

Lichtverschmutzung – Ausmaß, gesellschaftliche und ökologische Auswirkungen sowie Handlungsansätze

„Auswirkungen der Lichtverschmutzung auf Fauna und Flora“

Sibylle Schroer und Franz Hölker

*Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei,
im Forschungsverbund Berlin e.V., Müggelseedamm 310, 12587 Berlin*



Gutachten im Auftrag des Deutschen Bundestages vorgelegt dem Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Eingereicht am 19.12.2017.

Zitierempfehlung:

Schroer, S.; Hölker, F. (2018) Auswirkung der Lichtverschmutzung auf Fauna und Flora. IGB – Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin DOI: 10.48440/GFZ.1.4.2020.003

Autoren:

Dr. Sibylle Schroer

Dr. Franz Hölker

Mail-Adresse: schroer@igb-berlin.de

**Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)
Forschungsverbund Berlin e.V.
Müggelseedamm 310,12587 Berlin**

Impressum:

**Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)
Forschungsverbund Berlin e.V.
Müggelseedamm 310,12587 Berlin**

Veröffentlicht in Potsdam

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Telegrafenberg
D- 14473 Potsdam

Deutschland
April 2021

DOI: <https://doi.org/10.48440/GFZ.1.4.2020.003>



Gliederung

Abkürzungsverzeichnis	5
Zusammenfassung	5
1. Einführung	9
2. Auswirkungen von künstlichem Licht in der Nacht auf Fauna und Flora	12
2.1. Flora	14
2.2. Fauna	17
2.2.1. Insekten und andere Arthropoden	17
2.2.2. Vögel	23
2.2.3. Fische	26
2.2.4. Amphibien	29
2.2.5. Säugetiere	31
2.2.6. Fledermäuse	34
2.3. Die Relevanz der Auswirkungen von künstlichem Licht auf Flora und Fauna	38
2.3.1. Verhaltensänderungen: Aktivität und Artenvielfalt	39
2.3.2. Akuter Stress	40
2.3.3. Zirkadianer Rhythmus	40
2.3.4. Reproduktion	41
2.3.5. Hormonelle Veränderungen	42
2.3.6. Immunabwehr	42
2.3.7. Schwellenwerte	43
3. Handlungsempfehlungen	66
3.1. Schutzgebiete	66
3.2. Beleuchtungsstärkeregelung	67
3.3. Zeitliche Abschaltung öffentlicher Beleuchtung	68
3.4. Abstrahlungsgeometrie	69
3.5. Spektrale Zusammensetzung der Lichtimmission	71

4. Beurteilung und Messung von Lichtimmissionen	72
5. Die Unterstützung von Maßnahmen der Bundesregierung zum Schutz der Umwelt, des Klimas und von Ressourcen	76
5.1. Klimaschutzziele	76
5.2. Maßnahmen gegen Lärmbelästigung.....	77
5.3. Maßnahmen zum Schutz von Lebensräumen und der biologischen Vielfalt	81
6. Forschungsbedarf.....	83
7. Fazit.....	87
Referenzen.....	88
Über die Autoren.....	103
Das Netzwerk	103

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiele für gewerbliche und private Beleuchtung, welche den Zielraum überstrahlt. Bilder zur Verfügung gestellt mit freundlicher Genehmigung von Dietrich Henckel (links oben), Adrian Lorberth (rechts oben) und Volker Crone (r. und l. unten).	10
Abbildung 2: Japanische Kirsche (<i>Prunus serrulata</i>) am Mauerweg in Berlin, 15.11.2017. Der Baum ist in beginnender Blüte, obwohl der Laubwurf fast abgeschlossen ist. Die natürliche Blütezeit dieser Zierkirsche ist von April bis Mai. Dieser Baum ist einer von 9000 Bäumen, die als Japanische Spende zur Wiedervereinigung im Jahr 1990 gepflanzt wurden. Foto: S. Schroer.	16
Abbildung 3: Experimentalinfrastruktur angelehnt an ein modernes Straßenbeleuchtungssystem zur Forschung an strukturellen und funktionellen Auswirkungen von künstlichem Licht auf ein aquatisch-terrestrisches Ökosystem. Illustration A. Manfrin.....	21
Abbildung 4: Tammar-Wallabies auf einem Marinestützpunkt erfahren um ein Vielfaches erhöhte Helligkeit in der Nacht als solche, die im Buschland leben. (a) Mittlere Nachtlichtintensität vom astronomischen Sonnenuntergang bis zum Sonnenaufgang im Buschland (schwarze Balken und auf der Marinebasis (orange Balken). (b) Melatonin wird bei hohen Lichtverschmutzungsgraden signifikant unterdrückt. Die y-Achse stellt die rücktransformierten logarithmische Melatonin-Konzentrationen dar. (c) Die Verteilung der Geburten im Busch (n = 119, schwarze Balken) und auf der Marinebasis (n = 118, orangene Balken), aus Robert et al. 2015, S. 4, Publikationslizenz: 4.0 International (CC BY 4.0).....	34

Abbildung 5: Schematische Darstellung der komplexen Auswirkungen durch künstliches Licht in der Nacht auf Flora und Fauna. Einzelne Verhaltensänderungen können in Ökosystemen kaskadenartige Effekte hervorrufen. Pfeile geben die Richtung der möglichen Effekte an, Verbindungslinien zeigen Auswirkungen in beide Richtungen.	38
Abbildung 6: Beispiel für Leuchten mit Lichtstärkeklasse G6 (Beschränkung der Abstrahlungsgeometrie in Winkeln von 10-20° unterhalb der Horizontalen). Foto: A. Hänel.	70
Abbildung 7: Lichtspektren unterschiedlicher Leuchtmittel, Natriumdampf-Niederdruck und Hochdruck und LED mit unterschiedlichen Farbtemperaturen nach „Flagstaff Darkskies Coalition“.....	72
Abbildung 8: Zusammenfassung der Schwellenwerte für Lärm, für die ausreichend Nachweise vorliegen. (Leitlinien für die Europäische Region gegen Nachtlärm) Beispiel Tabelle 1 und 2.....	80
Abbildung 9: Beispiel für Brückenbeleuchtung, Langzunge Orbetello (Italien). Foto Volker Crone	85
 Kasten 1: Erklärung der Farbtemperatur mit Beispielen für unterschiedliche Leuchtmittel.....	 14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Insektenfänge an LED, kalt- und warm-weiß, im Direktvergleich mit HPS (Natriumdampf-Hochdruck) Leuchtmitteln nach Huemer et al. (2011).....	21
Tabelle 2: Schwellenwerte für Beleuchtungsstärken, die Veränderungen in unterschiedlichen Taxa hervorrufen	46
Tabelle 3: Nachweise von Auswirkungen von künstlichem Licht auf Fauna, gelistet nach Taxa, Auswirkungen durch unterschiedliche Beleuchtungsstärken (Intensität), Lichtspektrum und zeitliche Exposition in künstlichem Licht.	47
Tabelle 4: Auswahl aus den Richtlinien und Normen für Lärmschutz (aus: Städtebauliche Lärmfibel, Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg)	79

Abkürzungsverzeichnis

BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
cd	Candela
FFH	Flora-Fauna-Habitat
Hg	Halogen-Metalllampen
HPS	Natriumdampf-Hochdruck (<i>high pressure sodium</i>)
IR	Infrarot
LAI	Licht-Richtlinie der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz
LED	Leuchtdioden
LPS	Natriumdampf-Niederdruck (<i>low pressure sodium</i>)
lx	Lux
MV	Quecksilberdampf-Hochdruck (<i>mercury vapour</i>)
NSB	Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt
pc	Phosphorfilter (<i>phosphor converted</i>)
REM	Schnelle Augenbewegungen (<i>rapid-eye movements</i>)
ULR	aufwärtsgerichteter Lichtanteil (<i>upward light ratio</i>)
vs	versus

Zusammenfassung

Auswirkungen von künstlichem Licht auf Flora und Fauna sind vielfältig, denn unterschiedlichste Arten nutzen die skotopische Phase als Nische, ein Drittel der Wirbeltiere sind nachtaktiv - dazu gehören alle Fledermausarten und fast alle Amphibien - und zwei Drittel der bekannten wirbellosen Arten (Hölker et al. 2010a). Durch Ausbildung hochentwickelter Sinne haben sich diese Organismen an die Schwachlichtbedingungen der Nachtnische anpassen können. Aber nicht nur nachtaktive Arten sind von den Veränderungen durch künstliches Licht in der Nacht betroffen. Auch viele tagaktive Tiere werden durch künstliches Licht direkt oder oft indirekt durch Veränderungen in ihren Ökosystemen beeinträchtigt (Bennie et al. 2015; Manfrin et al. 2017). Dieses Gutachten stellt erstmalig Auswirkungen auf Tiere nach Unterschieden in der Beleuchtungsstärke, in der spektralen Zusammensetzung und nach zeitlicher Exposition zusammen. Es wird dabei der Anspruch verfolgt, alle relevanten Ergebnisse aus wissenschaftlichen Studien aufzulisten. Die Analyse der wenigen dokumentierten Dose-Response-Studien zeigt, dass die meisten lichtinduzierten Veränderungen der Physiologie und des Verhaltens einzelner Organismen schon ab

Beleuchtungsstärken eintreten, die dem von mond hellen Nächten entsprechen (Kronfeld-Schor et al. 2013). Im Freiland können die Schwellenwerte höher liegen, z. B. konnten keine relevanten Veränderungen bei Vögeln unter einer Beleuchtungsstärke von 6 lx nachgewiesen werden (Da Silva et al. 2017). Grund für die Lichttoleranz könnten Vermeidungsstrategien sein. Beispielsweise konnte bei freilebenden Kohlmeisen, die einen Lichtdatenlogger trugen, keine signifikanten Unterschiede in der Lichtexposition nachgewiesen werden, obwohl einige der untersuchten Vögel näher an Beleuchtungspunkten nisteten als andere (Jong de et al. 2016a).

Vor allem besteht noch hoher Klärungsbedarf für das rasante Insektensterben, das in den vergangenen Dekaden auf eine Abnahme von über 80% Biomasse geschätzt wird (Vogel 2017). Neben Landnutzung und Pestizideinsatz dürfte auch Beleuchtung hier eine große Rolle spielen. Denn selbst in Naturschutzgebieten sind Insekten von einer rasanten Biomasseabnahme bedroht. Obwohl die Erhellung der Nachtlandschaften in weltweit ausgewiesenen Naturschutzgebieten¹ jährlich zunimmt (Gaston et al. 2015; Falchi et al. 2016; Kyba et al. 2017), wird der Faktor Licht dabei aber als Ursache noch wenig berücksichtigt (Hallmann et al. 2017).

Angesichts der bislang nachgewiesenen und weiterhin zu erwartenden Auswirkungen auf Verhalten, Artzusammensetzung, Hormonhaushalt und Reproduktion werden folgende Maßnahmen empfohlen, um Störungen von Flora und Fauna durch künstliches Licht zu minimieren. Da Beleuchtung nicht immer ganz vermieden werden kann, gilt es:

- Schutzgebiete zu entwickeln, die weitgehend vor Lichtimmissionen geschützt werden. Kriterien für Lichtschutzgebiete werden durch die International Dark Sky Association (IDA) gestellt, welche auf den Erhalt der Nachthimmelshelligkeit für das Erleben des Kulturgutes Nachthimmel fokussieren. Eine zunehmende Anzahl an Studien weist darauf hin, dass Lichtschutzgebiete auch für den Artenschutz sinnvoll wären (z. B. Kronfeld-Schor et al. 2013; Azam et al. 2015; Brüning/Hölker 2015; van Grunsven et al. 2017). Allerdings sollten die Kriterien für Lichtschutzgebiete zum Schutz der Erhaltung des Nachthimmels unbedingt um Kriterien für den Artenschutz erweitert werden. Diese sollten Hand in Hand mit aktuellen Bemühungen gehen, zusammenhängende Lebensraumkorridore und Grünbrücken zu entwickeln (Reck et al. 2017).
- Die Beleuchtungsstärke außerhalb der Schutzgebiete in den unterschiedlichen Umweltzonen bis hinein in die Innenstädte zu regulieren und eine zeitliche Anpassung der Beleuchtungsstärke an die vorherrschende Nutzung der Infrastruktur vorzunehmen.
- Wenn möglich, die Lichtverteilungskurven von Leuchten nach unten auszurichten. Es sollte auf Abstrahlung in die Horizontale oder in den oberen Halbraum weitestgehend verzichtet werden. Für Verkehrsflächen bieten voll abgeschirmte Leuchten, die im installierten Zustand nur Licht unterhalb der Horizontalen abstrahlen (ULR = 0 %) und möglichst wenig blenden, z. B. entsprechend der Lichtstärkeklasse G6, die bisher

¹ Karten von weltweiten Schutzgebieten, welche mit Satellitendaten (DMSP/OLS) verglichen wurden <https://protectedplanet.net/> (IUCN & UNEP, aufgerufen Juni 2013 von Gaston et al., 2015)

nachhaltigste Form einer Straßenbeleuchtung, welche am wenigsten außerhalb des Nutzungsraumes abstrahlt.

- Die spektrale Zusammensetzung des Lichtes so weit möglich auf über 500 nm zu beschränken. Für Außenlichtanlagen sind Farbtemperaturen von weniger als 3000 Kelvin anzustreben, denn die relevantesten Auswirkungen auf empfindliche Taxa (Insekten, höhere Wirbeltiere, etc.) werden durch kurzwelliges Licht hervorgerufen.

Der Lichtimmissionsschutz ist im heutigen gesetzlichen Rahmen nur bruchstückhaft und enthält viele subjektive Variablen (Hofmeister 2013). Fehlende Standards für Mess- und Bewertungsverfahren erschweren die Durchsetzung von Regulierungen und wichtige Bereiche, wie die Beleuchtung von Verkehrswegen, welche einen Hauptanteil der Gesamt-Lichtemissionen ausmachen (Kuechly et al. 2012), sind von der Vermeidungspflicht des Bundes-Immissionsschutz-Gesetzes (BImSchG) ausgenommen. Die Arbeitsgemeinschaft Bund/Länder für Immissionsschutz (LAI), bewertet Lichtimmissionen als schädliche Umwelteinwirkung, wenn durch Art, Ausmaß und Dauer Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder für die Nachbarschaft zu erwarten sind. Neben dem BImSchG bieten Raumordnungsgesetz (ROG), das Bundes-Baugesetzbuch (BauGB) sowie das Bundes-Naturschutzgesetz (BNatSchG) Möglichkeiten die Vorhabenplanung von Außenlichtanlagen zu regulieren. Die Bauleitplanung und die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung bieten Möglichkeiten, Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft durch Lichtimmissionen während der Vorhabenplanung zu bewerten und notwendige Vermeidungs- oder Kompensationsmaßnahmen zu definieren. Dafür müssen allerdings vorerst die Erheblichkeit und Nachhaltigkeit einer Beeinträchtigung nachgewiesen werden.

Als Handlungsempfehlung wird in diesem Gutachten vorgeschlagen, nicht die schwer nachweisbare Erheblichkeit und Beeinträchtigung der Lichtimmission durch das Wissenschaftsprinzip zu bewerten, sondern die Lichtemission dem Verursacher nach dem Vorsorgeprinzip anzulasten (Verursacherprinzip). Weiterhin sollte zumindest in Schutzgebieten die Straßenbeleuchtung in Mess- und Bewertungsverfahren aufgenommen werden. Als Berechnungsmodell könnten hierfür Modelle wie das von Brons et al. (2008) Anwendung finden, das eine virtuelle Berechnungsbox um ein beleuchtetes Objekt beschreibt zur Berechnung der Lichtmengen, welche die Ebenen in jede Richtung kreuzen. Mit einer geeigneten Software (z. B. Relux oder DIALux) könnte so jedes Objekt nach dem Verursacherprinzip bemessen bzw. bewertet und Vermeidungs- oder Kompensationsauflagen definiert werden. Heute sind aber weder Grenzwerte für die Lichtemission definiert, noch kann die auf dem Markt befindliche Kalkulationssoftware für Lichtplanungen die Gesamtmenge des reflektierten Lichtstroms von Leuchten je nach Oberflächenbeschaffenheit berechnen. Hier besteht hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Denn, Regulierungen für die Bemessung von Lichtimmissionen sind dringend erforderlich. In bis zu 42% der ausgewiesenen Naturschutzgebiete weltweit ist eine Erhellung des Nachthimmels nachweisbar (Gaston et al. 2015) und anhand konkreter Kartierungen der Straßenbeleuchtung in Naturparks zeigt sich, dass die Beleuchtung oftmals veraltet und schlecht abgeschirmt ist und deshalb durch nichtintendierte Abstrahlung zur Erhellung der Nachthimmelslandschaften übermäßig beiträgt (Labuda et al. 2015).

Maßnahmen der Bundesrepublik zum Schutz von Klima, Ressourcen und Umwelt sollten durch Kriterien für Lichtimmissionsschutz erweitert und optimiert werden. Die Klimaschutzziele können beispielsweise durch folgende Maßnahmen effektiv unterstützt werden: (a) regional verbindliche Lichtplanungskonzepte oder Masterpläne, (b) Reduzierung der Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte auf ein Mindestmaß, (c) zeitliche Abschaltung oder Reduzierung der Beleuchtungsstärke angelehnt an das tatsächliche Verkehrsaufkommen, (d) Bemessung der umweltrelevanten Lichtimmission nach dem Verursacherprinzip und (e) Aufnahme der Straßenbeleuchtung in die Vermeidungspflichtenregelung des BImSchG.

Bereits bestehende Richtlinien für die Vermeidung von Lärm bieten eine gute Grundlage, um sie für Lichtimmissionsschutzrichtlinien auszubauen, denn die Auswirkungen von Lärm und Licht in der Nacht bewirken vergleichbare biologische Effekte und unterliegen ähnlichen Anforderungen der Bewertung und Bemessung. Normen für die Planung von Lichtanlagen im Außenraum beinhalten größtenteils nur Mindestanforderungen für die Sicherheit, es fehlen aber Verordnungen, Richtlinien und Höchstwertbemessungen für die Reduzierung der negativen, nichtintendierte Auswirkungen durch die Beleuchtungsanwendungen im Außenraum, wie sie für Lärm schon formuliert sind.

In die normativen Regelungen für Straßenbeleuchtung sollten Grenzen für nichtintendierte Lichtimmissionen eingebunden werden, denn es ist von negativen Auswirkungen auf die Biodiversität auszugehen. Es sollten Höchstwertbemessungen für die Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte definiert (Lang 2013) und der Farbwiedergabeindex sollte für Mindestanforderungen in Normen berücksichtigt werden (Fotios/Goodman 2012).

Die höchste Kriterienklasse für Straßenleuchten (G6, ULR 0%) bietet zum heutigen Zeitpunkt den besten Schutz vor nichtintendierten Lichtimmissionen. Diese Klasse deckt jedoch nicht Lichtimmissionen auf die bevorzugte Flughöhe vieler Insekten zwischen 5,4 und 1,7 m ab (Soneira 2013). Im Rahmen der nationalen Bemühungen zum Erhalt der Artenvielfalt sollten daher vor allem für Anwendungen in Schutzgebieten, weitere Kriterien für die Lichtverteilungen von Straßenleuchten entwickelt werden, um mögliche Barriereeffekte in der typischen Flughöhe von Insekten zu vermeiden.

Weitere Initiativen, welche idealen Raum für Immissionsschutzregelungen bieten, sind das „Grüne Band Europa“ und auf nationaler Ebene das „Grüne Band“ sowie das „Blaue Band“. Diese Initiativen könnten genutzt werden, um flächenverbundene Lichtschutzzonen in die Renaturierung von Bundeswasserstraßen einzubinden und den groß angelegten Lebensraumkorridor des ehemaligen Grenzverlaufs des „Eisernen Vorhangs“ als Lichtschutzgebiet zu erklären. In diesem Zuge sollte auch die Initiative des Schutzgebietssystem Natura 2000 in Europa durch strengere Kriterien für den Lichtimmissionsschutz erweitert werden. Dies wäre ein wichtiger Schritt, um Lebensraumkorridore aufzubauen und zu schützen, welche die Erhaltung von Flora und Fauna trotz einer immer dichteren Besiedelung unterstützen.

Forschungsbedarf besteht zu Fragen der optimalen Voraussetzungen für die Kontrastwahrnehmung des Menschen, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Farbwiedergabeindexe von Leuchtmitteln, um Mindestanforderungen für Beleuchtungsstärkeniveaus genauer definieren zu können. Denn durch die Reduzierung der

Beleuchtungsstärke und der Leuchtdichte kann die allgemeine Erhellung der Nachtlandschaften reduziert werden. Der Einfluss, den diese jährlich steigende Erhellung der Nachtlandschaften auf das Insektensterben (Vogel 2017) hat, muss dringend erforscht werden, um lebenswichtige Ökosystemfunktionen erhalten zu können. Dabei ist es besonders wichtig, die Barrierewirkung durch Beleuchtungsreihen zu analysieren. Vor allem an Gewässern werden Uferpromenaden und Brücken oftmals übermäßig beleuchtet; über die Auswirkungen auf die Wanderkorridore von Vögeln, Fledermäusen und Fischen liegen allerdings bislang noch unzureichend Studien vor. Auch Primärproduzenten, welche die Grundlage vieler Ökosysteme bilden, werden durch künstliches Licht in der Nacht beeinträchtigt (Hölker et al. 2015; Grubisic et al. 2017). In wieweit diese Beeinträchtigungen durch unterschiedliche Beleuchtungsstärken und Farbspektren manipuliert werden und welche Auswirkungen auf höhere Nahrungsnetzebenen zu erwarten sind, muss dringend erforscht werden. Auch die Vertikalwanderung in Gewässern wird bei vielen Organismen unterdrückt (Moore et al. 2001; Oppedal et al. 2001; Villamizar et al. 2011). Welche Ökosystemprozesse dadurch beeinträchtigt werden könnten ist heute noch nicht erforscht. Letztlich ist anzunehmen, dass im Zuge der Klimaerwärmung Temperatur-Schwellenwerte für saisonales Verhalten von Flora und Fauna nicht mehr unterschritten werden (Cathey/Campbell 1975; Porter et al. 1999) und die Signalfunktion des Lichtes einen höheren Stellenwert erlangen könnte. Es ist dringend erforderlich zu analysieren wie sich der global ansteigende Faktor Licht im Kontext der Klimaerwärmung auf Ökosysteme und -funktionen auswirken wird (Miller et al. 2017).

1. Einführung

Der Einsatz von künstlichem Licht in der Nacht nimmt exponentiell zu (siehe dieses Gutachten, Themenfeld 1). Treibende Faktoren sind steigende Anforderungen der modernen 24-Stunden Gesellschaft an die Lichtumgebung, überwiegend positive Assoziationen mit Licht und der technische Fortschritt, der immer effizientere Beleuchtungstechnologien anbietet. Außenbeleuchtung und vor allem nichtintendierte Lichtemissionen können Mensch und Natur negativ beeinflussen. Erst seit wenigen Jahren werden diese Auswirkungen des künstlichen Lichts zu jenen Immissionen gezählt, welche unzulässige Nachteile oder Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft hervorrufen können (§ 3 des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG)).

Das deutsche Straßennetz umfasst heute rund 12.993 km Bundesautobahnen und rund 38.303 km Bundesstraßen und bildet damit eines der dichtesten Fernstraßennetze Europas.² Dieses Bundesstraßennetz verbindet Landes-/Staats-, Kreis- und Gemeindestraßen, welche von den Bundesländern, Kommunen und Gemeinden unterhalten werden müssen. In Brandenburg gibt es beispielsweise 3000 Kilometer Kreisstraßen und geschätzt etwa 12.000 Kilometer Gemeindestraßen³. Gesäumt werden vor allem die letztgenannten Kategorien bundesweit mit

² Bundesverkehrsministerium, Artikel Investitionen in die Bundesfernstraßen, 01.01.2016:

<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/investitionen-in-die-bundesfernstrassen.html>

³ Ministerium für Infrastruktur und Landesplanung (2017),

<http://www.mil.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.401008.de>

bereits über neun Millionen Leuchten⁴. Die öffentliche Straßen- und Wegebeleuchtung macht daher einen hohen Anteil der gesamten Lichtemissionen in Deutschland aus (Kuechly et al. 2012). Die bundesweite Straßen- und Wegebeleuchtung verbraucht jährlich rund vier Terrawattstunden Strom.⁵ Oft wird hier Energie verschwendet, weil unbenutzte Plätze trotz geringem oder keinem Infrastrukturaufkommen zu hell beleuchtet werden, oder Sicherheitsbeleuchtungen einem „Wettrüsten“ mit gewerblicher oder privater Beleuchtung unterliegen und auf Grunde dessen das gesamte Beleuchtungsniveau angehoben wird (Abb. 1).

