schnitzler, H.U. (2007): Flight and echolocation behaviour of three vespertilionid bat species while commuting on flyways. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol*, Bd. 193, S. 1185–1194.
- Siemers, B.M. & Schnitzler, H.-U. (2004): Echolocation signals reflect niche differentiation in five sympatric congeneric bat species. *Nature*, Bd. 429, S. 657–661.
- Skiba, R. (2009): *Europäische Fledermäuse. Kennzeichen, Echoortung und Detektoranwendung*, Aufl. Aufl.2., Die Neue Brehm-Bücherei. Westarp Wissenschaften-Verlagsgesellschaft mbH, Magdeburg, 220 Seiten.
- Stone, E.L., Harris, S. & Jones, G. (2015): Impacts of artificial lighting on bats: a review of challenges and solutions. *Mammalian Biology - Zeitschrift für Säugetierkunde*, Bd. 80, S. 213–219.
- Stone, E.L., Jones, G. & Harris, S. (2009): Street lighting disturbs commuting bats. *Current biology*, Bd. 19, S. 1123–1127.
- Stone, E.L., Jones, G. & Harris, S. (2012): Conserving energy at a cost to biodiversity? Impacts of LED lighting on bats. *Global Change Biology*, Bd. 18, S. 2458–2465.
- Van Geffen, K.G., Groot, A.T., Van Grunsven, R.H.A., Donners, M., Berendse, F. & Veenendaal, E.M. (2015): Artificial night lighting disrupts sex pheromone in a noctuid moth. *Ecological Entomology*, Bd. 40, S. 401–408.
- Van Geffen, K.G., Van Eck, E., De Boer, R.A., Van Grunsven, R.H.A., Salis, L., Berendse, F. & Veenendaal, E.M. (2015): Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth. *Insect Conservation and Diversity*, Bd. 8, S. 282–287.
- Van Grunsven, R.H.A., Donners, M., Boeke, K., Tichelaar, I., Van Geffen, K.G., Groenendijk, D., Berendse, F. & Veenendaal, E.M. (2014): Spectral composition of light sources and insect phototaxis, with an evaluation of existing spectral response models. *Journal of Insect Conservation*, Bd. 18, S. 225–231.
- van Langevelde, F., Ettema, J.A., Donners, M., WallisDeVries, M.F. & Groenendijk, D. (2011): Effect of spectral composition of artificial light on the attraction of moths. *Biological Conservation*, Bd. 144, S. 2274–2281.
- Vasenkov, D.A., Vasiliev, N.S., Sidorchuk, N.V. & Rozhnov, V.V. (2023): Autumn Migration of Greater Noctule Bat (*Nyctalus Lasipterus*): through Countries and over Mountains to a New Migration Flight Record in Bats. *Doklady Biological Sciences*, S. Epub ahead of print.
- Verovnik, R., Fišer, Ž. & Zakšek, V. (2015): How to reduce the impact of artificial lighting on moths: A case study on cultural heritage sites in Slovenia. *Journal for Nature Conservation*, Bd. 28, S. 105–111.

- 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): Leitfaden für die Berücksichtigung von Fledermäusen bei Beleuchtungsprojekten, EUROBATS Publication Series. UNEP/EUROBATS Secretariat, Bonn, 67 Seiten.
- Wakefield, A., Stone, E.L., Jones, G. & Harris, S. (2015): Light-emitting diode street lights reduce last-ditch evasive manoeuvres by moths to bat echolocation calls. *Royal Society Open Science*, Bd. 2, S. 150291.
- Williams, C.B. (1936): The Influence of Moonlight on the Activity of Certain Nocturnal Insects, Particularly of the Family Noctuidae, as Indicated by a Light Trap. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, Bd. 226, S. 357–389.
- Winter, Y. & Helversen, O. von (1998): The energy cost of flight: do small bats fly more cheaply than birds? *Journal of Comparative Physiology B*, Bd. 168, S. 105–111.

10. Anhang

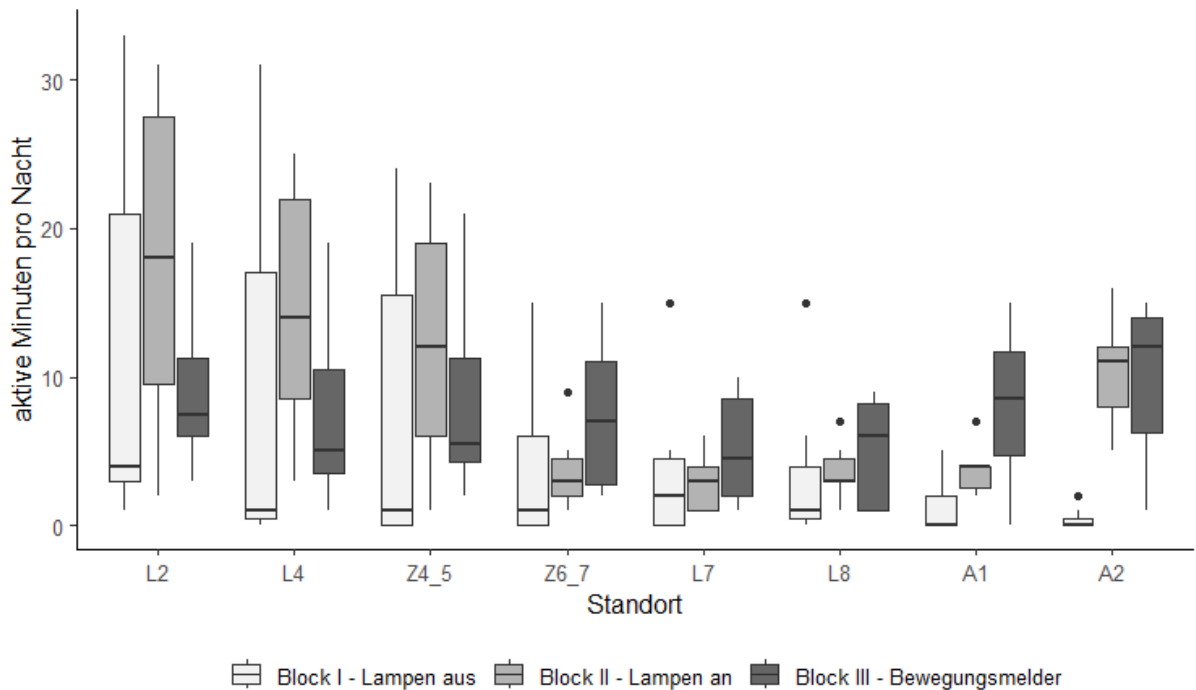


Abb. 26: Aktivitäten der Vertreter des Nyctaloiden Lauttyps (opportunistisch reagierend auf Licht) an den Standorten der Teststrecke des Radschnellweges Frankfurt-Darmstadt. L = Lampe; Z = Zwischen den Lampen; A = Außerhalb der Teststrecke.