Die menschliche visuelle Wahrnehmung hat sich evolutionär an die Lichtverhältnisse des Tages angepasst. Über die Hälfte aller auf der Erde registrierten Tiere sind hingegen an die Dämmerung oder die Nacht adaptiert (Hölker et al. 2010a). Sie verfügen daher über ausgeprägte visuelle Fähigkeiten für eine optimale Sichtbarkeit zu Konditionen, die für den Menschen relativ dunkel erscheinen. Fast allem Leben liegt evolutionär ein zirkadianer Rhythmus zu Grunde, der hauptsächlich durch Licht gesteuert wird. Künstliches Licht in der Nacht kann diesen Rhythmus stören mit unvorhersehbaren Folgen auf den entsprechenden Organismus und sein Habitat Ökosystem, in denen dieser lebt.

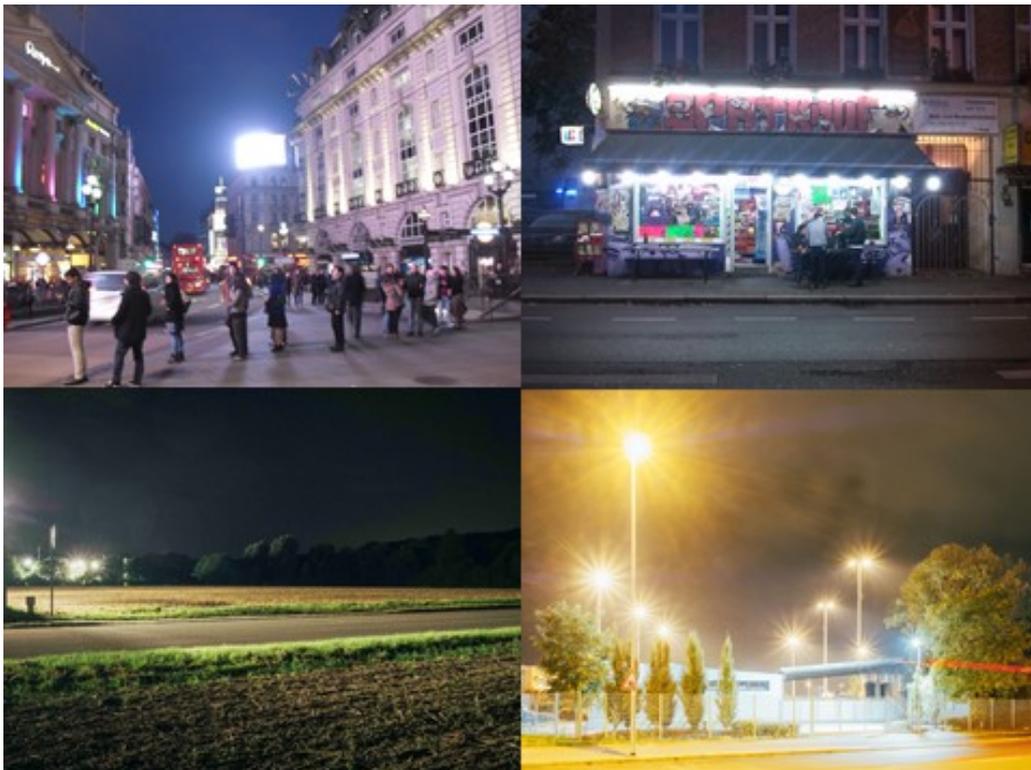


Abbildung 1: Beispiele für gewerbliche und private Beleuchtung, welche den Zielraum überstrahlt. Bilder zur Verfügung gestellt mit freundlicher Genehmigung von Dietrich Henckel (links oben), Adrian Lorberth (rechts oben) und Volker Crone (r. und l. unten).

⁴ Geschätzte Zahl, denn es gibt kein Kataster für öffentliche Straßenbeleuchtung

⁵ <http://www.wiwo.de/technologie/green/living/strassenbeleuchtung-superspar-laternen-erobern-die-staedte/13545652.html>

Es ist bekannt, dass Wandervögel durch künstliches Licht in der Nacht angezogen von ihren Routen abkommen und sich in Lichtkegel verausgaben, auf Schiffen vor Erschöpfung neben ihren natürlichen Feinden niederlassen oder zu tausenden beim Aufprall gegen Gebäude verenden. Die Zahl der durch Kollisionen an Gebäuden verendenden Vögel wird pro Jahr allein in den USA und Kanada auf 6,8 Millionen geschätzt, Licht ist ein wichtiger Faktor für diese Kollisionen (Longcore et al. 2012). An einer einzigen Straßenlaterne können in einer Nacht bis zu 1000 Insekten den Tod finden (Eisenbeis/Hassel 2000). Diese Zahlen und einzelne Studien zu Auswirkungen durch künstliches Licht auf unterschiedliche Taxa sind ein erster Schritt für Einschätzungen der ökologischen Relevanz von Beleuchtung. Eine tiefgehende Analyse der Literatur ist weiterhin notwendig, um belastbare Aussagen über ökologische und ökonomische Auswirkungen durch Lichtverschmutzung leisten zu können.

Das vorliegende Gutachten soll einen Überblick geben zu dem derzeitigen Verständnis über die Auswirkungen der künstlichen Beleuchtung in der Nacht auf Tiere und Pflanzen – eine Technologie, welche fast alle menschlichen Aktivitäten nach Einbruch der Dunkelheit begleitet.

Nachdem wir die Auswirkungen auf Flora und Fauna einordnen, möchten wir darauf aufbauend Handlungsempfehlungen nach lichtplanerischen Gesichtspunkten gliedern: (i) Beleuchtungsstärke, (ii) zeitliche Lichtabschaltung, (iii) Lichtverteilungskurven oder Abstrahlungsgeometrie und (iv) spektrale Zusammensetzung des Lichtes. Die Handlungsempfehlungen sollen Lösungen aufzeigen, wie der gegenwärtige Wissensstand menschliche Bedürfnisse an Beleuchtung mit den Erfordernissen für den Natur- und Umweltschutz intelligent und effizient miteinander verbinden könnte. Beleuchtungskonflikte, z. B. wenn der Artenschutz entgegen ästhetischer Beleuchtungskonzepte steht, wird es geben, aber die sind relativ gering, denn die Maßnahmen für den Schutz natürlicher Nachtlandschaften korrelieren mit bestehenden Maßnahmen zum Schutz der Umwelt, des Klimas, und von Ressourcen.

Die Empfehlungen dieses Gutachten sollen Vorschläge für zukünftige Lichtplanungen im Außenraum aufzeigen, um Artenschutz als integralen Bestandteil einer qualitativ hochwertigen und nachhaltigen Beleuchtung zu definieren und um Empfehlungen für den Einsatz moderner Beleuchtungstechniken im Sinne des Artenschutzes auszusprechen. Diese Handlungsempfehlungen für nachhaltige Beleuchtungsplanung werden weiterhin im Kontext bestehender Umweltschutzmaßnahmen der Bundesregierung für Ressourcen und Klimaschutz diskutiert und mögliche Handlungsoptionen für die Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt aufgezeigt.

Zum Schluss werden wir im Hinblick auf die Entwicklung nachhaltiger Beleuchtungstechnologien auf Wissenslücken eingehen, um Arten, Lebensräume und Ökosysteme zu schützen mit dem langfristigen Ziel, die rasante Abnahme der biologischen Vielfalt abzumildern.

Die Gliederung und Methodik dieses Gutachtens befolgt folgenden Aufbau:

1. Die Literaturrecherche über den aktuellen Stand der Forschung zu den Auswirkungen von künstlichem Licht auf Flora und Fauna wurde nach der Methode von Pullin et al. (2016)

durchgeführt. Es wurde dafür eine schlüsselwortbasierende Suche auf der Basis von „Web of Science“ und „Google Scholar“ durchgeführt sowie Experten befragt⁶. Wir verfolgten dabei den Anspruch, vor allem die relevanten Ergebnisse zum Thema Auswirkungen künstlichen Lichts auf Flora und Fauna zu listen. Die Ergebnisse der Studien werden nach Methodik, Ergebnis, Taxa und Standort in Excel-Tabellen gelistet.

2. Die Ergebnisse der Literaturrecherche wurden analysiert, es wurden die behandelten Methoden, Versuchsdesign und Lichtmetriken bewertet und die Relevanz der Studien für den potenziellen Einfluss durch künstliches Licht auf verschiedene Organismen und Tierklassen herausgearbeitet.
3. In der Zusammenfassung und Diskussion wurde beurteilt, ob es gesicherte Nachweise für die jeweiligen Auswirkungen gibt und welche Taxa von den Verhaltensänderungen betroffen sein könnten. Es wurde weiterhin beschrieben, für welche Wirkungsbereiche es vermehrt Hinweise gibt und welcher Forschungsbedarf noch notwendig ist, um gesicherte Aussagen für wichtige, insbesondere naturschutzrelevante, Organismen leisten zu können.
4. Unter Berücksichtigung aller verfügbaren Methoden wurden Handlungsempfehlungen ausgearbeitet für einen nachhaltigen Umgang mit künstlichem Licht in der Nacht, sowie notwendige Schutzmaßnahmen für einzelne Organismengruppen beschrieben.
5. Die Bewertung von Lichtimmissionen wurde weiterhin behandelt und Vorschläge für notwendige lichtplanerische Kalkulationsmodelle gegeben.
6. Bestehende Maßnahmen und Initiativen der Bundesrepublik zum Schutz von Umwelt, Klima und Ressourcen wurden beschrieben und mögliche Anknüpfungspunkte für Regulierungen von Lichtimmissionen aufgezeigt.
7. Schließlich fassten wir zusammen, welche Wissenslücken zum Thema Auswirkungen von künstlichem Licht auf Flora und Fauna heute noch bestehen.

Die Ergebnisse des Gutachtens können auf Transfer-Workshops diskutiert werden und es werden Beratungsgespräche für unterschiedliche Akteurs- und Interessensgruppen angeboten.

2. Auswirkungen von künstlichem Licht in der Nacht auf Fauna und Flora

Tiere und Pflanzen sind auf deutliche rhythmische Unterschiede in der Wahrnehmung ihrer Lichtumgebung angewiesen, um ihr saisonales und tagesrhythmische Verhalten und die damit verbundenen physiologischen Prozesse mit der Außenwelt synchronisieren zu können. Die Eigenschaften dieser endogenen Rhythmen wurden an einer Vielzahl von Tieren, Pflanzen und Mikroorganismen im Labor und im Freiland untersucht. Dabei zeigte sich, dass fast alle untersuchten Organismen Rhythmen unterliegen. Die prominentesten Rhythmen haben eine Periodenlänge von ungefähr 24 Stunden und heißen daher zirkadian (lateinisch für circa = ungefähr, dies = Tag). Zudem gibt es noch die kürzeren ultradianen Rhythmen (z. B. Herzschlag, Atmung), die längeren infradianen (z.B. Menstruationszyklus) und zirkannalen oder saisonalen Rhythmen. Licht wirkt für all diese Rhythmen als Zeitgeber, der regelmäßig

⁶ Clementine Azam (Fledermäuse), Anika Brüning (Fische), Roy van Grunsven (Amphibien und Vögel), Michal Zeman (Säugetiere)

die inneren Uhren stellt und damit alle Rhythmen untereinander und mit der Außenwelt abstimmt.

Die unterschiedlichen Lichtphasen zu Tag, Nacht, Sonnen Auf- und Untergang bieten temporale Nischen, an die sich Organismen evolutionär angepasst haben. Die Sinnesorgane und Rezeptoren für Licht haben sich auf die individuellen raum-zeitlichen Bedürfnisse eingestellt und die Kommunikation (Räuber – Beute, Partnerfindung und Eltern-Nachwuchs Beziehungen) haben sich an die Lichtverhältnisse des Habitats evolutionär angepasst. Ein Drittel der Wirbeltiere sind nachtaktiv, dazu gehören alle Fledermausarten und fast alle Amphibien. Bei den Wirbellosen sind sogar zwei Drittel der bekannten Arten nachtaktiv (Hölker et al. 2010a).

Gerade einmal 100 Jahre ist es her, dass der Mensch begann, Städte und Siedlungsräume mit elektrischem Licht auszuleuchten. Seither steigt die Erhellung der nächtlichen Hemisphäre rasant an, derzeit global im Mittel mit ca. 2-6% pro Jahr (Hölker et al. 2010a; Kyba et al. 2017). Diese Zunahme an künstlichem Licht kann Lebensräume und Lebensgemeinschaften verändern. Die Erhellung von Nachtlandschaften kann insbesondere Organismen beeinträchtigen, welche sich in den Nischen der Dämmerung und der Nacht entwickelt haben und deren Wahrnehmung sich auf die Nachtnische eingerichtet hat (Rich/Longcore 2006). Lichtinduzierte Veränderungen des Verhaltens und in der Artzusammensetzung könnten dabei kaskadenartige Auswirkungen auf Ökosysteme haben und verändern daher nicht nur die Bedingungen für nachtaktive, lichtsensible Arten, sondern auch indirekt die Bedingungen für tagaktive Arten und das Funktionieren ganzer Ökosysteme (Bennie et al. 2015; Knop et al. 2017; Manfrin et al. 2017).

Im Folgenden stellen wir Studien vor, welche Veränderungen bei einzelnen Taxa nachweisen, um diese im Gesamtkontext zu analysieren (s. Kapitel 2.3). Vorbereitend beschreiben wir in Kasten 1 die Farbtemperatur für Licht und demonstrieren anhand von einigen Bildbeispielen die in den Studien genutzten Leuchtmittel.

Kasten 1: Erklärung der Farbtemperatur mit Beispielen für unterschiedliche Leuchtmittel



2.1. Flora

Die Auswirkungen von künstlichem Licht auf Pflanzen sind in unzähligen Studien erfasst und werden weltweit in Gewächshäusern und Laboren genutzt, um beispielsweise Gemüse und Zierpflanzen über ihre natürlichen Wachstums-Rhythmen hinaus zu stimulieren. Nichtintendierte Auswirkungen durch künstliches Licht in der Nacht sind hingegen noch weitgehend unerforscht, obwohl Pflanzen, Pilze, Flechten, Algen und Periphytongemeinschaften (Aufwuchsgemeinschaften aus Grün- und Kieselalgen, Cyanobakterien u. a. Mikroorganismen) sehr stark auf Licht reagieren und ihr Wachstum oft eine essentielle Grundlage für ganze Ökosysteme darstellt.

Pflanzen antworten auf Lichtreize mit Bewegung der Stomata (Atemöffnungen) und der Chloroplasten (Zellen für die Photosynthese) sowie mit veränderten Wachstumseigenschaften. Die Signale regulieren das Wachstum nach den tagesrhythmischen und saisonalen Bedürfnissen, z. B. durch Blütenbildung, Samenreife oder Laubabwurf. Lichtverhältnisse steuern das Wachstum nach den Lichtbedürfnissen der Pflanze, beispielsweise in den Schatten oder hin zum Sonnenlicht.

Durch Straßenbeleuchtung wurde schon in den 30er Jahren Verzögerungen des Laubabwurfs bei einigen Laubbäumen festgestellt (Matzke 1936). Am stärksten betroffen von den Auswirkungen der Lichtverschmutzung sind Pflanzen, welche empfindlich auf die Tageslänge

reagieren (Chaney 2002). Künstliches Licht, vor allem die Emissionen im längerwelligen Bereich (rotes und infrarotes Lichtspektrum, siehe Kasten 1) kann die Tageslänge verlängern und die Signalwirkung für die Blüteninduktion und den Laubabwurf verändern. Ein verspäteter Laubabwurf und veränderte Blütezeiten können zur Folge haben, dass plötzlich einbrechende Fröste das Gewebe beschädigen oder die Synchronisation der Blüten mit dem Auftreten der Bestäuber beeinträchtigen. Aber warum werfen dann Bäume in der Nähe von Straßenleuchten ihr Laub überhaupt noch ab? Geschützt sind die meisten Laubbäume durch Mechanismen, welche die Phasen für Winterruhe und Reproduktion unter 12°C stärker durch Temperatur- als durch Lichtreize regeln (Cathey/Campbell 1975). Es steigt aber das Risiko der Pflanzen durch Luftverschmutzung oder Wasserdefizite geschwächt zu werden, weil das tagesrhythmische Öffnen und Schließen der Stomata unter dem Einfluss von künstlichem Licht reduziert wird und die Poren für längere Zeit geöffnet bleiben (Chaney 2002). Chaney fasst die Arbeit von Cathey und Campbell (1975) über die Empfindlichkeit unterschiedlicher Laubbäume gegenüber künstlichem Licht tabellarisch zusammen und empfiehlt Pflanzen durch zeitliche Abschaltung der Beleuchtung und Lichtlenkung vor allem vor langwelliger, rötlicher Lichteinstrahlung, zu schützen (siehe Kapitel 4.3.).

Obwohl die Regulierung von Pflanzenwachstum durch Licht in der Pflanzenproduktion eine sehr hohe Rolle spielt (siehe z. B. Johansen et al. 2011; Vänninen et al. 2010; Viršilė 2017) finden sich relativ wenige Literaturhinweise auf nichtintendierte Auswirkungen von künstlichem Licht auf Pflanzen. Manchmal wird dieser Faktor sogar komplett übersehen. Beispielsweise in einer aktuellen Studie, in der das Wachstum ruraler und urbaner Bäume über 150 Jahre an unterschiedlichen Standorten weltweit verglichen wurde (Pretzsch et al. 2017). Die Autoren diskutieren, dass die Bäume wegen der Klimaerwärmung in den Metropolen schneller wachsen, aber auch schneller altern. Während der Faktor Temperatur sehr ausführlich diskutiert wird, wird der Faktor künstliche Beleuchtung in der Nacht völlig ignoriert. In Berlin blühen die Japanischen Kirschen (*Prunus serrulata*) welche 1990 zur Wiedervereinigung aus Japan gespendet wurden teilweise schon im späten Herbst (Abb. 2). Dieser Trend wird ebenfalls in der lokalen Presse vor allem mit höheren Temperaturen diskutiert⁷. Die einzigen Standorte, an denen die Japanischen Kirschen in Berlin frühzeitig (November /Dezember) blühen, sind in unmittelbarer Nähe von Straßenleuchten (persönliche Beobachtungen, Schroer). Auch Somers-Yeates et al. (2016) zeigen in einer Studie an vier unterschiedlichen Laubbaumarten über 13 Jahre, dass eine verfrühte Knospenbildung vor allem in beleuchteten Gebieten stattfindet und nicht so stark in wärmeren, urbanen Gebieten. Der fehlende Faktor künstliche Beleuchtung in unterschiedlichen Studien zu Veränderungen des Pflanzenwachstum weist auf Wissenslücken über nichtintendierte Auswirkungen von Straßenbeleuchtung auf die physiologischen Stoffwechselprozesse unterschiedlicher Pflanzen in urbanen Ökosystemen und mögliche Interaktionen mit Herbivoren, Parasiten und Nützlingen (siehe Kapitel 6).

⁷ <http://www.tagesspiegel.de/berlin/wetter-kapriolen-vor-weihnachten-berliner-spaetherbstfruehling/12748664.html>



Abbildung 2: Japanische Kirsche (*Prunus serrulata*) am Mauerweg in Berlin, 15.11.2017. Der Baum ist in beginnender Blüte, obwohl der Laubwurf fast abgeschlossen ist. Die natürliche Blütezeit dieser Zierkirsche ist von April bis Mai. Dieser Baum ist einer von 9000 Bäumen, die als Japanische Spende zur Wiedervereinigung im Jahr 1990 gepflanzt wurden. Foto: S. Schroer.

Erste Studien weisen auch Auswirkungen durch Straßenbeleuchtung auf saisonale Lebensgemeinschaften von Mikroorganismen in aquatischen Sedimenten nach (Hölker et al. 2015). Bei einer Beleuchtungsexposition in der Stärke 7-8 lx über 5 Monate von Juli bis Dezember auf der Sedimentoberfläche eines Entwässerungsgrabens nahmen Photosynthese treibende Kieselalgen und Cyanobakterien auf der Sedimentoberfläche zu. Nach einem Jahr Exposition hatte das künstliche Licht die natürlichen Zeitgeber Tageslänge und Temperatur soweit überlagert, dass sich die Sommer- und Winterlebensgemeinschaften nicht mehr in ihrer Zusammensetzung unterschieden. In anschließenden Laborversuchen reichten den Mikroorganismen 70 lx künstliches Nachtlicht (70 lx entspricht starker Straßenbeleuchtung) während eines im Labor simulierten Sommerszenarios aus (20°C mit einem Hell-Dunkelzyklus von 16,5 Stunden Tag und 7,5 Stunden Nacht), um während der Nacht Photosynthese zu betreiben (Kyba et al. 2014), was ein zu dieser Tageszeit unnatürliches, in der Evolutionsgeschichte der Organismen noch nie dagewesenes Phänomen darstellt (Hölker et al. 2015).

In einem sub-alpinen Flusslauf wurde weiterhin durch experimentelle Beleuchtung mit 20 lx Beleuchtungsstärke auf der Wasseroberfläche in jungen Periphytonstadien eine Abnahme der Biomasse der typischen Primärproduzenten des Aufwuchs (Grün- und Kieselalgen,

Cyanobakterien) und gleichzeitige Änderung der Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft festgestellt (Grubisic et al. 2017). Diese Auswirkungen auf die frühen Periphytontadien können potenziell Bottom-Up Effekte auf höhere Ebenen des Nahrungsnetzes hervorrufen und die Funktion der Ökosysteme ändern. Auch zu diesen Effekten des Erstbewuchses von Substraten in Gewässern gibt es noch immensen Forschungsbedarf (siehe Kapitel 6).

Viele Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung auf die Flora werden indirekt durch lichtinduzierte Verhaltensänderung der Fauna hervorgerufen. Gerade die Auswirkungen der Beleuchtung auf Insekten spielen dabei eine sehr große Rolle. Veränderungen der Vegetation können aber auch durch Verhaltensänderungen von Herbivoren hervorgerufen werden, welche für die Samenausbreitung verantwortlich sind, wie Vögel (Levey 2005) und Fledermäuse (Lewanzik/Voigt 2014).

Siebzig bis neunzig Prozent der Blütenpflanzen sind auf Tiere für die Bestäubung angewiesen (Fontaine et al. 2006). Ein drastischer Insektenschwund, der in den letzten Dekaden gemessen wurde (Vogel 2017; Hallmann et al. 2017) führt höchst wahrscheinlich zu reduzierten Ökosystemfunktionen. Durch den Verlust einzelner Bestäubertypen, welche beispielsweise auf spezifische Blütenformen angepasst sind, wird die Stabilität im Gefüge von Pflanzengemeinschaften gefährdet und anderen Insekten gehen wiederum wichtige Nahrungsquellen verloren (Fontaine et al. 2006). Welche Rolle dabei die Auswirkungen von künstlichem Licht auf nachtaktive Bestäuber hat, ist heute noch vergleichsweise wenig erforscht. MacGregor et al. (2015) listen 289 Pflanzenarten, welche nachweislich zumindest teilweise auf Nachtbestäubung angewiesen sind. Eine experimentelle Beleuchtung in bisher unbeleuchteten Regionen der Schweizer Voralpen zeigte Auswirkungen auf das Verhalten von Nachtbestäubern in der Nähe von künstlichen Lichtquellen. Die Fruchtbildung einer Distelart (*Cirsium oleraceum*), welche zum großen Teil auf Nachtbestäubung durch Insekten angewiesen ist, wurde dadurch um 13% reduziert. Die Tagbestäuber konnten dabei die verringerte nächtliche Bestäubung nicht ausgleichen. Die geringere Fruchtbildung kann wiederum zu indirekten Systemeffekten führen, da sich viele Tagbestäuber von den Früchten ernähren, was sich wiederum auf das Angebot der tagbestäubenden Insekten und damit auf deren Leistung auswirken könnte (Knop et al. 2017). Der Verlust einzelner spezifischer Funktionen kann demnach Konsequenzen für die Struktur von Lebensgemeinschaften und Ökosystemprozesse nach sich ziehen, welche sich kaskadenartig in Ökosystemen ausweiten (Bennie et al. 2015).

2.2. Fauna

2.2.1. Insekten und andere Arthropoden

Arthropoden (insbesondere Insekten) sind in fast allen Lebensräumen der Erde, auf Wiesen, in Gärten, im Wald und in Gewässern zu finden und erfüllen dort wesentliche Funktionen: (1) Viele Tiere (Vögel, Frösche, Eidechsen, Fische, etc.) ernähren sich vor allem von Arthropoden oder deren Frühstadien. (2) Die meisten Bäume und Sträucher werden von Insekten bestäubt. (3) Zudem sind Arthropoden wichtige Regulatoren der Nährstoff- und Energieflüsse, indem sie beispielsweise die Abbauprozesse von organischem Material

(Pflanzen, Tiere, aber auch Kot) beschleunigen. Da ein Großteil der Arthropodenarten nachtaktiv ist und extrem empfindlich auf künstliches Licht in der Nacht reagiert, muss mit deutlichen Auswirkungen gerechnet werden.