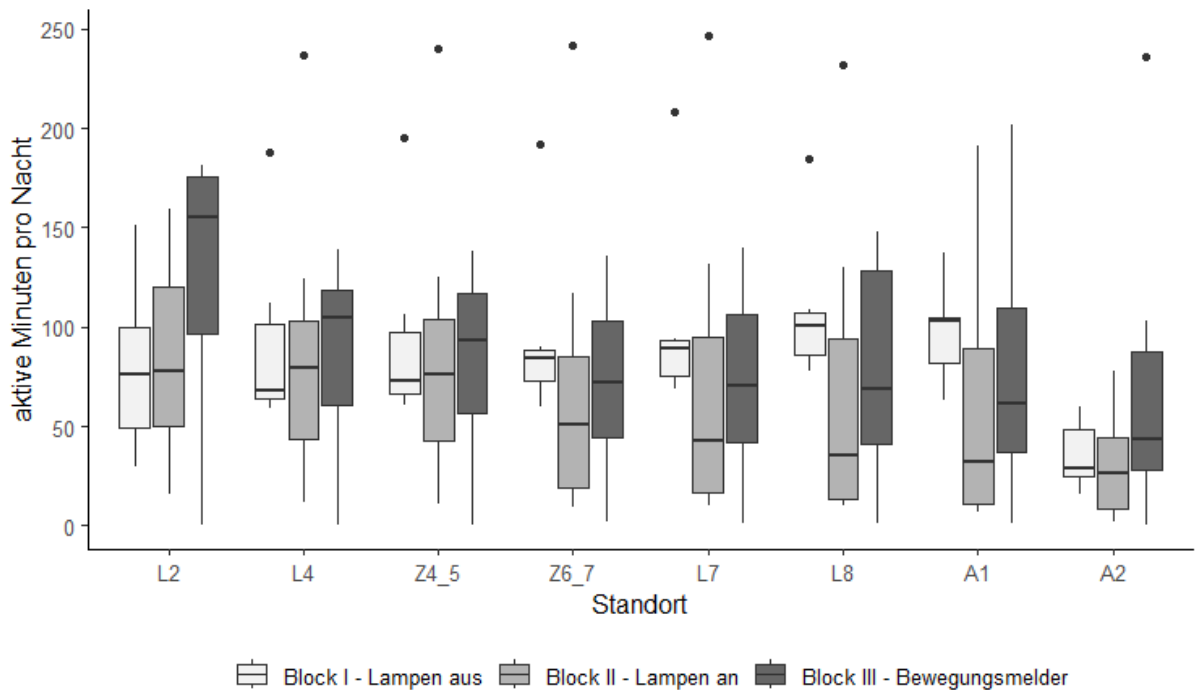


Abb. 27: Aktivitäten der Vertreter des Pipistrellus-Lauttyps (opportunistisch reagierend auf Licht) an den Standorten der Teststrecke des Radschnellweges Frankfurt-Darmstadt. L = Lampe; Z = Zwischen den Lampen; A = Außerhalb der Teststrecke.