Neuere Langzeitstudien bewerten den Rückgang von Insekten regional auf ca. 80% der Insektenbiomasse (Vogel 2017; Hallmann et al. 2017). Noch gibt es aber kaum Studien über die quantitativen Verluste unterschiedlicher Insektenordnungen. In Großbritannien wurde in Langzeitstudien herausgefunden, dass einige Falterpopulationen um bis zu 30% pro Jahr schwinden (Conrad et al. 2006). Als Gründe für den Rückgang werden hauptsächlich Landnutzung und Pestizideinsatz genannt, die Gefährdung von Insektenarten durch den Faktor künstliches Licht wird heute noch sehr wenig diskutiert. Hallmann et al. (2017) greifen zwar direkte Lichteinwirkung in einem Berechnungsmodell auf, berücksichtigen aber nicht die allgemeine Aufhellung in den Referenzgebieten, denn selbst in weltweit ausgewiesenen Naturschutzgebieten⁸ wird die Erhellung der Nachtlandschaften auf 42% geschätzt (Gaston et al. 2015). Eine 30ig jährige Studie über die Entwicklung von Falterpopulationen in den Niederlanden zeigt deutlich, dass tagaktive Arten weniger gefährdet sind als nachtaktive Arten und letztere umso gefährdeter sind, umso lichtsensitiver sie sind (van Langevelde et al. 2017). Inwieweit unterschiedliche Insektenarten durch den Faktor künstliches Licht in der Nacht in welcher Quantität gefährdet sind und welche Ökosystemfunktionen dadurch betroffen sein könnten, ist heute unzureichend erforscht (Kapitel 6). Hier besteht dringender Handlungsbedarf, denn Licht in der Nacht wirkt wie ein Staubsauger (Eisenbeis 2006). Eine Straßenleuchte alleine kann bis zu tausend Insekten in einer Nacht anziehen (Eisenbeis/Hassel 2000). Diesen „Staubsaugereffekt“ der Lampen nutzen insektivore Räuber wie manche Spinnen oder einige Fledermausarten. Viele andere Arten sind hingegen sehr lichtscheu. Sie müssen sich mit den Insekten begnügen, die nicht von Beleuchtung „angesaugt“ werden. Dass einige Insektenjäger vom künstlichen Licht profitieren, anderen aber weniger Nahrung in der Dunkelheit zur Verfügung steht, kann langfristig zu Verschiebungen ganzer Nahrungsnetze und der Artenzusammensetzung von Ökosystemen führen (Manfrin et al. 2017) (siehe auch Kapitel 2.2.4. und 2.2.6.).

Obwohl an Straßenleuchten um die 70% mehr Falter zu beobachten sind, als an unbeleuchteten Standorten, sinkt die Artenvielfalt der Falter um über 25% an beleuchteten Standorten (MacGregor et al. 2017). Die Autoren stellen weiterhin fest, dass die Falter an beleuchteten Standorten deutlich weniger Pollen tragen, als in natürlicher Dunkelheit, wo Pollen von mindestens 28 Pflanzenarten an Nachtfaltern nachgewiesen wurden. Damit wird die Reproduktionsleistung von Pflanzen gemindert (siehe Kapitel 2.1.). Zusätzlich produzieren Nachtfalter selbst unter Beleuchtung auch weniger Pheromone, das heißt ihre eigene Reproduktionsleistung nimmt ebenfalls ab (Geffen van et al. 2015). Hinzu kommt, dass vor allem männliche Nachtfalter stärker von künstlichem Licht angezogen werden als weibliche Falter (Altermatt et al. 2009; Degen et al. 2016). Die kontinuierliche Entnahme von männlichen Faltern vor der Reproduktion können empfindliche Arten in ihrer Existenz bedrohen, denn ab einer gewissen Prozentzahl Verlust der Paarungsmöglichkeiten, schwindet

⁸Karten von weltweiten Schutzgebieten, welche mit Satellitendaten (DMSP/OLS) verglichen wurden <https://protectedplanet.net/> (IUCN & UNEP, aufgerufen Juni 2013 von Gaston et al., 2015)

die Population (Degen et al. 2017). Allerdings konnten Degen et al. (2016) keine geschlechtsspezifischen Unterschiede bei der Ausbreitung von Nachtfaltern feststellen. Einige Arten können sich möglicherweise evolutionär an die neue Lichtsituation anpassen (Altermatt/Ebert 2016) oder haben dies bereits getan. Durch regelmäßiges Abschalten des Lichtes, und damit des Faktors für die Mortalität, könnten solche Adaptationseffekte unterstützt werden (Degen et al. 2017). Anpassungen einiger Arten könnten jedoch auf Kosten einer geringeren regionalen genetischen Vielfalt gehen, da Arten mit schlechteren Anpassungsfähigkeiten an erhöhte nächtliche Lichtexpositionen, stärker dezimiert werden oder ganz verloren gehen könnten.

Je breiter das Spektrum des Lichtes eines Leuchtmittels, umso mehr Insekten sind von dieser Wirkung betroffen (Davies et al. 2013). Die Attraktion auf Licht in der Nacht ist abhängig von der Art und dem Habitat aus dem die Insekten kommen. Die Augengröße von Nachtfaltern korreliert positiv mit der Attraktion an Lampen und die Wellenlänge des Lichtspektrums zeigt eine negative Korrelation (van Langevelde et al. 2011). Das bedeutet, dass Nachtfalter mit Augen, welche besser für Nachtsicht ausgerichtet sind, sensibler auf Licht reagieren, als Nachtfalter mit kleineren Augen und dass kurze Wellenlängen eine höhere Attraktion ausüben als längere (siehe dazu Kasten 1). Die von der EU bereits per Verordnung vom Markt gerufene Quecksilberdampf-Hochdrucklampe (MV) zeigt bis zu siebenfach höhere Attraktion, als andere Leuchtmittel (Grunsvan et al. 2014). Rydell (1992) ermittelt ein höheres Aufkommen von Insekten an MV-Straßenlampen im Vergleich zu Natriumdampf-Hochdrucklampen (HPS). Diese ziehen wiederum mehr Insekten an als Natriumdampf-Niederdrucklampen (LPS). Durch Filter, welche auf Halogen-Metalldampflampen (Hg) installiert Wellenlängen unter 420 nm ausschließen, kann die Attraktion auf Insekten um den Faktor sechs und auf Nachtfalterarten um den Faktor vier reduziert werden im Vergleich zu ungefilterten Hg-Leuchten. Eine ähnlich reduzierte Attraktion für viele Arten und auf die Insektenbiomasse allgemein stellen die Autoren auch für gelbe Natriumdampfbeleuchtung fest (Verovnik et al. 2015).

LED-Technologie wird oft gerühmt für die besonders insektenfreundliche Wirkung. Im Grunde genommen ist diese Aussage aber alles andere als gesichert. Eisenbeis/Eick (2011) weisen 80% weniger Attraktion auf LED im Vergleich zu MV für viele Insektenordnungen nach. Auch im Vergleich zu HPS Lampen schneiden LED Lampen ein wenig besser ab. Huemer et al. (2011) bestätigen diese Ergebnisse, als Grund für die geringere Attraktion diskutieren sie, dass die LED Lampen kaum bis keine UV-Lichtemissionen aufweisen. Auch in der Studie von Longcore et al. (2015) wird abhängig zur Art eine geringere Attraktion durch LED auf Arthropoden bestätigt. Beim Vergleich von warm-weißen (2700 K) und neutral-weißen (3510 K) LEDs zeigt sich in diesen Studien eine geringere Attraktion für viele Arthropodenarten auf warme Farbtemperaturen. Pawson/Bader (2014) widersprechen allerdings diesen Studien, sie zeigen, dass vor allem die Insektenordnungen der Falter (Lepidoptera) und Zweiflügler (Diptera) stärker von LED Lampen als von HPS angezogen werden, unabhängig zur Farbtemperatur des emittierenden Lichts. Die Autoren machen vor allem den höheren Anteil der kurzwelligeren Lichtemissionen der LED-Lampen verantwortlich. Die Unterschiede der Ergebnisse können auf einen unterschiedlichen Experimentalaufbau der Studien zurückzuführen sein, denn nicht nur die spektrale Zusammensetzung sondern auch

die Beleuchtungsstärke und die Lichtverteilungskurve unterscheiden sich zum Teil stark bei den unterschiedlichen Leuchtmitteln und nehmen daher Einfluss auf die Attraktion von Insekten. Dringend werden Studien benötigt, welche LED mit anderen Leuchtmitteln bei vergleichbarer Beleuchtungsstärke und Abstrahlungsgeometrie bewerten. Weiterhin berücksichtigt keine dieser Studien mögliche Flicker Effekte der LED-Beleuchtung. Die Frequenz der Leuchtdichteschwankungen in LEDs kann für den Menschen kaum wahrnehmbar sein, bei Insekten können die Schwankungen aber zu Irritationen führen und daher eine geringere oder eventuell auch stärkere Attraktion ausüben (Barroso et al. 2017).

Mit Hilfe einer Experimentalinfrastruktur, welche angelehnt an ein modernes Straßenbeleuchtungssystem in einem bisher natürlich dunklen Grünlandgebiet sowohl parallel als auch senkrecht mit jeweils drei Reihen Straßenleuchten á vier Leuchten zu einer Uferlinie eines Drainagegrabens installiert wurde, ist es möglich, die Wirkung von Straßenbeleuchtungsreihen zu untersuchen und nicht nur die Wirkung einzelner Beleuchtungsquellen (Holzhauer et al. 2015). So konnte beispielsweise ein Barriereeffekt für Nachtfalter durch die Reihenschaltung von Straßenbeleuchtungssystemen nachgewiesen werden (Degen et al. 2016). Anhand der Insektenfänge an den einzelnen Leuchten des Experimentalfeldes (Abb. 3) erstellte Degen et al. (2016) ein Modell, um die Attraktionsradien verschiedener Insekten errechnet zu können. Auf HPS Beleuchtung reagieren Nachtfalter in Attraktionsradien von über 20 m. Bei Mastabständen von 20-45 m in der Europäischen Straßenbeleuchtung überschneiden sich diese Radien, was bedeutet, dass Nachtfalter sehr viel Zeit und Energie an solchen Barrieren verbrauchen, die später beispielsweise für eine erfolgreiche Fortpflanzung fehlen. Nachtlandschaften können durch solche Lichtbarrieren fragmentiert werden, das heißt, sie verkleinern, zerteilen und isolieren Lebensräume. Die Zerschneidung und Fragmentierung der Landschaft gilt als wesentliche Ursache für den Rückgang von Tier- und Pflanzenarten und die Gefährdung der Artenvielfalt (Biodiversität) (Reck et al. 2017). Eine Umrüstung der Straßenbeleuchtung auf LED (4000 Kelvin) von HPS bei vergleichbarer Lichtverteilungskurve ergab, dass zwar insgesamt weniger Insekten gefangen wurden, die Attraktionsradien sich aber vor allem für aquatische Insekten vergrößerten, z. B. für Eintagsfliegen (Ephemeroptera) (Daten noch unveröffentlicht). Ähnliche Ergebnissen einer höheren Attraktivität einzelner Insektenarten auf LED finden sich in der Studie von Huemer et al. (2011, S. 13). Diese Studie wurde in einem Waldökosystem durchgeführt, es wurde die Attraktion auf Insekten im Direktvergleich unter anderem zwischen kaltweißen und warmweißen LED mit HPS verglichen (Tab. 1).

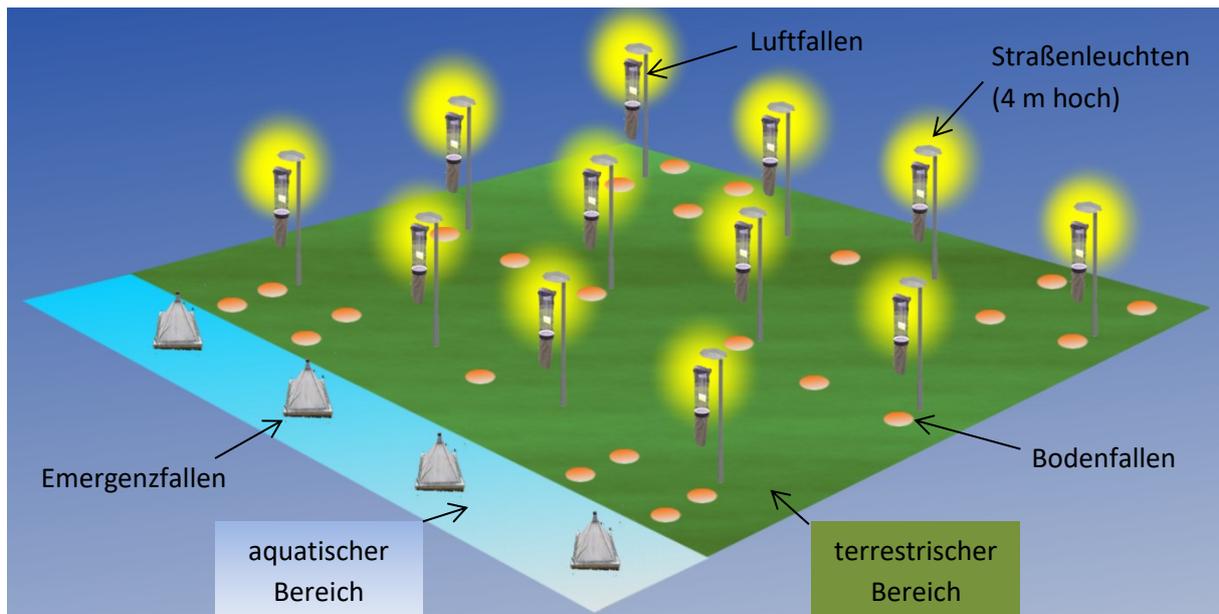


Abbildung 3: Experimentalinfrastruktur angelehnt an ein modernes Straßenbeleuchtungssystem zur Forschung an strukturellen und funktionellen Auswirkungen von künstlichem Licht auf ein aquatisch-terrestrisches Ökosystem. Illustration A. Manfrin.

Tabelle 1: Insektenfänge an LED, kalt- und warm-weiß, im Direktvergleich mit HPS (Natriumdampf-Hochdruck) Leuchtmitteln nach Huemer et al. (2011)

Taxa	LED kalt-weiß 2*25W, 6000 K	LED warm-weiß 2*25W, 3000 K	HPS 70W, 2000 K
Schaben (Blatodea)	6	2	5
Käfer (Coleoptera)	111	95	116
Zweiflügler (Diptera)	82	52	85
Kleine Dipteren (<2mm)	1931	1699	3360
Eintagsfliegen (Ephemeroptera)	28	21	11
Wanzen (Heteroptera)	154	115	167
Zikaden (Auchenorrhyncha)	26	28	50
Pflanzenläuse (Sternorrhyncha)	36	30	69
Falter (Lepidoptera)	167	122	469
Hautflügler (Hymenoptera)	174	127	236
Neuroptera (Nutzflügler)	18	24	24
Köcherfliegen (Trichoptera)	2	2	1
Staubläuse (Psocoptera)	137	93	108

Die Insektenfänge in dieser Experimentalstruktur (2012-2016) zeigen, dass der Anteil an aquatischen Insekten überproportional zunimmt und dass sich das Verhältnis der Insektenordnungen im Vergleich zu dem Verhältnis ohne Beleuchtung im gleichen Gebiet verschiebt (Manfrin et al. 2017). Diese Verschiebungen im Ökosystem wirkt sich auch auf Prädatoren wie Spinnen, Weberknechte und Fledermäuse aus (Manfrin et al. 2017; Davies et al. 2012; Rydell 1992) und kann sich, wie schon erwähnt, kaskadenartig auf das gesamte Nahrungsnetz ausweiten (Bennie et al. 2015).

Ein weiteres Problem für die Reproduktion von aquatischen Insekten ist das Phänomen der Polarisation von künstlichem Licht auf Straßen und anderen glatten Flächen. Denn dieses horizontal polarisierte Licht ähnelt dem Signal, das aquatische Insekten, wie Eintagsfliegen, zur Orientierung für ihre Eiablage nutzen (Horváth et al. 2009). Eier, welche wegen des ähnlichen Polarisationssignals auf terrestrische Flächen (z. B. beleuchtete Straßen), abgelegt werden laufen Gefahr auszutrocknen und finden nicht das nötige Habitat für die larvale Phase. Über die Attraktion von polarisiertem Licht auf Insekten gibt es heute noch unzureichend Studien. Interessant ist, dass für viele aquatischen Insektenarten der Attraktionseffekt mit dem Abstand zu einem Gewässer sogar zunimmt (Robertson et al. 2018). Das bedeutet, dass Beleuchtung und künstliche, reflektierende Oberflächen in Gewässernähe ein ökologisches Signal aussenden, das stärker ist als das natürliche Signal und dadurch die Eiablage vieler aquatischer Insektenarten beeinträchtigt.

Auch im Wasser kommt es zu Verhaltensänderungen von Arthropoden. Oft sind diese Veränderungen auf bessere visuelle Wahrnehmungen der Prädatoren zurückzuführen. Die Aktivität vieler verschiedener Insektenlarven und das Driftverhalten kleiner Flohkrebse (Gammaridae) nimmt ab (Perkin et al. 2014a; b). Unter natürlichen Bedingungen halten sich Wasserflöhe (Daphniidae) tagsüber in tiefen dunklen Wasserschichten von Seen auf. In der Nacht wandern sie Richtung Wasseroberfläche, um Algen abzuweiden. Skyglow erhöht das Beleuchtungsniveau. Dadurch kann die tagesperiodisch gesteuerte Vertikalwanderung der Wasserflöhe gestört werden, indem sowohl die Amplitude der Wanderbewegung als auch die Anzahl der wandernden Individuen verändert wird (Moore et al. 2001). Wenn Wasserflöhe durch Lichteinwirkung nachts nicht mehr in gleichem Maß an die Wasseroberfläche wandern, können sie weniger Algen fressen, so dass eine Zunahme der Algenbiomasse und Eintrübung des Sees zu erwarten ist, obwohl die Nährstoffverhältnisse unverändert sind. Diese hätte negative Konsequenzen für die Wasserqualität des Sees z.B. als Badegewässer (Hölker et al. im Druck).

Neben Attraktionseffekten vermeiden einige empfindliche Arten beleuchtete Flächen. Beispielsweise meidet die bis zu 6,5 cm lange, asiatische Riesenwanze (*Lethocerus deyrollei*) beleuchteten Lebensraum, sie ist nachtaktiv und ernährt sich von kleinen Fischen, Amphibien und Wasserinsekten. In einem Radius von 700 m rund um künstliche Lichtquellen in der Nacht kommt diese Art nicht mehr vor und in einem 3 km weiten Radius ist ihr Vorkommen erheblich eingeschränkt (Choi et al. 2009).

Andere Arten reagieren mit Vermeidungsstrategien. Signalkrebse (*Pacifastacus leniusculus*) suchen unter Straßenbeleuchtung verstärkt Refugien auf (Thomas et al. 2016). Sie graben sich

in das Sediment ein und lockern es dadurch. Die Auswirkungen auf eine erhöhte Feinsedimentbelastung in Flüssen durch diese Aktivität sind noch nicht hinreichend erforscht (siehe Kapitel 6). Die Autoren diskutieren, dass das aufgewühlte Feinsediment Organismen mit sensiblen Kiemen beeinträchtigen könnte, indem beispielweise die Überlebensrate von Fließgewässerarten, wie Lachsen, während des Ei- und Larvalstadiums durch eine nicht ausreichende Sauerstoffversorgung in den Zwischenräumen der Kieslaichplätze verringert wird.

Aber selbst Prädatoren, die sich auf Beute spezialisieren, welche von Licht angezogen wird, wie manche Radnetzspinnenarten, profitieren nicht automatisch von künstlichem Licht. Durch hohe Fluktuation in der Biomasse der Beute erhöht sich das Risiko mancher Spinnenarten, wie *Tetragnatha versicolor* oder *Nephila clavipes* während der Häutung zu sterben, wenn ihre Körpermasse zu schnell gewachsen ist (Marczak/Richardson 2008). Brückenspinnen, beispielsweise die an der Hamburger Elbphilharmonie angesiedelte *Larinioides sclopetarius*, zeigen hingegen eine viel höhere Plastizität und antworten auf erhöhtes Nahrungsangebot mit einer um bis zu 300-Mal erhöhten Reproduktionsrate (Kleinteich 2009). Das erhöhte Auftreten dieser Spinnenart ist nicht nur unangenehm für Anwohner und kostenintensiv in der Säuberung, es ist ein starkes Zeichen veränderter Räuber-Beute-Beziehungen im Ufergebiet. Es ist heute noch nicht erforscht, welche Spinnenarten von Licht in der Nacht in welchem Maße profitieren und wie sich Spinnenarten, welche nicht an hohe Fluktuation in der Nahrung angepasst sind, an beleuchtete Standorte anpassen.

Zusammenfassend ist zu konstatieren, dass die Auswirkungen durch künstliches Licht in der Nacht auf Insektenfauna in vielen Analysen bisher übersehen oder gar verharmlost werden. LED als insektenfreundliche Beleuchtungslösung ist nicht zu pauschalisieren, sondern es bleibt zu beachten, dass vor allem in Gewässernähe hohe Beeinträchtigungen auf die Insektenfauna zu erwarten sind und einige Arten von LED sogar stärker beeinflusst werden, als von HPS-Leuchten. Ein stärkerer Insektenschutz sollte für Beleuchtungssysteme entwickelt werden (siehe Kapitel 6). Wo Beleuchtung benötigt wird, sollte der Insektenschutz berücksichtigt werden indem Leuchtmittel mit möglichst geringer Blaulichtemission und ein Leuchtendesign mit begrenzter Abstrahlungsgeometrie gewählt wird.

2.2.2. Vögel

Obwohl Vögel vorwiegend tagaktiv sind, werden sie wegen ihres stark ausgeprägten visuellen Sinns sehr durch künstliches Licht in der Nacht beeinflusst. Die meisten Vögel reagieren wie Insekten empfindlich auf UV-Licht, welches für Menschen nicht sichtbar ist. Künstliches Licht in der Nacht lenkt Zugvögel von ihren Routen ab und erhöht daher das Risiko von Räufern gefangen zu werden oder an Gebäuden zu kollidieren. Neben wandernden Vögeln (Ogden 1996) kollidieren auch viele See- und Sturmvögel mit Gebäuden oder Küstenformationen, wenn diese stark beleuchtet sind (Telfer et al. 1987; Rodríguez et al. 2017, 2015, 2014; Rodriguez/Rodriguez 2009; Miles et al. 2010). Abhilfe schaffen an Küsten blitzendes oder stroboskopisches Licht, statt rotierender oder stationären Leuchten (Jones/Francis 2003). HPS mit 2000 K bewirken weniger Bodenkollisionen von Sturmvögeln, als LED (4000 K) oder MV-Leuchten (Rodríguez et al. 2017). An Ölplattformen zeigte sich,

dass blaues oder grünes Licht zu weniger Kollisionen führt als rotes oder warmweißes Licht (Poot et al. 2008). Doch Krijgsveld et al. (2015) betonen, dass die Lichtintensität größeren Einfluss auf die Orientierung der Vögel hat als die Lichtfarbe, und empfehlen hingegen die Abschaltung der Beleuchtung oder reduzierte Beleuchtungsstärken während der Wanderzeiten in den Monaten Oktober und März und vor allem während des Sinkfluges der Vögel zur Landung nach Mitternacht.

Auffällig ist die verlängerte Tagesaktivität von Singvögeln (Da Silva et al. 2017; Dominoni et al. 2013a; Kempenaers et al. 2010; Miller 2006; Nordt/Klenke 2013). Diese korreliert bei vielen Vögeln wie Rotkelchen, Buchfinken, Amseln, Kohl- und Blaumeisen mit der Beleuchtungsstärke. Ab 0,15 lx werden bereits verlängerte Tagesaktivitäten festgestellt und bei 5 lx kann sich beispielsweise die Tagesaktivität von Kohlmeisen im Labor um bis zu über 5 Stunden verlängern (Jong de et al. 2016b). Selbst Mondlicht kann den Abendgesang mancher Vogelarten verlängern (York et al. 2014). Die Empfindlichkeit von Singvögeln auf künstliches Licht ist abhängig von der Art und dem Breitengrad (Da Silva/Kempenaers 2017; Kempenaers et al. 2010). Während frühe Singer, wie das Rotkelchen und die Amsel stärker in südlichen, als in nördlichen Breitengraden von künstlichem Licht beeinflusst werden, werden späte Singer, wie Buchfinken, Blau- und Kohlmeisen in allen Breitengraden von künstlichem Licht beeinflusst, allerdings in südlichen Breitengraden schwächer als die frühen Singvögel (Da Silva/Kempenaers 2017). Welche fitnessrelevanten Auswirkungen ein verlängerte Tagesaktivität auf die Vögel hat ist noch nicht ausreichend erforscht. Vordergründig könnte eine verlängerte Aktivitätszeit sogar von Vorteil sein, weil mehr Zeit für die Nahrungssuche genutzt werden kann. Allerdings zeigen die Vögel, welche länger in die Nacht hinein aktiv sind, auch reduzierte Aktivitätsleistungen während des Tages (Dwyer et al. 2013). Das kann am höheren Nahrungsangebot durch den Attraktionseffekt der Straßenbeleuchtung liegen oder daran, dass die Vögel fehlende Ruhephasen ausgleichen (Welbers et al. 2017). Auch das erhöhte Vorkommen einiger Vogelarten an beleuchteten Flächen (Spoelstra et al. 2015), könnte mit dem erhöhten Nahrungsangebot erklärt werden. Denn Beleuchtung kann die Nahrungssuche auch erleichtern. Urbane Vögel können bis zu 50 Minuten länger Nahrung suchen (Russ et al. 2014) und finden an Straßenbeleuchtungen ein höheres Nahrungsangebot (Welbers et al. 2017). Auch bei Watvögeln sind Veränderungen im Nahrungssuchverhalten zu beobachten. Denn an beleuchteten Orten nimmt das visuelle Nahrungssuchverhalten zu (Santos et al. 2010).

Eine direkte Beeinflussung des Verhaltens durch Licht, unabhängig von ihrer Nahrung, zeigt sich aber vor allem durch rotes Licht. Denn auf dieses Spektrum reagieren Vögel ebenso stark, wie auf weißes Licht, z.B. mit einer höheren Frequenz an Nestbesuchen, obwohl Insekten von rotem Licht weniger beeinflusst werden (Welbers et al. 2017). Auf die Tagesaktivität von Amseln, Rotkehlchen und Buchfinken hat Licht mit einem geringeren Rotlichtanteil aber höheren Einfluss (Da Silva et al. 2014), (im Vergleich MV- und HPS-Leuchten, siehe Kasten 1).

In Waldrandgebieten, welche partiell mit 5-7,5 lx auf dem Boden erleuchtet wurden, konnte allerdings keine Beeinflussung auf die Tagesaktivität oder das Verhalten von Singvögeln beobachtet werden (Da Silva et al. 2017). Das könnte an einer Vermeidung beleuchteter

Bereiche liegen, denn ausgestattet mit Datenlogger zeigen frei lebende Kohlmeisen, die in der Nähe einer Lichtquellen nisten, vergleichbare Quantität an Lichtexposition über die Gesamtlänge eines Tages, wie Kohlmeisen, welche in dunkleren Gebieten nisten (Jong de et al. 2016a). Die Studie von Raap et al. (2017) bestätigt ebenfalls, dass frei lebende Kohlmeisen beleuchtete Nistkästen meiden.

Werden Kohlmeisen aber während der Nestpflege mit Licht direkt an ihrem Nistkasten konfrontiert, weisen sie in der zweiten Woche der Nestpflege eine erhöhte Nahrungssuchaktivität auf. Entweder die Nestlinge oder die Elterntiere werden durch das Licht in ihrem Tag-Nacht-Rhythmus beeinträchtigt (Titulaer et al. 2012). Die erhöhte Aktivität könnte zu einer Schwächung der Elterntiere führen. Beleuchtung innerhalb der Nistkästen (1,6 lx) bewirkt, dass die Mütter später einschlafen (95 Minuten), früher aufwachen (74 Minuten) und allgemein weniger schlafen (56%) (Raap et al. 2016a). Auch die Nestlinge verlangen stärker nach Nahrung während einer beleuchteten Nacht, was das Schlafverhalten der Mütter beeinflusst und umgekehrt.

Bei Blaumeisen sind Männchen in beleuchteten Revieren besonders erfolgreich. In Revieren an mit Straßenbeleuchtung gesäumten Waldrändern ist doppelt so viel Polygynie bei Blaumeisen zu beobachten, als in Revieren im unbeleuchteten Zentrum des Waldes (Kempnaers et al. 2010). Dieser Vorteil bedeutet aber auch, dass eventuell nicht die erfahrenen Männchen bevorzugt werden, sondern solche, welche in der Nähe zu Beleuchtung quartieren. Die Autoren diskutieren, dass durch die Beleuchtung Selektionsfaktoren beeinflusst werden könnten, indem nicht das stärkste Erbgut in die Reproduktion eingebunden wird. Gleichzeitig könnte diese bevorzugte Wahl des Männchens in Beleuchtungsnähe aber auch eine Adaptation der Vögel an das Licht beschleunigen.

Künstliche Beleuchtung beeinflusst weiterhin das saisonale Verhalten von Singvögeln. So treten die Mauser und die Reife zur Paarung bei 0,3 lx nächtlicher Beleuchtung bis zu drei Wochen früher ein (Dominoni et al. 2013a). Diese Verlängerung der Saison kann für die Vögel solange ein Vorteil sein, solange auch das Nahrungsangebot bereit steht. Wenn durch Frost im Frühjahr das Nahrungsangebot gering ist, kann sich der Vorteil aber in das Gegenteil umkehren. Bei Amseln wurde darüber hinaus im Labor festgestellt, dass bei 0,3 lx nächtlicher Beleuchtung im ersten Jahr die Reproduktionsreife früher stattfand, im 2. Jahr aber die Entwicklung des Reproduktionssystems komplett ausfiel (Dominoni et al. 2013b).

Die Gründe für die Veränderungen im Verhalten der Vögel sind überwiegend hormonellen Ursprungs. Bei Amseln und Spatzen wurden frühere Ausschüttungen von Hormonen festgestellt, welche die Fortpflanzung regeln (Dominoni et al. 2013; Schoech et al. 2013; Russ et al. 2015). Der Spiegel mehrerer Sexualhormone nimmt unter Beleuchtung ab und das Verhältnis von Testosteron zu Estradiol ändert sich unterschiedlich bei männlichen und weiblichen Vögeln (Schoech et al. 2013). Weiterhin stellten Ouyang et al. (2015) höhere Kortikosteron-Werte bei Kohlmeisen fest, welche in der Nähe von Straßenleuchten nisten. Die Werte sind umso höher, umso näher sie an der Leuchtquelle nisten. Diese Steigerung der Kortikosteron-Werte hin zur Lichtquelle kommt bei weißem und rotem Licht vor, nicht aber

bei grünen Lichtquellen. Der erhöhte Wert kann eine Stressantwort sein und korreliert mit einer verminderten Anzahl an Nachkommen bei den Vögeln.

Auch der Hormonspiegel und Tagesrhythmus des Nachthormons Melatonin, das die physiologischen Stoffwechselprozesse während der Ruhephase reguliert, wird bei Vögeln durch Beleuchtung unterdrückt (Dominoni et al. 2013; Schoech et al. 2013; Russ et al. 2015; Jong de et al. 2016b). Der Grad der Unterdrückung hängt mit der Beleuchtungsintensität und der Vogelart zusammen, bei Amseln reichen beispielsweise 0,3 lx (Dominoni et al. 2013c), bei Bajawebern (*Ploceus philippinus*) hingegen beeinflusst künstliches Licht erst ab 1 lx den Melatoninspiegel (Singh et al. 2012). Diese Unterschiede könnten mit der Herkunft der Vögel in Zusammenhang stehen, denn der Bajaweber ist im südostasiatischen Raum beheimatet und daher weniger tageslängenempfindlich als die in nördlicheren Breitengraden beheimatete Amsel. Der Grad der Melatoninsuppression korreliert mit der Aktivität der Vögel in der Ruhephase (Dominoni et al. 2013c). Die Melatoninsuppression wird zudem mit physiologischen Beeinträchtigungen von Jungvögeln in beleuchteten Nistkästen in Verbindung gebracht. Es wurden Veränderungen physiologischer Parameter festgestellt, welche für die Immunabwehr verantwortlich sind (Raap et al. 2016b). Die Antwort des Melatoninspiegels auf Lichtreize verläuft relativ schnell. Schon ein 12-minütige Lichtexposition in der Nacht reicht aus, um das Melatonin zu unterdrücken (Vakkuri et al. 1985). Lichtexpositionen in der frühen Dunkelphase scheinen den Melatonin-Rhythmus nach hinten zu verschieben, während Lichtexpositionen im späteren Teil der Nacht den Rhythmus zu einer Vorverlagerung führen können (Singh et al. 2012). Konstante Lichtexpositionen über die gesamte Nacht rufen artabhängig unterschiedliche Reaktionen hervor, oft werden die Maxima des Melatoningehalts gemindert, der Gesamttagespiegel nimmt aber sogar zu (Cockrem 1991; Jong de et al. 2016b; Schoech et al. 2013). Es besteht noch ein sehr hoher Forschungsbedarf, welche fitnessrelevanten Auswirkungen diese Veränderungen des Melatoninspiegels mit sich führen.

Im Ergebnis ist zusammenzufassen, dass künstliches Licht in der Nacht erhebliche Auswirkungen auf zirkadianes und saisonales Verhalten von Vögeln hat. Welche fitnessrelevanten Folgen das veränderte Verhalten hat, ist aber heute noch nicht hinreichend erforscht. Vögel nutzen visuelle Vorteile für die Futtersuche, einige Arten scheinen aber auch Lichtexpositionen in ihrem Lebensraum während der Nacht zu meiden. Rotes Licht ist für die meisten getesteten Vogelarten attraktiver als kurzwelligere Spektren. Das kurzwelligere Licht, grün oder weiß scheint sich aber stärker auf die Hormonausschüttung, zirkadianes und saisonales Verhalten auszuwirken, als rotes Licht (Tab. 3).

2.2.3. Fische

Licht kann die Oberflächen von Gewässern durchdringen und wirkt auch dort als Taktgeber für das Leben. Wie empfindlich Fische auf Licht reagieren hängt stark von der Art ab und vor allem welches Habitat die Art besetzt. Denn Wasser ist dichter als Luft, Licht erfährt dadurch einen anderen Brechungsindex und wird stärker absorbiert. In reinem Wasser werden kürzere Wellenlängen weniger absorbiert als längerwelliges, rotes und gelbes Licht. Die kurzwellige Strahlung dringt dadurch tiefer in die Wassersäule ein. Unterschiedliche Schwebstoffe wie

Huminstoffe, Phyto- und Zooplankton sind optisch wirksame Partikel, welche das Licht streuen und absorbieren. Mit zunehmendem Schwebstoffanteil können, je nach Eigenschaften dieser Partikel, längere Wellenlängen gestreut und die kurzen absorbiert werden. Deshalb erscheinen nährstoffreiche Seen meist grün-gelblich (aus: Brüning/Hölker 2015).

Je nach Habitat haben sich die Fischarten auf ihre individuellen Nischen eingerichtet. Auf künstliches Licht reagieren sie entweder lichtscheu, positiv phototaktisch, neutral oder sie können von Licht profitieren. Aale verhalten sich beispielsweise sehr lichtscheu was dazu führt, dass für Aale beleuchtete Staudämme oder Brücken Barrieren darstellen können. Vor allem wenn das Licht stromaufwärts gerichtet ist, zeigen die Tiere Aufwärtsbewegungen entgegen des Stroms. In einem Test zeigten Aale dieses Verhalten zur Vermeidung des Lichtes über die gesamte Dauer des Versuches (30 Minuten) (Lowe 1952). Königslachse (*Oncorhynchus tshawytscha*) hingegen können Beleuchtung nutzen, um Dämme stromabwärts erfolgreicher zu überwinden (Kemp/Williams 2009). Das bedeutet aber nicht, dass Beleuchtung für diese Tiere keine Hindernisse darstellen könnte. Untersuchungen mit der Fischbrut atlantischer Lachse (*Salmo salar*) zeigten, dass die Tiere von künstlicher Beleuchtung angezogen werden und lange in beleuchteten Bereichen verweilen, so dass die Ausbreitung verzögert wird (Riley et al. 2013). Der sogenannte Raumwiderstand einer Landschaft nimmt so durch künstliches Licht zu und die Wanderung wird zeit- und energieaufwendiger, was insbesondere bei weiten Strecken für wandernde Arten wie dem Aal oder Lachsen die natürliche synchronisierte Fortpflanzung gefährden kann (Hölker et al. im Druck).

Es können sich dadurch auch Räuber-Beute-Interaktionen verändern, zum einen weil für größere Raubfische die visuelle Wahrnehmung zunimmt (Ryer/Olla 1998; Villamizar et al. 2011) und andererseits weil mehr Beute vom Licht angezogen wird (Keenan et al. 2007). So machten sich Groppen (*Cottus* sp.) in beleuchteten Gewässerabschnitten das veränderte Ausbreitungsverhalten und die erhöhten Dichten von angelockten juvenilen Rotlachsen (*Oncorhynchus nerka*) zunutze (Tabor et al. 2004).

Die meisten Fischarten unterliegen tagesrhythmischen Aktivitäten, welche dem natürlichen Hell-Dunkel-Rhythmus unterliegen und durch künstliche Beleuchtung gestört werden können. Kleine Fische kommen oft erst nach Einbruch der Dunkelheit in höhere Ebenen des Wassers, wenn die Dunkelheit sie vor Räubern schützt. Becker et al. (2013) beobachteten, dass die Aktivität von Fischen unter 10 cm Länge in oberflächennahen Wasserschichten durch Beleuchtung unterdrückt wird und ihr Schwarmverhalten weniger stark ausgeprägt ist. Bei Fischen mit einer Länge über 30 cm nimmt das Schwarmverhalten hingegen unter Beleuchtung zu.

Junge Lachse zeigen bei Beleuchtung im Stadium nach dem Verlassen der Flüsse saison- und temperaturabhängig geringere Tendenzen in obere Wasserschichten zu schwimmen, wodurch die Tiere Gefahr laufen, sich außerhalb ihres Temperaturoptimums aufzuhalten. Sie halten sich in wärmeren und weniger salzhaltigen Wasserschichten auf, was Parasiten begünstigen kann und wahrscheinlich durch ein erhöhtes Nahrungsangebot hervorgerufen wird (Oppedal et al. 2001). Neben den saisonalen Verhaltensmustern unterdrückt Beleuchtung auch die

tageszeitlichen Vertikalwanderungen der Lachse, d.h. sie ziehen sich bei natürlicher Dunkelheit in tiefere und kühlere Bereiche zurück. Oft werden Lachse in beleuchteten Netzkäfigen gehalten und dann vermehrt von Läusen befallen, u. a. weil die Parasiten selbst von der Beleuchtung vermehrt angezogen werden (Oppedal et al. 2001).

Für die Fischzucht wird trotzdem gerne starke Beleuchtung eingesetzt, weil sich dadurch das Wachstum vieler Fischarten steigert (Kissil et al. 2001; Rad et al. 2006). Allerdings kann Dauerbeleuchtung bei Jungfischen zu Missbildungen führen (Villamizar et al. 2009) und die Entwicklung der Schwimmblase bei karpfenartigen Fischen verlangsamen (Brüning et al. 2011). Förderlich ist ein Hell-Dunkel-Rhythmus mit blauem Licht. Das wurde nachgewiesen an Europäischen Wolfsbarschen (*Dicentrarchus labrax*).

Wie schon bei den Vögeln beschrieben, kann Licht auch bei Fischen Signale für den Hormonhaushalt aussenden und sich auf die Reproduktion auswirken. In der Fischzucht ist das oft gewollt, weil konstante Beleuchtung eine reduzierte Genexpression von Gonadotropinen (Sexualhormone, welche die Keimdrüsen stimulieren) und dadurch die Entwicklung der Geschlechtsreife verzögert, was oft mit besserem Wachstum einhergeht (Ben Ammar et al. 2015; Rad et al. 2006; Rodríguez et al. 2005). Konstantes Licht oder auch Lichtimpulse in der Dunkelphase erhöhen zudem die Nahrungsaufnahme und das Wachstum unterschiedlicher Fischarten (Kissil et al. 2001; Rad et al. 2006).

Die Aktivität von einigen Fischarten wird durch Beleuchtung in der eigentlichen Aktivitätsphase unterdrückt und in der Ruhephase erhöht (Vera et al. 2005; Carazo et al. 2013). Unter konstanter Beleuchtung verringert sich der Tagesrhythmus des Glucose-Haushalts verglichen mit Tieren, welche in einem Hell-Dunkel-Rhythmus leben. Die Gesamtaktivität der Fische nimmt ab und der zirkadiane Rhythmus verkürzt sich auf 22,5 Stunden. Oliveira et al. (2013) zeigen damit deutlich, dass auch Fische einem zirkadianen Rhythmus unterliegen, der teils endogen, teils durch äußere Umweltfaktoren gesteuert wird, wie Temperatur und vor allem Licht.

Künstliches Licht in der Nacht im Vergleich zu unbeleuchteten Verhältnissen in Fisch tanks, bewirkt weiterhin, dass der Reproduktionszyklus die Taktung verliert, die sexuelle Reifung bei Weibchen und Männchen abnimmt und Männchen im Verlauf von zwei Jahren sogar steril werden können (García-López et al. 2006; Kissil et al. 2001; Migaud et al. 2006). Diese Abnahme der Reproduktionsleistung ist für die Fischzucht sogar von Vorteil, denn in natürlichen Hell-Dunkel-Zyklen sterben männliche Flussbarsche (*Perca fluviatilis*) nach der Reproduktion, unter künstlicher Beleuchtung leben sie jedoch weiter (Migaud et al. 2006).

Eine Studie zu Reproduktionserfolgen von Seezungen (*Solea senegalensis*) zeigt deutlich, dass Beleuchtung sehr beeinträchtigend wirkt und Licht ein wichtigerer Faktor ist für die Regulierung der Sexualreife als Temperatur (García-López et al. 2006). Verzögerungen oder auch Verkürzungen der Zeit bis zum Eischlupf werden durch permanente Beleuchtung bei Plötze, Ukelei und Karpfenfischen hervorgerufen (Brüning et al. 2011). Bei Lachsen verzögert sich bei einer Beleuchtung in vergleichbarer Intensität zu einer Straßenbeleuchtung

die Zeit der Ausbreitung der Fischbrut bis zu drei Tage und verschiebt sich in den Tag hinein (Riley et al. 2013, 2015).

Auch bei Fischen ist Melatonin der Botenstoff, der den Tag-Nacht-Rhythmus im Körper regelt. Schon unter 1 lx Beleuchtungsstärke reichen aus, um die Melatoninproduktion bei vielen Fischarten zu unterdrücken (Brüning et al. 2017; Porter et al. 2001; Vera et al. 2005). Dabei unterdrückt rotes oder grünes Licht stärker das Melatonin von Flussbarschen und Plötze (Brüning et al. 2016, 2017), hingegen wirkt sich blaues Licht stärker als längere Wellenlängen bei Küstenfischen wie Seezungen (*Solea senegalensis*), Zebrabärbling (*Danio rerio*) und Seebarschen aus (Bayarri et al. 2002; Carazo et al. 2013; Oliveira et al. 2007; Ziv et al. 2007). Wahrscheinlich ist die Ursache hier die große Spannbreite der durch Wasserinhaltsstoffe bestimmten Farben in den Gewässern, in denen die Fische natürlicherweise vorkommen (Hölker et al. im Druck).

Gestresst werden die Fische scheinbar nicht durch das Licht in der Nacht, wie Untersuchungen am Level des Stresshormons Kortisol zeigen (Brüning et al. 2015; Newman et al. 2015), nur der Tagesrhythmus von Kortisol verringert sich bei Seezungen (*Solea senegalensis*) durch konstantes Licht bei geringer Beleuchtungsstärke und das Maximum wird um 3h verschoben (Oliveira et al. 2013). Das bedeutet, dass sich das zirkadiane Signal des Kortisols abschwächt und verschiebt, künstliches Nachtlicht aber nicht als Belastung wahrgenommen wird, so dass es für die Fische keinen wahrnehmbaren Anlass gibt, beleuchtete Habitate zu meiden. Nur durch sehr starke Lichtimpulse mit LED-Lampen in einer Beleuchtungsintensität von über 160 lx (2,7 W/m²) können bei Lachsen akute Stressreaktionen mit erhöhtem Kortisolspiegel hervorgerufen werden (Migaud et al. 2007).

Wir fassen zusammen, dass nächtliche Beleuchtung die Räuber-Beute-Interaktionen in Gewässern verändern kann, auch für insektivore Fische (siehe Kapitel 2.2.1.), und tagesrhythmische und saisonales Verhalten beeinflusst. Deutlich zeigt die Literaturrecherche, dass auch nichtintendierte Lichtexpositionen in der Nacht das Verhalten vieler Fischarten verändert. Über die Auswirkungen von Brücken- und Uferbeleuchtung auf Fischpopulationen und auf das Wanderverhalten sind die Studien nicht ausreichend. Forschungen sind dringend erforderlich, vor allem im Hinblick der Erhaltung von Populationen, welche für die Fischerei wichtig sind.

2.2.4. Amphibien

Amphibien sind größtenteils nachtaktiv und zeichnen sich durch sehr gutes skotopisches Sehen aus. So können Frösche und Kröten in natürlichen, nächtlichen Lebensräumen bei bis zu 10⁻⁵ lx noch Aktivitäten zeigen (Buchanan 1998). Diese perfekt an nächtliche Bedingungen angepasste visuelle Wahrnehmung kann durch künstliche Beleuchtung stark gestört werden. Schon leichte Steigerungen der Beleuchtungsintensität, die durch nahe gelegene künstliche Lichter oder sogar durch natürliche Himmelslichter verursacht werden, können das Jagdverhalten oder die Räuberabwehrreaktion von Fröschen und Kröten verändern (Buchanan 2006; Baker/Richardson 2006).

Nur mit wenigen Ausnahmen werden Amphibienarten vor allem in jungen Stadien von künstlichem Licht in der Nacht angezogen (Buchanan 2006). Das Verhalten einiger Kröten während der Wanderzeit, weist allerdings darauf hin, dass die Tiere nicht unbedingt direkt von Licht angezogen werden, sondern in jüngeren Stadien dem Nahrungsangebot folgen (Grunsvan van et al. 2017). Denn während der Wanderung zum Paarungsort nehmen die Tiere fast keine Nahrung zu sich und bevorzugen dunkle Orte, queren Straßen bevorzugt an unbeleuchteten Stellen und meiden grünes und weißes Licht (Grunsvan van et al. 2017).

Straßenbeleuchtung stellt für Amphibien ein hohes Risiko dar, weil die Tiere geblendet und daher handlungsunfähig werden. Die Hell- oder Dunkel-Adaption auf künstliche Lichteinwirkung kann bei Amphibien bis zu einer Stunde betragen (Buchanan 2006). Die Kröten bleiben auf der Straße sitzen und laufen dadurch Gefahr, von Fahrzeugen überfahren zu werden (Coelho et al. 2012; Mazerolle et al. 2005). Kurzzeitige Blendung durch Licht führt auch dazu, dass viele Krötenarten schlechtere Fangerfolge erzielen und Kaulquappen könnten stärker durch Räuber gefährdet sein, weil sie Schattenbildung für ihr Fluchtverhalten nutzen und durch Beleuchtung in ihrem natürlichen Verhalten gestört werden könnten (Buchanan 2006). Während der Balzzeit kann künstliche Beleuchtung die Balzrufe unterdrücken und zu erhöhter Aktivität der Tiere führen (Baker/Richardson 2006).

Bei Salamandern (*Ambystoma laterale* × *jeffersonianum*) führt Beleuchtung zu Verhaltensänderungen in der Habitatwahl. Sie bevorzugen im Hellen deutlich öfter Nadelbaumstreu als Laubabfall. Feuka et al. (2017) diskutieren, dass diese Verhaltensänderungen die Gefahr birgt, dass die Amphibien Substrate wählen, welche sie normalerweise nicht bevorzugen würden und sich möglicherweise in trockeneren Lebensräumen niederlassen, als sie das in natürlich dunklen Arealen tun würden.

Manche Froscharten profitieren von künstlicher Beleuchtung in dem sie Räuber besser erkennen. So zeigen in Zentralamerika beheimatete Laubfrösche (*Similisca sila*) stärkeres Rufverhalten an beleuchteten Orten, wahrscheinlich weil sie ihre Räuber, Fledermäuse (*Trachops cirrhosus*), besser erkennen können (Tuttle/Ryan 1982). Auch invasive Amphibienarten Australiens (z. B. *Rhinella marina*) können von künstlicher Beleuchtung profitieren. Ihre Anzahl nimmt zu, wo Beute zahlreich vorkommt, z. B. in der Nähe beleuchteter Häuser (Gonzalez-Bernal et al. 2016). Diese Ausbreitung in anthropogen regulierten Gebieten kann sich möglicherweise negativ auf die heimische Insektenfauna (gesteigerter Fraßdruck) als auch auf die Amphibienfauna (gesteigerter Konkurrenzdruck) auswirken.

Für Arten, welche sich in einen neuen Lebensraum gut anpassen können, kann also Beleuchtung von Vorteil sein und sie profitieren von dem erhöhten Nahrungsangebot. Für die überwiegende Anzahl der Amphibien jedoch beschränkt Beleuchtung den Lebensraum. Beleuchtung kann Amphibien immobilisieren und geeignete Habitate für die oft bedrohten, hauptsächlich nachtaktiven Landwirbeltiere beschränken. Der Verlust an Lebensraum wird als eines der Hauptfaktoren für die Bedrohung von Amphibien betrachtet (Hof et al. 2011). Neben Landnutzung sollte Beleuchtung als Faktor der Lebensraumbeschränkung nicht übersehen werden. Heute ist bereits ein Drittel der weltweiten Amphibienarten bedroht oder

ausgestorben. Eine zunehmende Zahl, mindestens 42% aller Arten sind in der Population rückläufig, was darauf hindeutet, dass die Zahl der bedrohten Arten in Zukunft sogar noch ansteigen wird (<http://www.iucnredlist.org/initiatives/amphibians>).