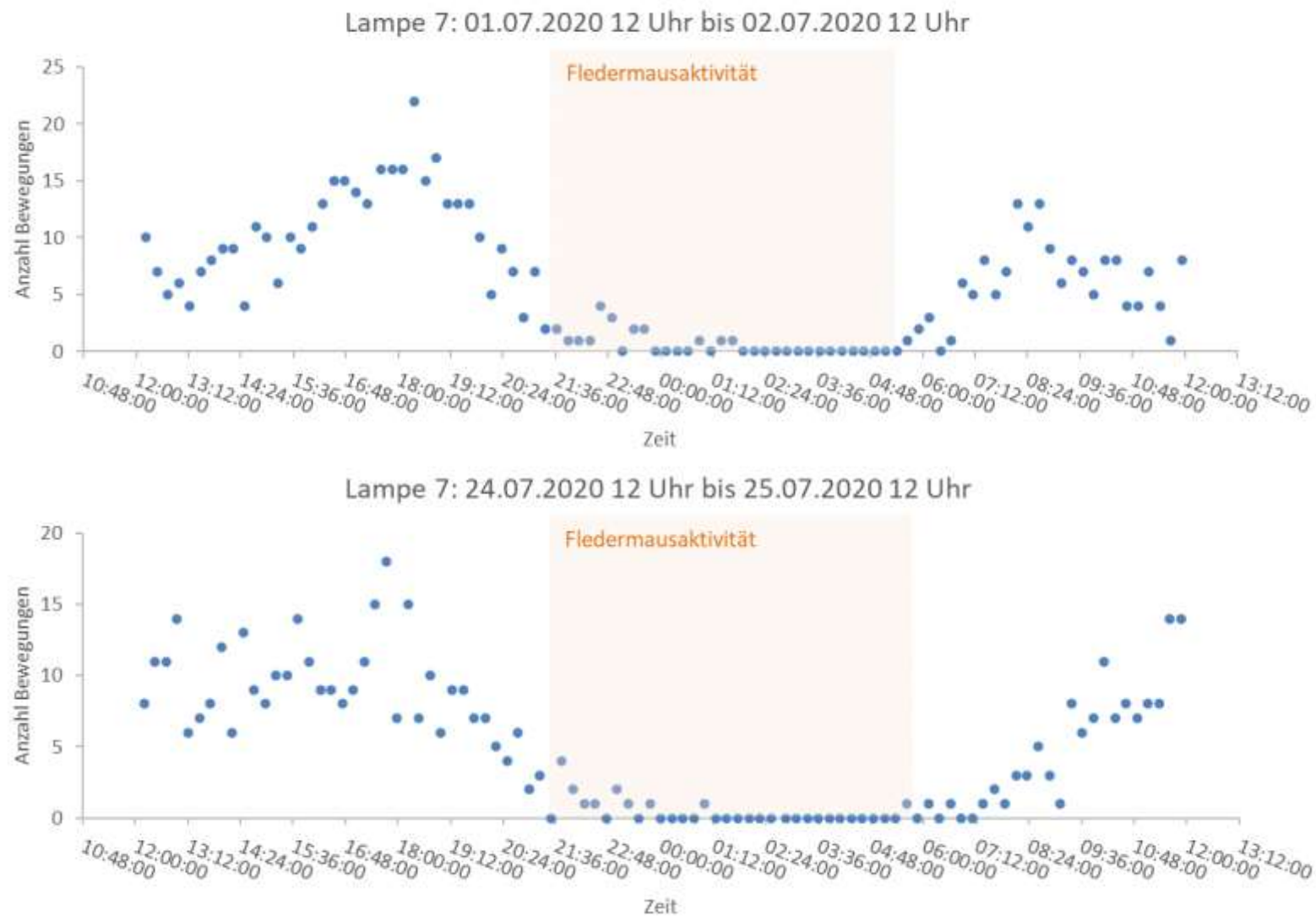


Abb. 28: Von der Lampe 7 registrierte Radfahrer/Fußgänger-Aktivitäten entlang der Teststrecke in jeweils zwei Nächten im Juli.

Tab. 7: Nachgewiesene Insektengruppen am Radschnellweg zwischen Egelsbach und Wixhausen sowie im Stadtwald Frankfurt im Jahr 2021.

Gruppe	Gesamt
Doppelschwänze Diplura	1
Fransenflügler Thysanoptera	1
Hautflügler Hymenoptera	724
Käfer Coleoptera	2.965
Kamelhalsfliegen Rhabdioptera	1
Netzflügler Neuroptera	6
Ohrwürmer Dermaptera	3
Pflanzenläuse Stenorrhyncha	25
Schnabelfliegen Mecoptera	1
Schmetterlinge Lepidoptera	45
Spinnen Arachnida	12
Springschwänze Collembola	2
Wanzen Heteroptera	24
Zikaden Auchenorrhyncha	1
Zweiflügler Diptera	649
unbekannt	6
Anzahl Tiere	4.466
Anzahl Gruppen	15

IMPRESSUM

Regionalpark Rhein-Main Süd-West gGmbH
Mörfelder Str. 33
65451 Kelsterbach

Gestaltung/Layout Titelseite/Umschlag

www.ifok.de

Bildnachweise

© HMWVW- Corinna Spitzbarth

© HMWVW - Peter Bajer

© Institut für Tierökologie und Naturbildung GmbH (ITN)

© Ingenieurbüro Dr. Petry & Partner mbH (IBDP)

Unterstützt durch:



HESSEN



Hessisches Ministerium
für Wirtschaft, Energie,
Verkehr, Wohnen
und ländlichen Raum

Hinweis des Herausgebers

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Hessischen Landesregierung herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags- und Kommunalwahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen und Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Die genannten Beschränkungen gelten unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Druckschrift dem Empfänger zugegangen ist. Den Parteien ist es jedoch gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Stand April 2025