2.2.5. Säugetiere

Viele Säugetiere sind immer noch nachtaktiv. Zu Zeiten der tagaktiven Dinosaurier wichen sogar fast alle damaligen Säugetiere auf die Nacht aus. Erst nach dem Aussterben der Dinosaurier wurde die Tagesnische gefahrloser, und es entwickelten sich mehr und mehr tagaktive Säugetiere. Künstliches Licht während der Dämmerung und der Nacht kann diese Nischen verändern und daher den Lebensraum einschränken. Kleinere Säugetiere zeigen unter Beleuchtung erhöhtes Fluchtverhalten während der Nahrungssuche (Bengsen et al. 2010; Farnworth et al. 2016; Vasquez 1994). In einer israelischen Studie verhinderte Beleuchtung (2 lx) das Vorkommen der dämmerungsaktiven Ägyptischen Stachelmaus (*Acomys cahirinus*), aber auch die verwandte Goldstachelmaus (*A. russatus*), welche einen flexiblen zirkadianen Rhythmus hat, nutzt trotz der fehlenden Aktivität von *A. cahirinus* die beleuchteten Orte nicht. Diese reduzierte Aktivität beider Mausarten führt zu einer ungenutzten temporären Nische und eröffnet damit mögliche Eintrittspforten für invasive Arten, z. B. andere Nagetiere, welche nicht so sensibel auf Beleuchtung reagieren, wie die Hausmaus (Rotics et al. 2011). Auch die bei uns heimische Waldmaus (*Apodemus sylvaticus*) hält sich bevorzugt in Dunkelheit auf. Wenn beleuchtet wird, toleriert sie eher rotes vor weißem oder grünem Licht (Spoelstra et al. 2015).

Im Labor wird bei kleinen Säugetieren durch konstante Beleuchtung während der Nacht der Rhythmus der Tagesaktivitäten reduziert (Dauchy et al. 2010; Ikeda et al. 2000; Shuboni/Yan 2010; Tallec et al. 2013). Für nachtaktive Säugetiere nimmt die Aktivität in der Dunkelphase ab und in der Lichtphase zu. Für diese Abnahme der Aktivitätsunterschiede reicht bei Mäusen (*Mus musculus*) schon 1 lx Beleuchtungsstärke während der Nacht aus (Shuboni/Yan 2010). Bei Laborratten verringert sich mit der Zeit der Rhythmus der schnellen Augenbewegungen (REM) in der Aktivitäts- sowie der Ruhephase, wie auch der Rhythmus der Temperaturmaxima (Ikeda et al. 2000). Es werden schwächere Insulinrhythmen und höhere arterielle Glukose- und Milchsäurespiegel festgestellt (Blask et al. 2014; Dauchy et al. 2015; Fonken et al. 2013a). Das bedeutet, dass durch den fehlenden Zeitgeber Licht die zirkadiane Rhythmik abnimmt sowie die tageszeitlich geregelten Stoffwechselaktivitäten. Der Organismus verliert die Taktung der inneren Uhr.

In Laborstudien nehmen Ratten bei nächtlicher Beleuchtung allein durch lichtinduzierte Änderung der Nahrungsaufnahmezeiten an Gewicht zu, ohne dass ihre Tagesration an Futter erhöht wird. Besonders stark ist diese Effekt bei fettreicher Nahrung zu beobachten (Fonken et al. 2013a, b). Die Tiere zeigen zudem depressionsähnliches Verhalten, indem sie geringere Präferenz für Zucker oder verhaltene Aktivität gegenüber Gefahr zeigen (Bedrosian et al. 2011; Hogan et al. 2015; Okuliarova et al. 2016). An Zwerghamstern (*Phodopus sungorus*) wurden diese Verhaltensänderungen mit einer geringeren Anzahl ausgebildeter Dornenfortsätze im Hypothalamus in Zusammenhang gebracht (Bedrosian et al. 2011).

Besonders weißes und blaues Licht ruft diese Veränderungen der Nervenstrukturen und damit möglicherweise in Verbindung stehende Verhaltensweisen hervor (Bedrosian et al. 2013).

Weiterhin nimmt die Immunabwehr durch konstante Beleuchtung in der Nacht ab, sowie auch die Regeneration nach Einwirkungen von Umweltstressoren (Aubrecht et al. 2014; Bedrosian et al. 2011; Bukalev et al. 2013). Tumorwachstum kann ebenfalls durch konstante Beleuchtung in der Nacht begünstigt werden (Bukalev et al. 2013; Dauchy et al. 2014) und gleichzeitig werden schlechtere Wirkungen von tumorhemmenden Pharmaka attestiert (Blask et al. 2014; Dauchy et al. 2014). Dabei ist zu beachten, dass die Immunantwort von Labortieren durch ausreichend Tageslicht oder komplette Dunkelheit verbessert werden kann (Bukalev et al. 2013). Hell-Dunkel-Phasenwechsel wirken sich hingegen nachteilig auf die Immunantwort gegenüber Umweltstressoren aus (Molcan et al. 2016). Vor allem bei der Verlagerung zu einem früheren Rhythmus kann es zu Beeinträchtigung der Reproduktion kommen, wie Summa et al. (2012) anhand der Trächtigkeit von Mäusen feststellten. Obwohl diese Studien darauf ausgelegt sind, Auswirkungen von Schichtarbeit auf zirkadiane Stoffwechsel zu demonstrieren, könnten die Ergebnisse folglich auch auf mögliche Veränderungen der zirkadianen Rhythmen von Wildtieren durch Lichtverschmutzung im Außenraum hinweisen. Es bleibt zu untersuchen, ob eine zeitliche Veränderung von künstlichem Licht im Außenraum den zirkadianen Rhythmus und damit saisonales Verhalten von Wildtieren beeinträchtigen könnte.

Im Freiland wurden Veränderungen der Immunantwort noch nicht gemessen, dafür aber gravierende Veränderungen saisonaler Rhythmen (Aubrecht et al. 2014; Hoffmann 1979; Ikeno et al. 2014). Besonders die Reproduktion verliert unter ständiger Beleuchtung ihre saisonale Taktung (Le Tallec et al. 2015; Robert et al. 2015). Bei einer Känguru-Art in Australien, dem Tammar-Wallaby (*Macropus eugenii*) wurde eine zeitliche Verschiebung des Reproduktionszyklus zwischen Tieren festgestellt, welche in unbeleuchtetem Buschland und solchen, welche auf einem Marinestützpunkt frei leben (Robert et al. 2015). Anhand von Lichtsensoren wurde eine um 20igfach höhere Lichtexposition der Tiere auf dem Marinestützpunkt gemessen. Die Tiere im Buschland erfuhren dagegen eine zyklische Veränderung der Lichtniveaus in der Nacht durch Mondlicht, welche eine 10er Potenz geringer ist, als die Lichtexposition auf dem Marinestützpunkt (Abb. 4). Während im Buschland über 70% der Geburten im Dezember und Januar stattfinden, verzögerten sich die Geburten auf dem Marinestützpunkt bis spät in den April. Diese Studie zeigt deutlich, wie Wildtiere in beleuchteten Gebieten ihre saisonale Taktung verlieren. Bei Grauen Mausmakis (*Microcebus murinus*) beeinträchtigt Licht während der Nacht die Reproduktionsphase, indem sich die Bewegungsaktivität während des Östrus (paarungs- bzw. empfängnisbereite Zeit / Zeit der Paarungsbereitschaft) verringert, der Östrus früher eintritt und mit reduzierter Dauer (Le Tallec et al. 2015). Auch die Männchen erfahren durch nächtliche Beleuchtung einen früheren Eintritt in die Reproduktionsphase, welche bei dieser Art im Frühjahr stattfindet (Tallec et al. 2016). Für Ziegen (*Capra hircus*) hingegen, welche sich im Herbst paaren, „verlängert“ nächtliche Beleuchtung den Kurztag (weniger als 12 Stunden Tageslicht, Signal für die Jahreszeit Herbst) und vermindert daher die jahreszeitlich vorgesehene photoperiodische Antwort, d. h. die Fortpflanzungsorgane bleiben kleiner (Yasuo et al. 2006). Auch bei Zwerghamstern (*Phodopus sungorus*) bewirkt Beleuchtung während der

winterlichen kurzen Tage eine Rückbildung der Gonaden, gesteigertes Wachstum und Haarwechsel zum Sommertyp (Aubrecht et al. 2014; Ikeno et al. 2014). Alle diese Studien liefern Hinweise darauf, dass bei Wildtieren das Abgleichen von Körperfunktionen und Verhalten mit der Jahreszeit und dadurch die Reproduktion durch künstliches Licht in der Nacht beeinträchtigt werden kann.

Verantwortlich sind dabei wieder ähnliche hormonelle Veränderungen, wie schon bei Vögeln und Fischen beschrieben. Die Melatoninsekretion wird durch Licht in der Nacht unterdrückt (Blask et al. 2014; Dauchy et al. 2015, 2010, 2014; Robert et al. 2015), Sexualhormone (Aubrecht et al. 2014; Yasuo et al. 2006), sowie auch das stoffwechselrelevante Kortikosteron (Dauchy et al. 2015) verlieren ihre Taktung. Untersuchungen an Nagetieren im Labor zeigen weiterhin, dass sich die Expression von Genen verändert, die für die saisonale Physiologie und zirkadiane Stoffwechselaktivitäten eine Rolle spielen (Fonken/Nelson 2014; Ikeno et al. 2014).

Weißes oder blaues Licht wird bei Laborratten als stärkerer Auslöser für ein erhöhtes Wachstum von immunrelevanten Zellen und auch für depressionsähnliche Verhaltensänderungen als rotes Licht diskutiert (Bedrosian et al. 2013). Diese Ergebnisse korrelieren mit der Annahme, dass das zirkadiane System höherer Wirbeltiere anhand von Melanopsin-Photorezeptoren am empfindlichsten auf blaues Licht im Spektralbereich um 480 nm reagiert (e.g. Brainard et al. 2001; Bailes/Lucas 2013). Allerdings zeigen Dauchy et al. (2015) dass Melatonin und der zirkadiane Stoffwechsel bei Laborratten auch mit rotem Licht (630 nm) in geringer Beleuchtungsstärke, wie beispielsweise durch Notlichtlampen in Krankenhäusern, unterdrückt werden kann. Auch bei Hirschmäusen (*Peromyscus maniculatus*) wurden starke Effekte auf die Entwicklung hin zur Reproduktionsreife bei rotem Licht festgestellt (Vriend/Lauber, Jean 1973). Die Autoren diskutieren, dass die Anzahl der Photonen einen höheren Einfluss auf Stoffwechselbeeinträchtigung hat, als die Wellenlänge. Das lässt darauf schließen, dass bei diesen empfindlichen, nachtaktiven Tieren heute noch unerforschte Photorezeptoren an zirkadianen Stoffwechselantworten involviert sein könnten.

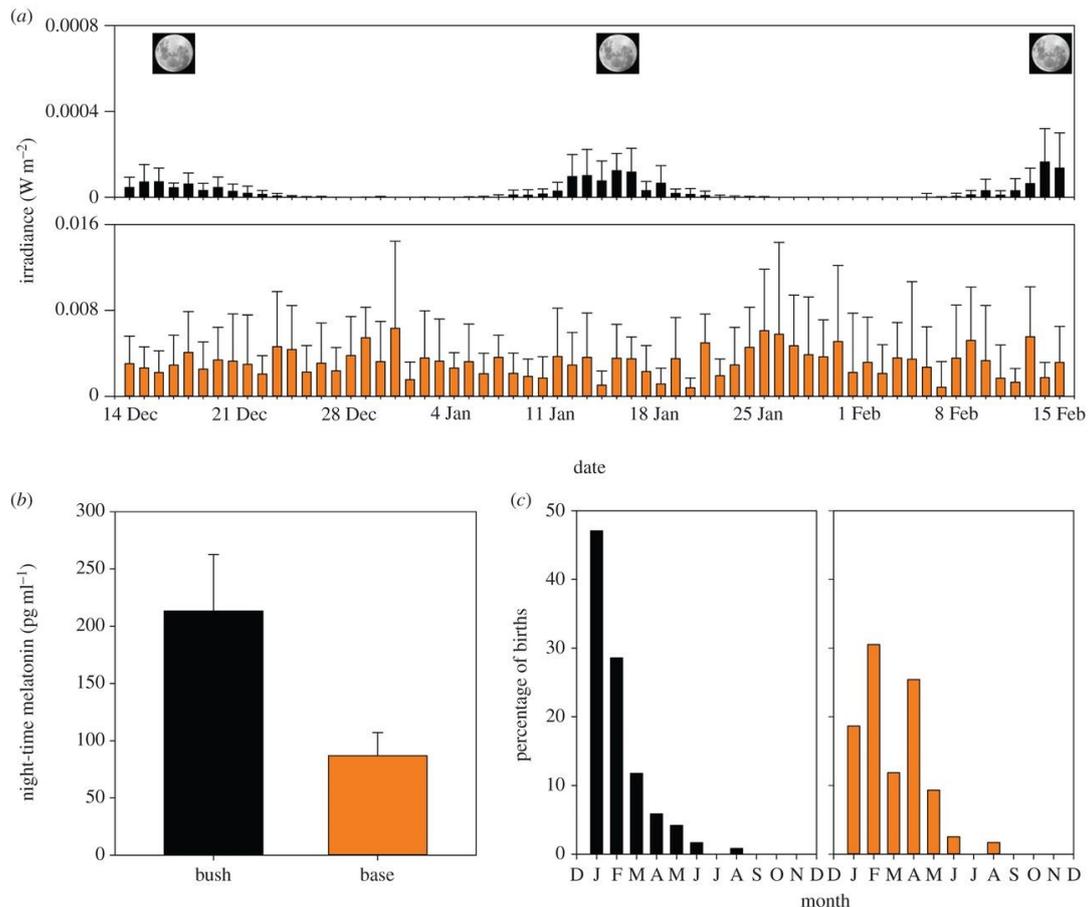


Abbildung 4: Tammar-Wallabies auf einem Marinestützpunkt erfahren um ein Vielfaches erhöhte Helligkeit in der Nacht als solche, die im Buschland leben. (a) Mittlere Nachtlichtintensität vom astronomischen Sonnenuntergang bis zum Sonnenaufgang im Buschland (schwarze Balken) und auf der Marinebasis (orange Balken). (b) Melatonin wird bei hohen Lichtverschmutzungsgraden signifikant unterdrückt. Die y-Achse stellt die rücktransformierten logarithmischen Melatonin-Konzentrationen dar. (c) Die Verteilung der Geburten im Busch (n = 119, schwarze Balken) und auf der Marinebasis (n = 118, orangene Balken), aus Robert et al. 2015, S. 4, Publikationslizenz: 4.0 International (CC BY 4.0)

Zusammenfassend können wir künstliches Licht in der Nacht als Störfaktor für zirkadiane und saisonale Aktivitätsmuster von Säugetieren benennen, wie es auch für Vögel (Kapitel 2.2.2.) und Fische (2.2.3.) beschrieben wurde. Auch nichtintendierte Lichtexpositionen durch öffentliche Beleuchtung tragen zu den Veränderungen bei, welche bis hin zu depressionsartigen Verhalten führen könnte, wie es im Labor an Nagetieren nachgewiesen wurde. Es fehlen heute jedoch noch Studien darüber, welche Verschiebungen in Artengemeinschaften und Ökosystemen zu erwarten sind und welche Auswirkungen diese Verschiebungen auf invasive Arten haben könnten.

2.2.6. Fledermäuse

Fledermäuse sind zu hundert Prozent dämmerungs- oder nachaktiv. Verhaltensänderungen unter Beleuchtung sind stark artabhängig. Lichttolerante Arten sind an Jagdzeiten im Zwielicht angepasst und schnelle Flieger, sie fangen ihre Beute meist aus der Luft, hingegen sind lichtintolerante Arten meist später in der Nacht aktiv und auf nicht fliegende Beute

spezialisiert (Lacoeuilhe et al. 2014). Die meisten untersuchten Arten sind aktiver an unbeleuchteten, als an beleuchteten Orten. Es gibt aber Ausnahmen z. B. der Kleine Abendsegler (*Nyctalus leisleri*) in Europa (Mathews et al. 2015) oder die in Afrika beheimatete Kap-Kleinhohrflodermäus (*Neoromicia capensis*) (Minnaar et al. 2015). An beleuchteten Sportstadien konnte ein paar wenige Arten ausgemacht werden, die von der Beleuchtung in ihrem Jagdverhalten profitieren konnten (Schoeman 2016). Diese Vorteile für das Jagdverhalten weniger Arten kann zu einer Verdrängung von lichtsensibleren Arten und damit zu artenärmeren Fledermausgemeinschaften führen (Polak et al. 2011; Schoeman 2016). Weiterhin kann sich dieser Jagdvorteil durch Beleuchtung auf das Verhältnis der Insektengemeinschaften auswirken (Minnaar et al. 2015; Rydell 1992). Die Kap-Kleinhohrflodermäus konsumiert beispielsweise in beleuchteten Gebieten bis zu sechsmal mehr Nachtfalter, als in natürlich dunklen Gebieten, in welchen sie sich hauptsächlich von Käfern ernährt (Minnaar et al. 2015). Das könnte deshalb dazu beitragen, dass die Ökosystemleistung der Pflanzenbestäubung beeinträchtigt wird (Knop et al. 2017).

Die Aktivitäten der überwiegenden Anzahl an Fledermausarten werden durch Beleuchtung negativ beeinflusst. Im Modell zeigt sich, dass der Faktor Licht stärker auf das Vorkommen und die Aktivität von Fledermäusen auswirkt, als der Faktor Flächenversiegelung. Lediglich intensive Landwirtschaft beeinflusst das Verhalten von Fledermäusen nach diesem Modell stärker als Beleuchtung (Azam et al. 2016). So erklärt sich auch, dass an beleuchteten Kirchen in Schweden ein Verschwinden von über 20% der Fledermauskolonien gemessen wurde, an unbeleuchteten Kirchen hingegen blieben alle beobachtete Kolonien über 25 Jahre lang erhalten (Rydell et al. 2017).

Die Beleuchtungsstärke korreliert mit der negativen Beeinflussung der Ausflugzeiten aus dem Quartier. Das wurde nachgewiesen an Hufeisennasen (*Rhinolophus ferrumequinum*) und zwei Mausohrenarten (*Myotis emarginatus* und *M. oxygnathus*) (Boldogh et al. 2007). Die Beleuchtungsstärke korreliert weiterhin mit der Anzahl der aus dem Quartier ausfliegenden Tiere, z. B. bei der Mückenflodermäus (*Pipistrellus pygmaeus*) (Downs et al. 2003).

Selbst bei der relativ lichttoleranten Zwergflodermäus (*Pipistrellus pipistrellus*) ist zu beobachten, dass die Beleuchtungsstärke und die Breite der beleuchteten Infrastruktur ausschlaggebend dafür sind, ob die Fledermäus die beleuchtete Fläche durchfliegt, oder sich lieber in unbeleuchtetes Gebiet zurückzieht (Hale et al. 2015). Auch wenn Teichflodermäuse (*Myotis dasycneme*) in beleuchteten Gebieten mehr Nahrung finden können, ist die Nahrungsaufnahme erheblich reduziert (Kuijper et al. 2008). Stärker aber noch als die Nahrungsaufnahme wird bei manchen Arten das Trinkverhalten durch Beleuchtung beeinträchtigt (Russo et al. 2017). Das bedeutet, dass Fledermäuse empfindlicher bei der Wasseraufnahme reagieren als im Jagdverhalten und zukünftige Forschung sowie Maßnahmen zur Erhaltung von Fledermauspopulationen verstärkt den Zugang zu Wasser berücksichtigen sollten. Das beinhaltet Brücken, sowie Uferbeleuchtungen und Barrieren, welche den Zugang zu Gewässern beeinträchtigen könnten.

Über die Auswirkungen von Beleuchtung auf zirkadiane Stoffwechselaktivitäten ist bei Fledermäusen noch wenig bekannt. Das könnte daran liegen, dass invasive Studien relativ

aufwendig in der Genehmigung sind, weil die meisten Fledermäuse unter Schutz stehen⁹. Eine Studie zeigt aber, dass Entwicklung von Jungtieren in beleuchteten Kolonien in den ersten Wochen verzögert sind (Boldogh et al. 2007).

Studien über die Auswirkungen durch spektrale Unterschiede oder verschiedene Leuchtentypen auf Fledermausverhalten ergeben sehr widersprüchliche Ergebnisse. Während die Aktivität der Zwergfledermausarten (*P. pipistrellus* spp.) durch Licht unterschiedlicher Spektren positiv beeinflusst wird - höchstwahrscheinlich wegen der Ansammlung von Insekten (Spoelstra et al. 2017; Lacoecilhe et al. 2014) - beeinträchtigt vor allem weißes Licht die Aktivität des Großen Abendseglers (*Nyctalus noctula*). Oranges Licht dagegen beeinflusst die Aktivität der Breitflügelfledermaus (*Eptesicus serotinus*) stärker als weißes (Lacoecilhe et al. 2014). Es bleibt aber zu beachten, dass der Vorteil, den lichttolerante Arten durch höhere Jagderfolge erfahren, geringer ist, als der Nachteil den lichtintoleranten Arten durch die Beeinträchtigung ihres Habitats durch Beleuchtung erfahren, denn mehr Arten reagieren lichtintolerant und selbst für lichttolerante Arten kann der Jagderfolg durch Desorientierung beeinträchtigt werden (Mathews et al. 2015). Langsam fliegende Mausohrenarten (*Myotis* spp.) und Langohrfledermäuse (*Plecotus* spp.) vermeiden weißes und grünes Licht und tolerieren rotes Licht ähnlich wie natürliche Dunkelheit (Spoelstra et al. 2017). Um also die negativen Auswirkungen des Lichts auf die lichtintoleranten Waldbewohner *Myotis* und *Plecotus* spp. zu begrenzen, empfehlen die Autoren, weißes und grünes Licht in oder nahe den Fledermauslebensräumen (Waldränder) zu vermeiden und wenn nötig, rote Lichter zu verwenden. Auch für die Querungen von beleuchteten Wegen empfehlen Mathews et al. (2015) orange scheinende LPS- oder HPS- vor weißlichen MV- Lampen.

Die Aktivität von lichttoleranten Fledermausarten *P. pipistrellus* und *Nyctalus* spp. ist höher an Metallhalogenen- verglichen mit LPS-Leuchten (Stone et al. 2015a), wahrscheinlich weil das weiße Spektrum mehr Insekten anzieht. Hingegen hat ein Vorher-Nachher-Vergleich bei einer Umstellung von LPS auf LED keine Aktivitätssteigerung dieser lichttoleranten Arten ergeben (Rowse et al. 2016a). Die Umrüstung von MV- auf LED-Licht kann sich positiv auswirken, denn während für lichttolerante Zwergfledermäuse (*Pipistrellus pipistrellus*) die durch MV-Beleuchtung gesteigerte Aktivität um 45% reduziert werden kann, steigern, lichtintoleranten Mausohrenfledermäuse (*Myotis* spp.), welche durch MV-Beleuchtung verdrängt werden, ihre Aktivität an LED-Leuchten um das 4,5-fache (Lewanzik/Voigt 2017). Die Autoren sehen daher die Möglichkeit, wenn LED ohne zu hohen Blaulichtanteil, und in optimalen Abstrahlwinkel, bewusst eingesetzt werde, dass das Verhältnis der Auswirkungen auf lichtintolerante und lichttolerante Arten durch LED verbessert werden könnte. Denn die erhöhte Aktivität lichttoleranter Arten ist kein für die Population lebenswichtiger Vorteil, im Gegenteil die Attraktion an den Leuchten ist ein Zeichen veränderter Räuber-Beute-Interaktionen. Die geringere Beeinträchtigung der lichtintoleranten Arten zeigt jedoch, dass diese das Habitat, welches durch umweltgerechte LED-Beleuchtung erhellt wird, besser nutzen können.

⁹ <http://www.fledermauskunde.de/fbio-art.htm>

An wandernden Fledermausarten wurde festgestellt, dass sie ausgerechnet auf das für Zugvögel empfohlene grüne Lichtspektrum (Poot et al. 2008) besonders empfindlich reagieren und ihre Routen in Küstengebieten dadurch besonders beeinträchtigt werden können (Voigt et al. 2017).

Zeitliche Abschaltung erzielen artabhängig unterschiedliche Effekte. An fünf von acht getesteten Fledermausarten, erzielte eine zeitliche Abschaltung der Beleuchtung (Mitternacht +/-1h bis 5 Uhr morgens) aber keine signifikanten Aktivitätsunterschiede, verglichen mit durchgängiger Beleuchtung (Azam et al. 2015). Nur für die spät ausfliegenden Waldbewohner *Myotis* und *Plecotus* spp. kann sich die zeitliche Abschaltung positiv auswirken. Aber die Ergebnisse sind selbst für diese lichtintoleranten Arten nicht eindeutig.

Im Rahmen des Wettbewerbs „Kommunen im neuen Licht“¹⁰ wurde eine Beleuchtungslösung für einen neuen Fahrradweg entlang der stillgelegten Nordbahntrasse gefördert, welche die im Trassentunnel vorkommenden Fledermausarten berücksichtigen sollte. Die Beleuchtung wurde zur Tunneldecke hin abgeschirmt sowie die Reflexion zur Decke minimiert. In einem Gutachten wurde aber festgestellt, dass trotz der Dimmung das Ausflugsverhalten der Fledermäuse durch die Beleuchtung beeinträchtigt wurde. Eine weitere Absenkung der Beleuchtungsstärke auf 1,5-3 lx und eine zeitliche Abschaltung der Beleuchtung zwischen 22 und 6 Uhr wurde deshalb durch ein gesondertes Gutachten empfohlen¹¹. Welche populationsrelevanten Auswirkungen durch das veränderte Ausflugsverhalten zu erwarten sind, ist heute noch nicht erforscht. Das Endgutachten für die baulichen Veränderungen in der Nordbahntrasse, das zeitgleich mit dem gesonderten Gutachten für die Beeinträchtigung des Ausfluges erstellt wurde, bewertete die Bestandsentwicklung des Überwinterungs- und Schwarmbestands als unbeeinträchtigt¹².

Es ist mittlerweile Konsens unter wissenschaftlichen Experten, dass ein Schutz von Fledermauslebensräumen komplett beleuchtungsfreie Unterschlüpfe und Korridore für Wanderung und Nahrungsaufnahme erfordert (z. B. Kuijper et al. 2008; Azam et al. 2015, 2016; Mathews et al. 2015; Minnaar et al. 2015; Rowse et al. 2016; Russo et al. 2017; Rydell et al. 2017). Dies ist insbesondere wichtig, da Fledermauspopulationen stark gefährdet sind. Eine Beleuchtung von Kolonien kann relativ einfach vermieden werden und ein barrierefreier Zugang zu Wasser sollte für lichtintolerante Arten dringend berücksichtigt werden.

¹⁰ Initiative für die Markteinführung von LED-Beleuchtungstechnologie in der kommunalen Anwendung, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung.

¹¹ Systematisches Ausflugsmonitoring im Tunnel Dorp: <https://politik-bei-uns.de/file/565692bb1ae6a0173ad3340c>, 12.12.2017

¹² Monitoring der Fledermausfauna der Nordbahntrasse Wuppertal Tunnel Schee, Tunnel Tesche und Ersatzquartiere: https://www.wuppertal.de/medien_zentral/bindata/Endbericht_Monitoring_Wuppertal_2013bis15_2015-09-04.pdf (14.12.17)

2.3. Die Relevanz der Auswirkungen von künstlichem Licht auf Flora und Fauna

Eine Übersicht der Literaturrecherche zu Auswirkungen durch künstliches Licht auf Fauna bieten wir in Tab. 3, am Ende dieses Kapitels. Wir listen die Literaturnachweise nach Taxa und folgen der gleichen Aufteilung wie Kapitel 2.2.. Es werden Nachweise für Verhaltensänderungen wie Aktivität und Vorkommen, Nahrungssuche und –aufnahme, akuter Stress, zirkadianer Rhythmus, Reproduktion, hormonelle Veränderungen, Immunabwehr und visuelle Wahrnehmung auf verschiedene Taxa mit Referenzen gelistet. Gleichzeitig werden die Studien nach Veränderungen der Beleuchtungsstärke, spektrale Zusammensetzung des Lichtes und Dauer der Lichteinwirkung gelistet. Für einige Taxa finden sich in der Literatur Nachweise für Veränderungen zu allen gelisteten Punkten, bei anderen, wie zum Beispiel Insekten und Arthropoden sind die Nachweise heute noch hauptsächlich auf Verhaltensänderungen wie Aktivität und Vorkommen limitiert. Die überwiegende Mehrheit an Einzelnachweisen für verschiedene Wirkungswege veranschaulicht jedoch, wie hoch komplex die Auswirkung von künstlichem Licht auf unterschiedliche Organismen wirken kann. Viele der Nachweise entstanden in Laborversuchen und sind daher nicht ohne Weiteres für das Freiland zu verallgemeinern, jede einzelne Studie ist jedoch ein Hinweis darauf, dass Funktionen in Ökosystemen durch Licht in der Nacht verändert werden. Diese Veränderungen können kaskadenartig Veränderungen in Ökosystemen hervorrufen und die Biodiversität beeinträchtigen, mit heute noch nicht abschätzbaren Folgen für lebenswichtige Ökosystemfunktionen. Abbildung 5 stellt die Komplexität der Auswirkungen durch den Faktor künstliches Licht in der Nacht schematisch dar.



Abbildung 5: Schematische Darstellung der komplexen Auswirkungen durch künstliches Licht in der Nacht auf Flora und Fauna. Einzelne Verhaltensänderungen können in Ökosystemen kaskadenartige

Effekte hervorrufen. Pfeile geben die Richtung der möglichen Effekte an, Verbindungslinien zeigen Auswirkungen in beide Richtungen.

2.3.1. Verhaltensänderungen: Aktivität und Artenvielfalt

Licht polarisiert, es ist nie neutral. Während viele Fluginsekten einem Staubsaugereffekt durch künstliches Licht in der Nacht unterliegen, vermeiden andere Organismen beleuchtete Gebiete. Die Verhaltensänderungen können sich auf weitere Ebenen im Nahrungsnetz auswirken. Zum Beispiel profitieren manche Prädatoren von der Akkumulation der Nahrung an Leuchtquellen und können eventuell auf Nahrung zugreifen, welche für sie sonst nur schwer erreichbar wäre (Minnaar et al. 2015; Manfrin et al. 2017). Von vielen Räufern (Singvögel, Watvögel, Frösche, Fische, etc.) ist bekannt, dass sie in beleuchteten Gebieten durch gesteigerte visuelle Wahrnehmung besser ihre Beute finden. Für andere Prädatoren verschlechtert sich durch die Verhaltensänderungen ihrer Beute der Zugang zu ihrer natürlichen Nahrung. Die Nachweise sind ein deutlicher Anzeiger dafür, dass durch künstliche Beleuchtung während der Nacht Nahrungsnetze verändert werden. Wie hoch dadurch die Beeinträchtigung auf Populationsebene ist, kann heute noch nicht beziffert werden. Es ist aber davon auszugehen, dass durch die dokumentierten Änderungen ökosystemrelevante Ökosystemfunktionen verloren gehen können (Moore et al. 2001; Lewanzik/Voigt 2014; Hölker et al. 2015; MacGregor et al. 2015; Knop et al. 2017) und die Verhaltensänderungen dadurch maßgeblich zum Rückgang der Biodiversität beitragen können (Fontaine et al. 2006).

Es gibt keine Zahlen, wie viele Arten alleine durch die Auswirkungen von künstlichem Licht in der Nacht heute schon verschwunden sind. Der Radius einer lightscheuen asiatischen Riesenwanze von 1 km um eine Beleuchtungsquelle, in welchem diese empfindliche Wanze keinen Lebensraum findet (Choi et al. 2009), ist nur ein Einzelnachweis, der zeigt wie hoch die Empfindlichkeiten einzelner Arten sein können. Heute liegen noch nicht ausreichend Studien darüber vor, welche Arten in welchem Radius rund um beleuchtete Gebiete beeinträchtigt werden, ab welcher Helligkeit ihr Vorkommen gefährdet ist und in welchen Flächen lightscheue Arten Schutz vor künstlicher Beleuchtung benötigen (siehe Kapitel 6).

Wenn einzelne Arten ihren Lebensraum durch Beleuchtung nicht nutzen, können Eintrittspforten für invasive Arten entstehen (Rotics et al. 2011), welche aufgrund ihrer Herkunft oder genetischen Prädisposition besser an den Faktor Beleuchtung angepasst sind. Eindrucksvoll zeigen australische Studien die Zunahme invasiver Amphibien (Gonzalez-Bernal et al. 2016) und Reptilien (Newbery/Jones 2007) rund um beleuchtete Grundstücke und die Vertreibung der heimischen Arten in unbewohnte Gebiete. Problematisch wird die veränderte Artenzusammensetzung dann, wenn die invasiven Tiere eine zu große Konkurrenz für heimische Arten werden und wenn sie Nahrung erbeuten, welche von den heimischen Prädatoren nicht konsumiert werden, denn dieser Beute (Pflanzen wie auch Tiere) fehlen effektive Abwehrmechanismen.

Welchen Anteil künstliches Licht in der Nacht an dem Schwund an Insektenbiomasse hat, ist ebenfalls heute noch nicht ausreichend erforscht. Es fehlen Studien welche die

Beeinträchtigung durch künstliches Licht mit Landnutzung und Pestizideinsatz vergleichen. Eine Straßenleuchte alleine kann bis zu tausend Insekten in einer Nacht anziehen (Eisenbeis/Hassel 2000). Vergleichsweise würde ein Pestizid mit einer solchen breitbandigen Wirkung auf Nichtzielorganismen keine Zulassung erhalten (Verordnung (EG) Nr. 1107/2009). Während aber Flächen für landwirtschaftliche Nutzung schrumpfen¹³, nehmen die Flächen, welche durch künstliches Licht in der Nacht beeinträchtigt werden, signifikant zu (Kyba et al. 2017). Auch bei Fledermäusen zeigen Modellrechnungen, dass die Auswirkungen auf die Artenvielfalt durch Licht in der Nacht die durch Flächenversiegelung überlagert und mit intensiver Landwirtschaft zu vergleichen ist (Azam et al. 2016).

2.3.2. Akuter Stress

Wie hoch der Stress ist, welcher durch künstliche Beleuchtung auf Organismen ausgeübt wird, ist in den meisten Fällen schwer ermittelbar. Bei Fischen kann man akuten Stress gut nachweisen, denn man kann den Gehalt an Kortisol über das Umgebungswasser analysieren. Dabei zeigt sich, dass kurze Lichteinwirkungen in sehr hoher Intensität (0,19-2,7 W/m² Metallhalogen und LED = 130-1800 lx, Migaud et al. 2007) zwar Stressreaktionen hervorrufen, niedriger dosierte Expositionen in Licht während der Nacht aber keine Stresssymptome oder Kortisol-Ausschüttungen erzeugen (Brüning et al. 2015). Das bedeutet, dass die Tiere die Exposition offenbar nicht als Stressfaktor wahrnehmen und sie folglich auch nicht vermeiden werden. Es liegen aber heute nach unserem Wissen noch keine Studien über die Stresssymptome lichtempfindlicher Fischarten vor, wie beispielsweise dem Aal (siehe Kapitel 6).

Bei Säugetieren wurde in mehreren Studien im Labor gezeigt, dass eine dauerhafte Beleuchtung zu Tag und Nacht zu ängstlichem und depressionsartigem Verhalten führt und emotionaler Stress weniger gut verkräftet werden kann (Bedrosian et al. 2011; Okuliarova et al. 2016). Es kann daher davon ausgegangen werden, dass eine Verminderung der Unterschiede der Lichtintensitäten zwischen Tag und Nacht bei Säugetieren zu zirkadianen Stoffwechselbeeinträchtigungen führen kann (Tab. 3). Auch bei Vögeln konnte in einer Freilandstudie kürzlich nachgewiesen werden, dass vor allem weißes Licht während der Nacht Schlafmangel erzeugen kann, die Vögel dadurch in ihrer Konstitution geschwächt werden können und für Krankheiten empfänglicher werden (Ouyang et al. 2017). Die Wahrnehmung des Lichtes als Stressfaktor kann aber auch zu Vermeidungsstrategien führen, wie diese jüngst bei Kohlmeisen nachgewiesen wurden (Jong de et al. 2016a).

2.3.3. Zirkadianer Rhythmus

Mit der Abnahme der Lichtunterschiede zwischen Tag und Nacht nimmt auch die Stärke des Impuls der tagesrhythmischen Stoffwechselprodukte ab. Das wurde bei Fischen (Vera et al. 2005; Porter et al. 2001; Oliveira et al. 2007, 2013), an Vögeln (Da Silva et al. 2014; Jong de et al. 2017; Schoech et al. 2013; Dominoni et al. 2014, 2013a; Russ et al. 2015; Jong de et al.

¹³ Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung - Fachserie 3 Reihe 5.1 – 2016.

<https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Flaechennutzung/Bodenflaechennutzung.html>

2016b) und Säugetieren (Le Tallec et al. 2015; Dauchy et al. 2010; Shuboni/Yan 2010; Ikeda et al. 2000; Blask et al. 2014; Molcan et al. 2014) nachgewiesen. Bei Säugetieren wurde weiterhin der Nachweis geführt, dass sich durch stetige Beleuchtung während der Nacht die Aktivitätsmuster verschiedener Zeitgeber-Gene, welche die innere Uhr beeinflussen, verändern können (Blask et al. 2014; Fonken et al. 2013a).

Auch die saisonale Taktung kann unschärfer werden, da die tatsächliche Tageslänge als Zeitgeber zum Teil nicht mehr korrekt wahrgenommen werden kann. Dazu kommt, dass für viele Organismen die Temperatur das stärkere Signal ist, sobald bestimmte Schwellenwerte unterschritten werden. Für Laubbäume und viele andere Pflanzen der nördlichen Hemisphäre liegt dieser Schwellenwert bei 12° C (Cathey/Campbell 1975). Bei Fischen und vielen Binnengewässerbewohnern liegt dieser Schwellenwert bei etwa 4° C (Porter et al. 1999). Werden diese Schwellenwerte durch einen Anstieg der Temperatur im Zuge des Klimawandels nicht mehr erreicht, könnte der Zeitgeber für saisonales Verhalten sogar komplett entfallen. Über ein solches Szenario gibt es heute noch keine wissenschaftlichen Modellrechnungen oder Voraussagen wie sich Arten, Populationen und Ökosysteme bei fehlenden Signalen für saisonale Veränderungen verändern werden (siehe Kapitel 6).

2.3.4. Reproduktion

Vor allem aus der Fischzucht ist bekannt, dass durch Licht Reproduktionsprozesse gesteuert werden können. Verspätete oder ausgesetzte Reproduktionsphasen begünstigen bei vielen Fischarten eine längere Wachstumsphase und bessere Nahrungsumsatzraten (Migaud et al. 2006; Rodríguez et al. 2005; Ben Ammar et al. 2015), deshalb werden Jungfische gerne unter Dauerbeleuchtung gehalten. Auf die Reproduktion von Fischen ist eine Verzögerung der Zeitpunktes bis zum Eischlupf bekannt (Brüning et al. 2011). Unter Freilandbedingungen könnte so eine Verzögerung die Phase des Wachsens beeinträchtigen, bevor die Tiere ihre Wanderung antreten, und könnte sich auf die Fitness der Tiere auswirken. Daten über die tatsächlichen Auswirkungen auf Größe und Fitness der Tiere zur Wanderung gibt es aber nach unserem Wissen heute noch nicht.

Es sind weiterhin nichtintendierte Auswirkungen durch künstliches Licht auf die Reproduktion vieler anderer Taxa bekannt. Angefangen mit der Pheromon-Ausschüttung von Nachtfalterweibchen, welche unter Straßenleuchten bedeutend abnimmt (Geffen van et al. 2015), weiterhin senden Frösche weniger Balzrufe aus (Baker/Richardson 2006) und bei Vögeln (Dominoni et al. 2013b; Kempnaers et al. 2010) und Säugetieren (Tallec et al. 2016; Robert et al. 2015) kann sich die Reproduktionsphase verschieben. Auch bei Pflanzen werden verlagerte Reproduktionszeiten beobachtet (siehe Kapitel 2.1.). Welche Konsequenzen dieses veränderte Verhalten auf Ökosysteme hat, ist heute noch nicht ausreichend erforscht, benötigt aber dringend unsere Aufmerksamkeit, weil im Zuge der zunehmenden Erhellung der Nachtlandschaften und der Klimaerwärmung die wichtigsten saisonalen Signale für die Reproduktion überlagern können und gleichzeitig viele Populationen durch verändertes saisonales Verhalten beeinträchtigt sein könnten (siehe Kapitel 6).

2.3.5. Hormonelle Veränderungen

Es gibt viele gesicherte Nachweise dafür, dass Beleuchtung während der Nacht die Hormonausschüttung in unterschiedlichen Tierarten beeinträchtigt. Vor allem das Hormon Melatonin, welches in den meisten Organismen inklusive Pflanzen während der Nacht gebildet wird (Arnao/Hernández-Ruiz 2006), wird vor allem bei höheren Wirbeltieren durch künstliche Beleuchtung in der Nacht unterdrückt (Deveson et al. 1990; Dominoni et al. 2013a; Schoech et al. 2013; Dauchy et al. 2014; Robert et al. 2015; Russ et al. 2015; Jong de et al. 2016b; u.a.). Das Hormon ist zum einen verantwortlich für die Steuerung des zirkadianen Systems, zum anderen ist es ein Radikalfänger und Antioxidationsmittel (Tan et al. 2007). Die Unterdrückung des Melatonins wirkt sich auf die Immunabwehr und Regenerationsmöglichkeiten von Tieren aus, auf welche wir in Kapitel 2.3.7 detaillierter eingehen.

Weiterhin gibt es gesicherte Nachweise, dass wichtige Hormone für die Fortpflanzung durch künstliches Licht in der Nacht beeinträchtigt werden. Diese Beeinträchtigungen führen zu oben beschriebenen Veränderungen des Reproduktionszeitpunktes oder zu verminderter Reproduktionsaktivität. Bei Vögeln werden durch Beleuchtung während der Nacht Sexualhormone beeinträchtigt (Ouyang et al. 2015; Russ et al. 2015; Schoech et al. 2013; Dominoni et al. 2013a). Bei urbanen Spatzen wurde ein früheres Maximum des luteinisierenden Hormons (Zhang et al. 2014) und bei Amseln frühere Testosteronausschüttungen (Dominoni et al. 2013a) nachgewiesen. Zhang et al. (2014) zeigen in Freiland- und Laboruntersuchungen deutlich, dass diese Beeinträchtigung der Sexualhormone tatsächlich auf künstliche Beleuchtung zurückzuführen ist und nicht auf erhöhte Temperaturen in urbanen Gebieten. Auch bei Fischen führt Dauerlicht zur Unterdrückung des Sexualhormons Gonadotropin und damit zu geringerem Wachstum der Sexualorgane (Rodríguez et al. 2005).

Welche Auswirkungen durch die veränderte Ausschüttung an Hormonen auf Populationen zu erwarten sind und wie sich die Verzerrungen des saisonalen Verhaltens auswirken könnten, ist heute allerdings noch unzureichend erforscht. Über die Schwellenwerte, ab welchen Lichteinwirkungen Hormonveränderungen nachgewiesen werden können, bietet Tab. 2 eine Übersicht.

2.3.6. Immunabwehr

Eine Aufgabe des Hormons Melatonins ist es die nächtlichen Regenerationsprozesse einzuleiten. An Labormäusen- und Ratten konnte gezeigt werden, dass Licht während der Nacht die Anfälligkeit gegenüber Krankheiten wie Infektionskrankheiten, chronische Erkrankungen des Atemapparates, grauer Star, Lungenentzündung, Ohren-, sowie Nasenentzündungen und Erkrankungen des Reproduktionssystems oder auch die Empfindlichkeit gegenüber Tumoren erhöht (Bukalev et al. 2013; Molcan et al. 2014; Bedrosian et al. 2011; Romeo et al. 2013). Auch die Möglichkeiten der Heilung wird bei Säugetieren durch Unterdrückung des Melatonins gehemmt (Dauchy et al. 2014) (Fonken et al. 2013c).

Bei Vögeln werden in vielen Studien fitnessrelevante Beeinträchtigungen durch die Unterdrückung des Melatonins vermutet (Dominoni et al. 2013c; Schoech et al. 2013; Ouyang et al. 2015; Russ et al. 2015). Ouyang et al. (2017) führen den ersten Nachweis, dass Kohlmeisen, welche in mit weißem Licht beleuchteten Gebieten nisten, weniger schlafen, als Artgenossen, die in unbeleuchteten Gebieten oder in Lichtspektren mit längeren Wellenlängen nisten (rot oder grün). Diese Vögel zeigen neben dem Schlafentzug eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit an einer Malariainfektion zu erkranken. Die Rastlosigkeit, welche auch bei brütenden Vögeln festgestellt wurde, könnte die Fitness der Nachkommen beeinträchtigen (Titulaer et al. 2012). Über die tatsächlichen Auswirkungen auf die Fitness der Vögel und ihre Nachkommen liegen aber heute noch nicht genügend Studien vor. Die Immunabwehr von Vögeln könnte sich beispielsweise an reduzierte Schlafzeiten anpassen oder das erhöhte Nahrungsangebot in beleuchteten Gebieten (Welbers et al. 2017) Fitnessbeeinträchtigungen ausgleichen. Dringend werden weitere Freilandstudien benötigt, um die Beeinträchtigung von Singvogelpopulationen durch Abnahme der Hell-Dunkel-Unterschiede zwischen Tag und Nacht zu erforschen.

Die meisten dieser Studien über Auswirkungen von künstlichem Licht auf Fauna, vor allem invasive Studien, welche Hormone und Reproduktionsorgane analysieren, werden an nicht gefährdeten Arten vollzogen. Unser Wissen über die Auswirkungen auf hoch empfindliche Arten ist durch den Schutz für bedrohte Arten eingeschränkt. Durch die hier vorliegende Literaturrecherche (Tab. 3) wird aber deutlich, dass Beeinträchtigungen durch künstliches Licht für viele unterschiedlichen Taxa nachweisbar sind und es ist anzunehmen, dass mögliche evolutionäre Anpassungen an den veränderten Faktor Licht während der Nacht bei vielen sensiblen und lichtempfindlichen Arten eher weniger wahrscheinlich sind.

2.3.7. Schwellenwerte

Tabelle 2 listet die Schwellenwerte, welche sich für die Verhaltensänderungen in der Literatur finden. Es werden hier nur Studien gelistet, welche einen Gradienten an Helligkeiten getestet haben. Es zeigt sich, dass die Schwellenwerte, welche Verhaltensänderungen hervorrufen, für viele Taxa unterhalb der Intensität sternenheller Nächte liegen. Im Freiland können diese Werte viel höher sein, z. B. wurden hormonelle Veränderungen bei Amseln im Labor schon bei 0,3 lx gemessen (Dominoni et al. 2013b; c), bei Spatzen wurde im Freiland allerdings ein Schwellenwert hormoneller Veränderungen von 6 lx ermittelt (Zhang et al. 2014). Diese Unterschiede können durch den Einfluss multipler Faktoren des Freilandes und in manchen Fällen auch mit Vermeidungsstrategien begründet sein, wie dies beispielsweise an Kohlmeisen nachgewiesen wurde, welche unabhängig zu der Nähe ihres Nistkästen zu einer Beleuchtungsquelle ungefähr die gleiche Lichtexposition erfahren (Jong de et al. 2016a).

Tabelle 2 zeigt deutlich, dass für viele Organismen die Intensität einer Vollmondnacht von etwa 0,3 lx ein Schwellenwert für verändertes Verhalten und Hormonausschüttungen ist. Es gibt allerdings heute noch keine Studien, wie wichtig die natürliche Rhythmik des Mondlichtes für diese Organismen ist. Der zirkadiane Impuls für Aktivitäten zu Hell- und Dunkelphasen ist heute noch nicht hinreichend erforscht, die lunare und saisonale Rhythmik

und ihre Relevanz für Organismen und Ökosystemen benötigt ebenfalls dringend unsere wissenschaftliche Aufmerksamkeit (siehe Kapitel 6).

Dauerbeleuchtung führt zu einer Verminderung der Hell-Dunkel-Unterschiede zwischen Tag und Nacht und kann zu einer Abnahme des zirkadianen Zeitgebers und saisonaler Signale führen. Die Verlängerung des Tages durch künstliche Beleuchtung kann die kritische Tageslänge für einen Kurztag (12h), als saisonales Signal für die Jahreszeit Herbst, verhindern und dadurch einen Langtag (Sommertag) vortäuschen. Wenn die Temperatur ansteigt, können beide Signale für saisonale Verhaltensänderungen entfallen. Es gibt heute noch keine Modelle, welche wissenschaftlich ein solches Szenario berechnen. Es ist anzunehmen, dass der Zeitpunkt der Paarung und der Reproduktion verlängert wird. Die Abstimmung von Nahrungsangebot und -nachfrage könnte beeinträchtigt werden und frühe oder späte Witterungseinbrüche könnten die Reproduktion, ungeschütztes Gewebe von Pflanzen und empfindliche Populationen gefährden. Eine zeitliche Abschaltung von künstlichem Licht könnte den Zeitgeber für zirkadianes und saisonales Verhalten unterstützen. Der Bedarf der Dunkelheit in den frühen Abendstunden kollidiert aber oft mit dem höchsten Bedarf an Beleuchtung. Die Beleuchtung sollte daher räumlich begrenzt werden, indem die Faktoren Intensität und Abstrahlungsgeometrie reduziert werden. Unbeleuchtete Schutzräume sollten weiterhin für empfindliche Arten geboten werden, um Lebensraum für lichtsensiblen Arten gewährleisten zu können (siehe z. B. Kronfeld-Schor et al. 2013).

Die spektralen Empfindlichkeiten unterscheiden sich stark zwischen Arten und können nicht von der Beleuchtungsstärke abgegrenzt werden, denn die spektrale Zusammensetzung des Lichtes lässt, je nach spektraler Empfindlichkeit eines Organismus, ein Objekt stärker oder weniger stark erscheinen. Bei hohen Beleuchtungsstärken und bei einzelnen Lichtquellen hat die spektrale Zusammensetzung weniger Einfluss als die Intensität des Lichtes. Sehr schwaches Licht, in einer spektralen Zusammensetzung, auf die ein Organismus empfindlich reagiert, kann vergleichsweise stark wirken, genauso wie sehr intensives Licht mit spektralen Zusammensetzungen außerhalb des Empfindlichkeitsbereiches des Organismus. Trotzdem lässt sich festhalten, dass umso kurzwelliger das Licht ist, umso höher ist die Quantität der Auswirkungen und die der betroffenen Taxa (siehe Tab. 3). Auf viele Tiere wirkt blaues und UV-Licht sehr stark und daher sollte dieser kurzwellige Anteil des Lichtes im Außenraum möglichst vermieden werden.

Zusammenfassend ist zu schlussfolgern, dass der heutige Stand des Wissens es nicht zulässt, Auswirkungen durch künstliches Licht auf der Ebene von Populationen, Lebensgemeinschaften und Ökosysteme zu definieren. Forschungen darüber sind äußerst zeit- und kostenaufwendig und es besteht immer die Gefahr, dass Auswirkungen auf einzelne Taxa übersehen, oder die Wirkungen in Ökosystemen unzureichend berücksichtigt werden. Die Anzahl der hier gelisteten und durch Fachexperten überprüften Nachweise über Auswirkungen durch künstliches Licht in der Nacht auf Flora und Fauna und die ermittelten Schwellenwerte zeigen aber deutlich, dass die negativen Auswirkungen durch künstliche Beleuchtung minimiert werden müssen. Weil aber der Einzelnachweis populationsgefährdender Auswirkungen durch nichtintendierte Lichteinwirkung sehr schwer

zu erbringen ist, sollten nicht die Auswirkungen auf Flora und Fauna der Bemessungsgrundlage dienen, sondern die Quantität und die Qualität, welche der Verursacher an Lichtemissionen produziert. Dies ist besonders wichtig im Angesicht der Tatsache, dass die Bemühungen effiziente Beleuchtungslösungen zu entwickeln, in den vergangenen Jahren nur zu einer weiteren Erhellung der globalen Nachtschaften führte, welche mit 2% pro Jahr stetig ansteigt (Kyba et al. 2017).

Tabelle 2: Schwellenwerte für Beleuchtungsstärken, die Veränderungen in unterschiedlichen Taxa hervorrufen

Effekte	Gefundene Schwellenwerte (Intensität)	
Aktivität und Vorkommen	<ul style="list-style-type: none"> • $4 \cdot 10^{-4} \mu\text{E} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ ($\sim 0,02 \text{ lx}$)(Ryer/Olla 1998) • $5 \cdot 10^{-4} \mu\text{E} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ ($\sim 0,03 \text{ lx}$)(Keenan et al. 2007) • $< 3,3 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ ($0,3 \text{ lx}$)(Vera et al. 2005) • Sternhelle Nacht, abhängig nach Wasserstand(Lowe 1952) 	Fische
	<ul style="list-style-type: none"> • $> 0,05 \text{ lx}$(Jong de et al. 2016b) • $> 0,15 \text{ lx}$(Jong de et al. 2016b) • $0,3 \text{ lx}$(Dominoni et al. 2013b) • $> 1.5 \text{ lx}$(Jong de et al. 2016b) 	Vögel
	<ul style="list-style-type: none"> • Wegbreite 20-40m = 20 lx(Hale et al. 2015) • Wegbreite 60-80m = 10 lx(Hale et al. 2015) 	Fledermäuse
Akuter Stress	<ul style="list-style-type: none"> • $2,7 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ LED}$ ($\sim 162 \text{ lx}$)(Migaud et al. 2007) 	Fische
Nahrungssuche und - Aufnahme	<ul style="list-style-type: none"> • $< 0,7 \text{ lx}$(Santos et al. 2010) 	Vögel
Zirkadiane Rhythmen	<ul style="list-style-type: none"> • $0,08 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ (Dauchy et al. 2010) 	Säugetiere
	<ul style="list-style-type: none"> • $> 0,3 \text{ lx}$(Dominoni et al. 2013b) 	Vögel
	<ul style="list-style-type: none"> • $< 5 \text{ lx rot}, < 1 \text{ lx IR}$(Carazo et al. 2013) 	Fische
Reproduktion	<ul style="list-style-type: none"> • $< 0,017 \mu\text{mol} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ ($\sim 1 \text{ lx}$)(Brüning et al. 2016) 	Fische
	<ul style="list-style-type: none"> • $0,3 \text{ lx}$(Dominoni et al. 2013b) 	Vögel
Hormonelle Veränderungen	<ul style="list-style-type: none"> • $0,68 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ ($2,3 \text{ lx}$)(Deveson et al. 1990) • $0,08 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ (Dauchy et al. 2010) 	Säugetiere
	<ul style="list-style-type: none"> • $< 3,3 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ ($0,3 \text{ lux}$)(Vera et al. 2005) • $< 1 \text{ lx}$, für totale Unterdrückung des Melatonins $> 1 \text{ lx}$(Brüning et al. 2017) • $< 0,017 \mu\text{mol} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ ($\sim 1 \text{ lx}$)(Brüning et al. 2016) • $> 1 \text{ lx}$(Porter et al. 2001) • $> 5 \text{ lx rotes Licht}$(Carazo et al. 2013) • $2,4, \mu\text{W} / \text{cm}^2$(Bayarri et al. 2002) • $5,3 \mu\text{W} / \text{cm}^2$(Oliveira et al. 2007) • $6 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ (Bayarri et al. 2002) • $10^8 \text{ photons} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$(Ziv et al. 2007) 	Fische
	<ul style="list-style-type: none"> • $< 0,3 \text{ lx}$ (<i>Turdus merula</i>, Labor)(Dominoni et al. 2013b; c) • 6 lx (<i>Passer montanus</i>, in situ) (Zhang et al. 2014) 	Vögel
Wachstum und Entwicklung	$0,3 \text{ lx}$ (Dominoni et al. 2013b)	Vögel
Immunabwehr	keine	keine

Tabelle 3: Nachweise von Auswirkungen von künstlichem Licht auf Fauna, gelistet nach Taxa, Auswirkungen durch unterschiedliche Beleuchtungsstärken (Intensität), Lichtspektrum und zeitliche Exposition in künstlichem Licht.

Taxa	Intensität	Spektrum	Dauer
Arthropoden und Insekten	<p>Aktivität und Vorkommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Das Vorkommen empfindliche Arten, wird durch Beleuchtung verhindert, z.B. Riesenwanzen (<i>Lethocerus deyrollei</i>) kommen in einem Radius von 700m um künstliche Beleuchtung nicht vor und in über 3km Radius ist ihr Vorkommen eingeschränkt(Choi et al. 2009) • Höheres Aufkommen vieler Arten, welche durch Licht einen Staubsaugereffekt erfahren. (Verovnik et al. 2015) • Das Verhältnis von Ordnungen verändert sich, mehr Zweiflügler, weniger Falter(Minnaar et al. 2015). • Aquatische Insekten sind nach der Metamorphose zum adulten Fluginsekt besonders von dem Staubsaugereffekt künstlicher Beleuchtungskörper betroffen (Manfrin et al. 2017) • Straßenleuchten in Reihe zeigen Barriere-Effekte, das Habitat von Fluginsekten wird zerschnitten(Degen et al. 2016) • Reduzierte Bestäubungsleistung wirkt sich auf die Fruchtbildung von Pflanzen aus, die Abnahme der Pflanzen, welche auf Insektenbestäubung angewiesen sind, führt auch zu einer Abnahme an Aktivität von Tagbestäubern(Knop et al. 2017) • Aquatische Arthropoden verringern ihre 	<p>Aktivität und Vorkommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Attraktion an Lichtspektren hängt stark von der Insektenordnung ab (Grunsvan van et al. 2014) • Mehr Arten und Biomasse werden von kürzeren, als von längeren Wellenlängen angezogen(van Langevelde et al. 2011; Jung/Kalko 2010; Pawson/Bader 2014) • Filter für <420 nm auf Hg-Lampen = 6x weniger Insekten, 4x weniger Nachtfalterarten(Verovnik et al. 2015) • Lampentypen: MV>HPS>LPS>dark(Rydell 1992) • LED < Glühlampen(Justice/Justice 2016) • LED < Hg(Soneira 2013) • Hg 84%- Leuchtstoffröhren 54% - HPS 46% und LEDs (alle Lichtfarben) 20%(Eisenbeis/Eick 2011) • LED > HPS(Pawson/Bader 2014) • LED warmweiß-neutralweiß (diffus < klar) < HPS (diffus > klar)(Hümer et al. 2011) • Negative Korrelation aus Größe von Nachfaltern und des Augendurchmessers mit Wellenlänge des Lichtes(van Langevelde et al. 2011) <p>Reproduktion:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pheromon-Ausschüttung von <i>Operophtera brumata</i> (Lepidoptera: Geometridae) nimmt stärker unter rotem Licht als unter 	<p>Aktivität und Vorkommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Adaptationseffekte könnten durch zeitliche Abschaltung begünstigt werden(Degen et al. 2017) • Durch Straßenlicht suchen Signalkrebse (<i>Pacifastacus leniusculus</i>) verstärkt Schutzräume auf und sind weniger aktiv(Thomas et al. 2016)

	<p>Aktivität (Gammariden) und die Drift im Wasser vieler verschiedener Arten aquatischer Insektenlarven nimmt ab (Perkin et al. 2014b; a; Henn et al. 2014)</p> <p>Reproduktion:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pheromon-Ausschüttung von <i>Operophtera brumata</i> (Lepidoptera: Geometridae) nimmt unter Straßenleuchten bedeutend ab (Geffen van et al. 2015) 	<p>grünem und weißem Licht ab (Geffen van et al. 2015)</p> <p>Wachstum und Entwicklung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Mamestra brassicae</i> (Noctuidae) Reduzierung der Zeit für die Winterruhe in Form der Puppe und geringere Körpergröße der Männchen (Geffen van et al. 2014) 	
Vögel	<p>Aktivität und Vorkommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Während der Migrationsperiode kommen Vögel oft in beleuchteten Gegenden vor (La Sorte et al. 2017) • Sturmvögel kollidieren öfter an Küsten und Leuchttürmen mit zunehmender Beleuchtungsstärke (Jones/Francis 2003; Rodríguez et al. 2012, 2014; Rodríguez/Rodríguez 2009) • Der Beginn der Tagesaktivität ist artabhängig und korreliert mit der Beleuchtungsintensität (Dominoni/Partecke 2015; Kempnaers et al. 2010; Nordt/Klenke 2013; Da Silva et al. 2017; Miller 2006), am stärksten ist der Effekt während der Brutsaison, betroffen sind vor allem die frühen Singer (Dominoni et al. 2014) • Bei der Kohlmeise (<i>Parus major</i>) verfrüht sich die Tagesaktivität bei 0,05 lx um 30 Min., bei 0,5 lx um 150 Min. und bei 5 lx um 325 Min. (Jong de et al. 2016b) • Singvögel beenden die Tagesaktivität 	<p>Aktivität und Vorkommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Jedes Licht wirkt sich positiv auf die Abundanz verschiedener Vogelarten aus, keine Unterschiede zwischen weißem, grünem oder rotem Licht (Spoelstra et al. 2015) • Tagesaktivität verlängert sich bei Blaumeisen vor allem durch weißes und rotes Licht, weniger stark durch grünes, der Aktivitätsbeginn ist in weißem und rotem Licht bis zu 2h verfrüht, in grünem Licht 1h, die relative nächtliche Aktivität nimmt in weißem Licht um 30% zu, in grünem Licht um 20%. Die totale Tagesaktivität über 24h bleibt aber stabil (Jong de et al. 2017) • Morgendämmerungsgesang von Buchfinken startet 20 Minuten früher unter MV Beleuchtung verglichen mit HPS (Da Silva et al. 2014) • Ende des Abenddämmerungsgesangs von Amseln und vereinzelt Rotkehlchen: MV > HPS (7 Minuten länger) (Da Silva et al. 2014) 	<p>Aktivität und Vorkommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die höchste Wanderaktivität von Vögeln erfolgt im Frühjahr und Oktober. Vögel sind vor allem während ihres Sinkfluges, nach Mitternacht gefährdet durch Lichter von ihrer Route abgelenkt zu werden (Krijgsveld et al. 2015) • Sturmvögel werden stärker durch stationäres oder rotierendes Licht, als durch blitzendes oder stroboskopisches Licht gestört (Jones/Francis 2003) <p>Hormonelle Veränderungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Amseln (<i>Turdus merula</i>) ist der Melatonin-Spiegel saisonabhängig, die allgemeinen Unterschiede sind im Sommer größer, als im Winter. Durch Licht wurden niedrigere Werte am Anfang und am Ende der Nacht gemessen, im Sommer während der ganzen Nacht (Dominoni et al. 2013c) • Abnahme des Melatonin-Spiegel bei Westlichen Buschhäher (<i>Aphelocoma californica</i>) an Langtagen (Schoech et al. 2013)

	<p>später mit zunehmender Beleuchtungsstärke(Da Silva et al. 2014), Effekte ab 0,5 lx, 5 lx verlängert die Tagesaktivität um 30 Min.(Jong de et al. 2016b)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die nächtliche Aktivität bei Kohlmeisen (<i>Parus major</i>) korreliert mit der Beleuchtungsstärke: bei 0,05 lx kein Effekt, ab 0,15 lx = 10%, 5 lx = 50% Zunahme(Jong de et al. 2016b) • Bei Blaumeisen erhöht sich die Aktivität in der Nacht mit der Beleuchtungsstärke, die totale Tagesaktivität bleibt aber stabil, die Länge der Tagesaktivität (Beginn und Ende) verlängert sich mit der Intensität(Jong de et al. 2017) • Im Freiland wurde früheres Singen in der Morgendämmerung in der Nähe von Straßenlampen gemessen(Kempenaers et al. 2010) • Keinen Effekt zeigte im Freiland eine Beleuchtung mit 1,5-7 lx Beleuchtungsstärke (auf dem Boden gemessen)(Da Silva et al. 2017; Titulaer et al. 2012) • Singvögel zeigen einen geringerer Energieverbrauch an beleuchteten Orten(Welbers et al. 2017) • Auswirkungen durch Beleuchtung hängen von Breitengrad und Art ab: Amseln und Rotkelchen zeigen auf künstliches Licht in Sommermonaten in Hohen Breitengraden (Nordfinnland) keine Effekte, Blaumeisen, 	<ul style="list-style-type: none"> • Höherer Energieverbrauch an unbeleuchteten Orten vs. weiß oder grün beleuchteten(Welbers et al. 2017) • Nahrungsangebot vergrößert sich: weiß, grün > rot und unbeleuchtet(Welbers et al. 2017) • Wandervögel werden weniger von grünem oder blauem Licht, als von warmweißen oder rotem Licht angezogen(Poot et al. 2008) • Bodenkollisionen von Sturmvögeln kommen in weißem Licht öfter vor: MV> LED (4000K)> HPS (2000K)(Rodríguez et al. 2017) <p>Hormonelle Veränderungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kohlmeisen weisen höhere Kortikosteron-Werte auf, wenn sie näher an weißen oder roten Lampen nisten, eine Korrelation, welche an grünen Lichtquellen nicht vorkommt(Ouyang et al. 2015) <p>Visuelle Wahrnehmung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • LPS< LED < HPS < Hg(Davies et al. 2013) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nach zwei Nächten Beleuchtungsexposition ändern sich die Blutwerte für Haptoglobin und von Nestlingen (Kohlmeisen, 3 lx auf Nestboden)(Raap et al. 2016b) <p>Nahrungssuche und -Aufnahme:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Auswirkungen auf eine verlängerte Futtersuche sind am höchsten während März und nehmen im April ab(Russ et al. 2014)
--	--	--	---

	<p>Kohlmeisen und Buchfinken werden auch in hohen Breitengraden durch Beleuchtung beeinflusst. Bei Kohlmeisen war der Effekt am stärksten (~35 Min.), bei Buchfinken am schwächsten (~7 Min.) (Da Silva/Kempnaers 2017)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beleuchtung in Nistkästen (1,6 lx) vermindert den Schlaf von Kohlmeisen, die Mütter schlafen später ein und wachen früher auf und schlafen allgemein weniger. Auch die Nestlinge verlangen verstärkt nach Nahrung (Titulaer et al. 2012) <p>Nahrungssuche und -aufnahme:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Rotschenkel (<i>Tringa totanus</i>) und andere Watvögel zeigen mit steigender Beleuchtungsstärke längere Zeiten der Nahrungssuche nach Sonnenuntergang, aber mehr visuelles Nahrungssuchverhalten (Dwyer et al. 2013; Santos et al. 2010) • Die Spottdrossel (<i>Mimus polygottos</i>) kann künstliches Licht in der Nacht nutzen, um Nahrung für Nestlinge zu suchen (Stracey et al. 2014) • Vögel haben besseren Zugang zu Futter an beleuchteten Orten (Welbers et al. 2017) • Die Futtersuche endet 50 Minuten später für Stadtvögel im Vergleich zu Vögeln im Wald (Russ et al. 2014) <p>Reproduktion:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amseln im Labor: Im ersten Jahr mit Beleuchtung (0,3 lx) entwickelten sich die Gonaden normal aber verfrüht, im 2. Jahr 		
--	---	--	--

	<p>gar nicht und der Ablauf der Mauser ist irregulär(Dominoni/Partecke 2015)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beginn der Reproduktionsphase ist 22 Tage früher, Abschluss der Reproduktionsphase 12 Tage früher unter 0,3 lx Beleuchtung, die Mauser erfolgt 22 Tage früher(Dominoni et al. 2013b) • Die Eiablage erfolgt 1,5 Tage früher in der Nähe von Straßenbeleuchtung(Kempenaers et al. 2010) • Erhöhte Kortikosteron-Werte können zu weniger Nachkommen bei Kohlmeisen führen(Ouyang et al. 2015) <p>Hormonelle Veränderungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erhöhte Kortikosteron-Werte bei Amseln und Kohlmeisen in der Nähe von Straßenleuchten(Ouyang et al. 2015; Russ et al. 2015) • Mehrere Singvogelarten: Östron, Testosteron, Kortikosteron, luteinisierendes Hormon und Melatonin werden unterdrückt(Schoech et al. 2013; Dominoni et al. 2014, 2013a; Russ et al. 2015; Jong de et al. 2016b) • Früheres Maximum des luteinisierenden Hormons bei urbanen Spatzen im Vergleich zu ländlichen Spatzen (<i>Passer montanus</i>)(Zhang et al. 2014) • Früherer Testosteron-Ausschüttung bei Amseln(Dominoni et al. 2013a) 		
--	---	--	--

<p>Fische</p>	<p>Aktivität und Vorkommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Das Räuber-Beute-Verhältnis ändert sich(Villamizar et al. 2011; Ryer/Olla 1998; Perkin et al. 2014b) • Höheres Auftreten von Küstenfischen nach 22:00h(Becker et al. 2013) • In beleuchteten Gebieten kommen weniger kleine (<100mm) Fische vor, das Vorkommen von Fischen > 100mm bleibt unverändert(Becker et al. 2013) • Fische >300mm zeigen weniger langsames und vereinzelt Fortbewegen, sie positionieren sich stärker in Schwärmen(Becker et al. 2013) • Die Nähe zum nächsten Fisch (Schwarmverhalten), die Schnelligkeit und das Räuberabwehrverhalten nehmen bei Seelachs (<i>Theragra chalcogramma</i>) mit der Beleuchtungsstärke ab(Ryer/Olla 1998) • Aktivität von Schleien (<i>Tinca tinca</i>) verringert sich während kurzen Beleuchtungsimpulsen in der Dunkelphase(Vera et al. 2005) • Die Aktivität von Seezungen (<i>Solea senegalensis</i>) und Schleien (<i>Tinca tinca</i>) ist durch Beleuchtung in der Aktivitätsphase unterdrückt und in der Ruhephase erhöht(Carazo et al. 2013; Vera et al. 2005) • Aale (<i>Anguilla anguilla</i>) verhalten sich lichtscheu, selbst das Mondlicht wirkt sich auf ihr Wanderungsverhalten aus. Stromaufwärts und nach unten gerichtetes Licht wirkt sich stärker aus, als 	<p>Aktivität und Vorkommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Das Auftreten von Korallenfischen variiert nach Art und Beleuchtungsfarbe: blau>rot>weiß(Fitzpatrick et al. 2013) • Korallenfischarten halten sich bei blauer und weißer (550-560nm) Beleuchtung vermehrt in geschlossenen Fischereizonen auf, als in offenen, rotes Licht zeigt keinen Effekt(Fitzpatrick et al. 2013) • Europäische Wolfsbarsche (<i>Dicentrarchus labrax</i>) erhöhen ihre Schwimmaktivität bei weißer und blauer Beleuchtung, verglichen mit rotem Licht und kompletter Dunkelheit(Villamizar et al. 2011) • Die vertikale Verteilung von Europäischen Wolfsbarschen (<i>Dicentrarchus labrax</i>) verhält sich bei rotem Licht, wie bei Dunkelheit vor allem am Boden der Fischtanks, bei blauem und weißem Licht schwimmen sie in höheren Ebenen des Wassers(Villamizar et al. 2011) • Durch IR und rotes Licht geringer Intensität (5 lx) verringert sich bei Seezungen (<i>Solea senegalensis</i>) die Aktivität während der Lichtphase, die Aktivität während der Dunkel- und Ruhephase erhöht sich durch intensives (50 lx) rotes Licht(Carazo et al. 2013) <p>Akuter Stress:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lachse zeigen eine akute Stressreaktion nur auf intensives LED-Licht, nicht bei MH (LED = 89% 450-499,5 nm)(Migaud et al. 2007) <p>Wachstum und Entwicklung:</p>	<p>Aktivität und Vorkommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Aktivität von Schleien (<i>Tinca tinca</i>) wird durch Lichtimpulse von 1h in der Dunkelphase unterdrückt(Vera et al. 2005) • Aale (<i>Anguilla anguilla</i>): Migrationsbarrieren durch Beleuchtung bleiben über 30 Min. erhalten (Länge der Testphase), durch Adaption wird photo-negatives zu photokinetischem Verhalten(Lowe 1952) • Bei Lachsen (<i>Salmo salar</i>) verspätet sich der Ausbreitung der Fischbrut und verschiebt sich in den Tag bei Dauerbeleuchtung vs. 14:10 LD(Riley et al. 2013, 2015) <p>Zirkadianer Rhythmus:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Seezungen (<i>Solea senegalensis</i>) unter Dauerbeleuchtung mit geringer Intensität verringert sich der Tagesrhythmus des Glucose-Haushalts verglichen mit 12:12 LD. Das Nächtliche Aktivitätsmuster nimmt ab und die Aktivität reguliert sich auf einen 22,4h-Rhythmus(Oliveira et al. 2013) <p>Nahrungssuche / Wachstum und Entwicklung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nahrungsaufnahme und Wachstum kann bei Goldbrassen (<i>Sparus aurata</i>) durch konstantes Licht oder auch Lichtimpulse in der Dunkelphase erhöht werden, die Fische zeigen einen erhöhten Nahrungsaufnahme-Umsetzungs-Ratio(Kissil et al. 2001) • Nil-Tilapie (<i>Oreochromis niloticus</i>) zeigen keinen Unterschied in Nahrungsaufnahme und Umsetzungs-Ratio, aber verbessertes
----------------------	---	---	---

	<p>stromabwärts gerichtetes Licht(Lowe 1952)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Europäische Wolfsbarsche (<i>Dicentrarchus labrax</i>) schwimmen vermehrt in beleuchteten Gewässern(Villamizar et al. 2011) • Lachse (<i>Salmo salar</i>) erhöhen die Schwimmaktivität im Frühling und Sommer bei mittleren und hohen Beleuchtungsstärken(Oppedal et al. 2001) • Bei Lachsen (<i>Salmo salar</i>) ist der Ausbreitung der Fischbrutverzögert und verschiebt sich in den Tag hinein(Riley et al. 2015) • Verteilung in Fischtanks: <ul style="list-style-type: none"> – Während sich Europäische Wolfsbarsche (<i>Dicentrarchus labrax</i>) in Dunkelheit vor allem auf dem Grund von Fischtanks aufhalten, kommt das unter Dauerbeleuchtung nicht vor(Villamizar et al. 2011) – Bei kleinen Fischen <100mm vermindert sich das Schwarmverhalten unter Beleuchtung, sie verteilen sich weiter voneinander(Becker et al. 2013) – Lachse zeigen im Stadium nach dem Verlassen der Flüsse saison- und temperaturabhängig geringere Aufwärtsbewegungen, die Vertikale Verteilung nimmt vor allem im Winter ab(Oppedal et al. 2001) <p>Akuter Stress:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lachse (<i>Salmo salar</i>) zeigen erhöhten Kortisol-Spiegel bis zu 3h nach einer 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Europäischen Wolfsbarschen verbessert (<i>Dicentrarchus labrax</i>) blaues Licht in Hell-/Dunkelzyklen das Wachstum und verringert das Auftreten von Missbildungen(Villamizar et al. 2009) <p>Hormonelle Veränderungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rotes und IR-Licht geringer Intensität hat keinen Einfluss auf das Melatonin von Seezungen (<i>Solea senegalensis</i>), nächtliche Lichtimpulse wirken sich bei weißem und violetterem (368nm Max) Licht aus, nicht aber bei roten (>600nm)(Oliveira et al. 2007) • Seezungen (<i>Solea senegalensis</i>) zeigen eine sehr hohe Empfindlichkeit des Plasma-Melatonins auf Licht, schwächer ausgeprägt ist diese bei langen Wellenlängen(Carazo et al. 2013) • Bei Seebarschen unterdrückt blaues Licht stärker Plasma Melatonin (und erhöht okulares Melatonin), als rotes Licht(Bayarri et al. 2002) • Plötze (<i>Rutilus rutilus</i>) zeigen keine Unterschiede der Melatonin-Unterdrückung zwischen Expositionen mit verschiedenen Wellenlängen(Brüning et al. 2017) • Bei Zebraquärlingen (<i>Danio rerio</i>) sind multiple Photopigmente bei der Unterdrückung des Melatonin involviert(Ziv et al. 2007) • LED und MH Beleuchtungen zeigen keine Unterschiede auf den Melatonin-Gehalt bei 	<p>Wachstum unter konstantem Licht in jungen Stadien(Rad et al. 2006)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Europäischen Wolfsbarschen (<i>Dicentrarchus labrax</i>) erhöht konstantes Licht Missbildungen(Villamizar et al. 2009) • Konstantes rotes Licht reduziert Schwimmblasenaufblähung bei Ukelei- und Karpfenfischen(Brüning et al. 2011) <p>Hormonelle Veränderungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Lachsen (<i>Salmo salar</i>) wird Plasma Melatonin bei unter 1 lx Beleuchtungsstärke in der Nacht unterdrückt, der Melatonin-Spiegel ist bei konstantem Licht temperaturabhängig niedriger, 4° < 12°C(Porter et al. 2001) • Bei Schleien (<i>Tinca tinca</i>) wird durch 1h Lichtimpuls Melatonin unterdrückt(Vera et al. 2005) • Bei Zander (<i>Sander licioperca</i>) wird durch konstantes Licht die Einleitung der Reproduktion gehemmt(Ben Ammar et al. 2015) • Bei Seezungen (<i>Solea senegalensis</i>) wird durch konstantes Licht oder konstante Dunkelheit ein höherer Melatonin-Spiegel erreicht, aber mit geringerer Variation im Tagesrhythmus(Oliveira et al. 2007) • Auch der Tagesrhythmus von Cortisol wurde bei Seezungen durch konstantes Licht geringer Beleuchtungsstärke verringert und das Maximum um 3h verschoben(Oliveira et al. 2007) <p>Immunabwehr:</p>
--	---	---	---

	<p>Exposition in Licht (0,19-2,7 W/m² MH und LED = 130-1800 lx)(Migaud et al. 2007)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Blauflossen-Thunfisch (<i>Thunnus orientalis</i>) zeigen in Lichtimpulsen (maximal 300 lx auf der Wasseroberfläche) ähnliches Verhalten wie Erschrecken, weniger starke Reaktionen zeigen ältere Fische (40 vs. 55 Tage nach dem Schlupf)(Fukuda et al. 2010) <p>Hormonelle Veränderungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Melatonin wird unterdrückt: 10⁸ - 10¹⁵ photons/cm²*s Zebraäbrbling (<i>Danio rerio</i>), <0,017 µmol/m²*s Flussbarsch (<i>Perca fluviatilis</i>)(Ziv et al. 2007; Brüning et al. 2016) • Bei Wolfsbarschen fällt das Plasmamelatonin in einer Linearkorrelation zur logarithmischen Beleuchtungsstärke(Bayarri et al. 2002) • Bei Wolfsbarschen verhält sich okulares Melatonin gegenläufig zu Plasma-Melatonin: Hohe Werte während der Dunkelphase und niedrige während der Lichtphase(Bayarri et al. 2002) • Plötze (<i>Rutilus rutilus</i>) Melantonin 20 Mal höher in unbeleuchteter Kontrolle als bei 1 lx Helligkeit, ausgeprägter Melatoninanstieg am Ende der Nacht(Brüning et al. 2017) • Männliche Lachse (<i>Salmo salar</i>) zeigen keine Melatoninveränderungen bei 0 und 1 lx, aber bei 20-100 lx (offener Fischtank)(Porter et al. 1999) 	<p>Lachsen (<i>Salmo salar</i>)(Migaud et al. 2007)</p> <p>Visuelle Wahrnehmung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Große Bernsteinmakrelen (<i>Seriola dumerlii</i>) zeigen erhöhte visuelle Wahrnehmung unter Beleuchtung: blau>grün>weiß>rot; andere getestete Fische: <i>Epinephelus septemfasciatus</i>, <i>Pagrus major</i>, <i>Takifugu rubripes</i>, <i>Thunnus orientalis</i>: grün>blau>weiß>rot(Ishibashi et al. 2009) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Forellen (<i>Oncorhynchus mykiss</i>) steigen hämatologische Parameter unter konstantem Licht an, vor allem bei warmen Temperaturen. Unter konstantem Licht steigt die Anzahl unreifer roter Blutkörperchen und deren spätere Stadien (die basophile-polychromatische Blutkörperchen) an(Valenzuela et al. 2008) <p>Reproduktion:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Flussbarsche (<i>Perca fluviatilis</i>) in natürlichen Hell-Dunkel-Zyklen sterben männliche Fische nach der Reproduktion, unter künstlicher Beleuchtung leben sie weiter(Migaud et al. 2006) • Bei Europäischen Wolfsbarschen (<i>Dicentrarchus labrax</i>) verursacht konstante Beleuchtung eine reduzierte Genexpression von Gonadotropinen und ein vermindertes Wachstum der Hoden, Dauerlicht scheint in der Hodenreifung involviert zu sein und die Bildung frühreifer Männchen bei Seebarschen zu unterdrücken(Rodríguez et al. 2005) • Bei Zandern (<i>Sander licoperca</i>) wird durch konstante Beleuchtung der Start der Reproduktionsphase gehemmt(Ben Ammar et al. 2015) • Flussbarsche (<i>Perca fluviatilis</i>) zeigen verspätete Gonaden- und Oocyten-Entwicklung, sowie eine verzögerte Laichzeit bei Langtagbedingungen (16:8 LD), und komplett unreife Fische bei konstanter Beleuchtung(Migaud et al.
--	--	---	---

<ul style="list-style-type: none"> • Bei Schleien (<i>Tinca tinca</i>) ist der Tagesrhythmus des Plasma-Melatonins stärker, wenn während der Lichtphase heller beleuchtet wird (Vera et al. 2005) • Der Melatonin-Gehalt der Schleien (<i>Tinca tinca</i>) kann schon durch kurze Beleuchtungsintervalle unterdrückt werden, unabhängig zur Intensität (Vera et al. 2005) <p>Immunabwehr:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lachse (<i>Salmo salar</i>) erfahren einen höheren Läusebefall bei hohen und mittleren Beleuchtungsstärken (3200 / 600 W = 22,2 / 1,9-4,1 W /cm² gemessen auf der Wasseroberfläche), wahrscheinlich aufgrund der fehlenden Temperaturunterschiede, weil die Tiere nicht in tiefere Wasserebenen wandern, und wegen dem phototaktischen Verhalten der Läuse (bei 0,24 W/cm² Lichtstärke keine Verhaltensänderungen) (Oppedal et al. 2001) <p>Visuelle Wahrnehmung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Viele marine Knochenfische (Teleostei) können bei Beleuchtung besser sehen (Ishibashi et al. 2009) • Bei der Wanderung stromabwärts können Königslachse (<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>) visuelle Wahrnehmung nutzen, um Dämme erfolgreich zu überqueren (Kemp/Williams 2009) • Blauflossen-Thunfisch (<i>Thunnus orientalis</i>) benötigt 10-20 Minuten, für die Adaption 		<p>2006)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Karpfenfischen, Ukelei und Plötze verlängert sich die Schlupfzeit unter Dauerbeleuchtung (Brüning et al. 2011) • Seezungen (<i>Solea senegalensis</i>) die Reifung verringert sich im folgenden Reproduktionszyklus, der Einfluss der Photoperiode ist stärker, als der durch Temperatur (García-López et al. 2006) • Bei Goldbrassen (<i>Sparus aurata</i>) verzögert sich die Laichablage und Eiausscheidung unter unterbrochener Beleuchtung und wird komplett unterdrückt bei Langtagbeleuchtung (Kissil et al. 2001)
---	--	--

	<p>der Retina von skotopischer zu photopischer Wahrnehmung, die Reaktion ist altersabhängig: 40<25<55 Tage nach dem Schlupf(Fukuda et al. 2010)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Retina Rückbildung bei intensiver Dauerbeleuchtung ist artabhängig: Dorsch> Lachs> Seebarsch (gemessen an Melanin Dichte)(Vera/Migaud 2009) <p>Reproduktion:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lachse (<i>Salmo salar</i>) in Aquakultur zeigen verspätete Reife (60% reif in natürlicher Beleuchtung vs. 6 % in künstlicher Beleuchtung bei Nacht)(Porter et al. 1999) • Flussbarsche (<i>Perca fluviatilis</i>) schon bei geringer Beleuchtungsstärke wird die Gonadotropin-Genexpression gehemmt(Brüning et al. 2016) 		
Amphibien	<p>Aktivität und Vorkommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Frösche und Kröten können in natürlichen, nächtlichen Lebensräumen bei bis zu 0,00001 lx noch Aktivitäten zeigen, schon leichte Steigerungen der Beleuchtungsintensität, die durch nahe gelegene Lichter oder sogar durch Himmelslichter verursacht werden, können das Jagdverhalten oder die Räuberabwehrreaktion von Fröschen und Kröten verändern (Buchanan 2006; Baker/Richardson 2006) • Salamander (<i>Ambystoma laterale</i> × <i>jeffersonianum</i>) bevorzugen unter Beleuchtung anderes Habitat, sie nutzen 	<p>Aktivität und Vorkommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Weißes Licht hat den höchsten Einfluss auf das Verhalten von Amphibien in der Nacht, weniger beeinflussend wirkt grünes, gefolgt von rotem Licht(Grunsvan van et al. 2017) <p>Visuelle Wahrnehmung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rotes Licht hat den größten Einfluss auf die Orientierung (Magnetische Kompassorientierung) von Amphibien, vor allem wenn die Tiere tagsüber rotem Licht ausgesetzt werden(Freake/Phillips 2005; Phillips et al. 2002) 	<p>Visuelle Wahrnehmung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schon kurze Exposition in künstlichem Licht kann die Retina von Amphibien blenden, diese Blendung kann bis zu 1h andauern und den Tieren Zeit in der Aktivitätsphase nehmen oder die Gefahr durch Prädatoren erhöhen(Buchanan 1993; Grunsvan van et al. 2017; Mazerolle et al. 2005; Coelho et al. 2012)

	<p>bevorzugt Koniferen-streu, das unbeleuchtet weniger attraktiv für sie ist, als Laub(Feuka et al. 2017)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Frösche queren Straßen bevorzugt an unbeleuchteten Orten(Grunsvan et al. 2017) • Straßenbeleuchtung wurde als Risikofaktor für die Querung von Amphibien identifiziert(Mazerolle et al. 2005; Coelho et al. 2012) • Höhere Dichte invasiver Kröten in der Nähe beleuchteter Häuser im Vergleich zu Buschland(Gonzalez-Bernal et al. 2016) <p>Nahrungssuche und –Aufnahme:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Größerer Konsum an Insektenbiomasse und Individuen-Anzahl(Gonzalez-Bernal et al. 2016) <p>Visuelle Wahrnehmung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Salamander-Art <i>Plethodon cinereus</i> orientiert sich schneller zur Beute, schon ab 0,001 lx Umgebungshelligkeit durch bessere visuelle Wahrnehmung, die Aktivität von den Salamandern ist aber in beleuchteten Übergängen (0,01 lx) geringer, als in unbeleuchteten(Perry et al. 2008) • Laubfrösche zeigten stärkeres Rufverhalten an beleuchteten Orten, wahrscheinlich weil die räuberischen Fledermäuse (<i>Trachops cirrhosus</i>) besser zu erkennen sind(Perry et al. 2008) 		
Säugetiere	Aktivität und Vorkommen:	Aktivität und Vorkommen:	Aktivität und Vorkommen:

<ul style="list-style-type: none"> • Kleine, nachtaktive Regenwaldtiere reagieren sensibler auf Lichtreize als auf akustische Reize(Bengsen et al. 2010) • Hausmäuse (<i>Mus musculus</i>) vermindern das Nahrungssuchverhalten und besuchen beleuchtete Orte seltener(Farnworth et al. 2016) • Bei Blattohrmäusen (<i>Phyllotis darwini</i>) erhöht Licht in der Nacht das Räuber-Flucht-Verhalten(Vasquez 1994) <p>Zirkadianer Rhythmus:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Graue Mausmaki (<i>Microcebus murinus</i>) ein nachtaktiver Primate zeigt durch Lichtverschmutzung früher einsetzende Reproduktionsfunktionen, aber es fehlt die gesteigerte Bewegungsaktivität, erhöhte Körperkerntemperatur während Tag und Nacht, die Nachtaktivität und die Nahrungsaufnahme sind eingeschränkt, auch die Nestbox wird seltener verlassen(Le Tallec et al. 2015) • Laborratten (Sprague–Dawley) zeigen unter Beleuchtung unterdrückte Tagesrhythmen der Blutwerte für Glukose und Milchsäure sowie verringerte Plasma-Melatonin-Werte(Dauchy et al. 2010) <p>Hormonelle Veränderungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei der Saanenziege wird Melatonin mit zunehmender Intensität stärker unterdrückt(Deveson et al. 1990) <p>Immunabwehr:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kurzschwanz-Zwerghamster (<i>Phodopus sungorus</i>) erhöhen unter intensiver 	<ul style="list-style-type: none"> • Waldmäuse (<i>Apodemus sylvaticus</i>) halten sich bevorzugt in Dunkelheit auf, Vorkommen in Licht: rot>weiß/grün(Spoelstra et al. 2015) • Kurzschwanz-Zwerghamster (<i>Phodopus sungorus</i>) zeigen verminderte nächtliche Aktivität in weißem Licht während der Nacht, aber erhöhte Aktivität unter blauer oder roter Beleuchtung(Bedrosian et al. 2013) <p>Akuter Stress:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kurzschwanz-Zwerghamster (<i>Phodopus sungorus</i>) zeigen depressiv-ähnliches Verhalten unter weißem oder blauem Licht, getestet anhand von Schwimm und Zuckerverbrauchstest(Bedrosian et al. 2013) <p>Zirkadianer Rhythmus:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Laborratten (Sprague–Dawley) zeigen bei geringer rötlicher Beleuchtungsstärke in der Nacht konstant erhöhte arterielle Fettsäurewerte, verminderte Tagesrhythmen, Phasenverschiebungen der Kortikosteron-Höchstwerte, des Insulin- und Leptin-Haushalts und Unterdrückung des nächtlichen Melatonin-Signals(Dauchy et al. 2015) • Bei Kurzschwanz-Zwerghamstern (<i>Phodopus sungorus</i>) verringert weiße und blaue Beleuchtung die Dichte an dünnen und pilzartigen Dornenfortsätzen des Hippocampus, ein Indikator, dass blaues und weißes Licht den zirkadianen 	<ul style="list-style-type: none"> • Hausmäuse (<i>Mus musculus</i>) verändern unter Schwachlichtbeleuchtung (1 lx) in der Nacht ihren zirkadianen Rhythmus, sie zeigen erhöhte Tagesaktivität(Shuboni/Yan 2010) • Die Ägyptische Stachelmaus (<i>Acomys cahirinus</i>) ist dämmerungsaktiv, sie zeigt unter Beleuchtung verminderte Aktivität in den Abendstunden, die verwandte Goldstachelmaus (<i>A. russatus</i>) hat einen flexible zirkadianen Rhythmus, trotz der fehlenden Aktivität von <i>A. cahirinus</i> nutzt <i>A. russatus</i> aber die beleuchteten Orte nicht (die reduzierte Aktivität beider Mausarten eröffnen Eintrittspforten für invasive Arten)(Rotics et al. 2011) • Bei Laborratten (Sprague Dawley) wird durch Beleuchtung während der Nacht (5 lx) der Rhythmus der Aktivitätsmuster mit der Zeit reduziert(Ikeda et al. 2000) <p>Akuter Stress:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kurzschwanz-Zwerghamster (<i>Phodopus sungorus</i>) Beleuchtung mit geringer Stärke während der Nacht erhöht depressions- und angsthähnliches Verhalten(Bedrosian et al. 2011) • Bei Laborratten (Wistar) beeinflussen gestörte Hell-Dunkel-Zyklen die Fähigkeit, mit emotionalen Stressoren umzugehen(Okuliarova et al. 2016) • Auch bei Labormäusen deutet der Zuckerverbrauchstest auf depressionsähnliches Verhalten hin, der
--	---	--

	<p>Beleuchtung die Bildung von immunreaktiven Zellen (komplette Dunkelheit mit 30 minütigen Beleuchtungsintervallen von 150 lx)(Bedrosian et al. 2013)</p> <p>Reproduktion:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Graue Mausmaki (<i>Microcebus murinus</i>) aktivieren früher Reproduktionsfunktionen, gemessen an Hodengröße und Testosteron-Spiegel(Taltec et al. 2016) • Weißfußmäuse (<i>Peromyscus</i>) vorwiegend nachtaktiv zeigen erhöhtes Ovarien-Wachstum bei höherer Beleuchtungsstärke (dunkel<16<2250 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$), das Hodenwachstum ist ebenfalls vergrößert unter Beleuchtung als in kompletter Dunkelheit (die Intensität spielt dabei aber keine Rolle)(Vriend/Lauber, Jean 1973) <p>Wachstum und Entwicklung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Das Körperwachstum nimmt bei Weißfußmäusen (<i>Peromyscus</i>) mit der Intensität zu, für das Wachstum der Milz ist die Beleuchtungsstärke nicht ausschlaggebend(Vriend/Lauber, Jean 1973) • Blattohrmäusen (<i>Phyllotis darwini</i>) zeigen reduziertes Körpergewicht, vielleicht zusammenhängend mit erhöhtem Räuber-Flucht-Verhalten(Vasquez 1994) 	<p>Rhythmus stärker stört(Bedrosian et al. 2013)</p> <p>Wachstum und Entwicklung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Weißfußmäuse (<i>Peromyscus</i>) Körper-, Milz- und Hodengewicht entwickelt sich stärker unter rotem>grünem>blauem Licht(Vriend/Lauber, Jean 1973) <p>Hormonelle Veränderungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Auch unter schwachem rotem Licht wird das Plasma Melatonin von Laborratten (Sprague Dawley) nach 90 Minuten komplett unterdrückt, nach 30 Minuten ist eine signifikante Unterdrückung nachweisbar(Dauchy et al. 2015) <p>Immunabwehr:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Kurzschwanz-Zwerghamstern (<i>Phodopus sungorus</i>) erhöhen weiße und blaue Lichtimpulse die Bildung von immunreaktiven Zellen(Bedrosian et al. 2013) <p>Visuelle Wahrnehmung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei 46 getesteten Säugetierarten erzeugten unterschiedliche Leuchtmittel verbesserte Wahrnehmung: LPS< HPS< LED< MH(Davies et al. 2013) 	<p>Schwimmtest ist unauffällig, im +Labyrinth-Test halten sich die Mäuse bei Beleuchtung in der Nacht vermehrt in offenen Armen oder im Mittelpunkt eines freien Feldes des Labyrinth-Tests auf, als bei Dunkelheit(Hogan et al. 2015)</p> <p>Zirkadianer Rhythmus:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Laborratten (Sprague Dawley) verringert sich mit der Zeit der Rhythmus der schnellen Augenbewegungen (REM) in der Aktivitäts- sowie der Ruhephase, wie auch der Rhythmus der Temperaturmaxima(Ikeda et al. 2000) • Bei Laborratten (Nacktratten RNU) erhöht sich die Expression der Zeitgeber-Gene durch geringe Beleuchtung in der Nacht(Blask et al. 2014) • Die Laborratten (Nacktratten RNU) zeigen bei geringer Beleuchtung während der Nacht einen schwächeren Insulinrhythmus und höherer arterieller Glukose- und Milchsäurespiegel (0,08 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$)(Blask et al. 2014) • Geringe Beleuchtung während der Nacht ändert die Zeitgeberexpression (Rev-Erb mRNA) von Labormäusen (Swiss Webster) in spezifischen Geweben, wie Leber und weißes Fettgewebe, aber nicht im Hippocampus oder Hypothalamus (5 lx)(Fonken et al. 2013a) • Bei Hausmäusen (<i>Mus musculus</i>) verändert sich der zirkadiane Rhythmus, gemessen an der erhöhten Genexpression der Zeitgeber-
--	---	--	---

			<p>Gene nach drei Wochen Exposition in Dauerbeleuchtung, zwei Wochen Dunkelheit und anschließende Einstellung auf Licht in der Nachtphase (20 lx)(Shuboni/Yan 2010)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Kurzschwanz-Zwerghamstern (<i>Phodopus sungorus</i>) verursacht geringe Beleuchtung während der Nacht: <ul style="list-style-type: none"> – eine beschleunigte Adaption an den Winter-Phänotyp(Gorman/Elliott 2004) – beeinträchtigt die typische Antwort auf einen Kurztag (Ikeno et al. 2014) – fördert die Einstellung auf geteilte zirkadiane Dunkelphasen (Gorman/Elliott 2004) – künstliche Lichteinstrahlung in Nächten eines Kurztages ermöglicht einen Rückfall der Gonadenbildung, – gesteigertes Körperwachstum und Haarwechsel zum Sommertyp, vergleichbar mit Langtag-Phänotypen(Aubrecht et al. 2014) • Bei Laborratten (Wistar) führt Beleuchtung während der Nacht zur Störung der zirkadianen Rhythmen im Blutdruck, Herzfrequenz und Bewegungsaktivität(Molcan et al. 2014) <p>Nahrungssuche und -aufnahme:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Labormäuse (Swiss Webster) zeigen erhöhte Nahrungsaufnahme am Tag / während der Lichtphase, aber keine Unterschiede in der absoluten Tagesaufnahme(Fonken et al. 2013b)
--	--	--	---

			<p>Wachstum und Entwicklung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Laborratten (Swiss Webster) nehmen durch nächtliche Beleuchtung zu, der Effekt wirkt additiv mit fettreicher Nahrung(Fonken et al. 2013a) <p>Hormonale Veränderungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Labormäusen (Swiss Webster) erhöht sich die Insulinausscheidung(Fonken et al. 2013a) • Laborratten (Nacktratten RNU) zeigen unterdrücktes Plasma Melatonin und erhöhte Insulin-Konzentrationen (0.2 lx)(Dauchy et al. 2014) • Bei Saanenziegen wird durch nächtliche Beleuchtung die Prolaktin-Ausscheidung unterdrückt (Hormon, das weiblichen Zyklus und Milchdrüsenaktivität steuert)(Yasuo et al. 2006) • Bei Kurzschwanz-Zwerghamster (<i>Phodopus sungorus</i>) erhöht sich der Testosteronspiegel im Kurztag, unter schwacher Beleuchtung während der Nacht(Aubrecht et al. 2014) • Bei Tammerwallabeys (<i>Macropus eugenii</i>) wird die Melatoninausscheidung unterdrückt(Robert et al. 2015) <p>Immunabwehr:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Laborratten (Nacktratten RNU) zeigt sich bei 0,2 lx ein erhöhte Tumor-cAMP-Pegel und Resistenzen gegen tumorhemmende Medizin und erhöht die Wucherung von Brustkrebszellen(Dauchy et al. 2014)
--	--	--	--

			<ul style="list-style-type: none"> • Laborratten (Wistar) sind unter Dauerbeleuchtung anfälliger für Krankheiten (Infektionskrankheiten, chronische Erkrankungen des Atemapparates, grauer Star, Lungenentzündung, Ohren-, sowie Nasenentzündungen und Erkrankungen des Reproduktionssystems), Lichtentzug verringert das Risiko an Krankheiten des Reproduktionssystems, Entzündungen oder Tumoren zu erkranken(Bukalev et al. 2013) • Phasenwechsel der Hell-Dunkel-Zyklen verschlechtern die Antwort des Herz-Kreislauf-Systems auf Umweltstressoren(Molcan et al. 2014) • Verringerung des natürlichen Lichtes macht die Laborratten ebenfalls krankheitsanfällig(Bukalev et al. 2013) • In Labormäusen (Swiss Webster) erhöht sich bei geringer Dauerbeleuchtung vs. 14:10 LD nach einer Injektion mit einem Lipidpolysaccharid, der Bereich der Körpertemperatur und die TNF (tumor necroses factor) sowie die IL6 Expression (stimuliert die Immunantwort), Nahrungsaufnahme und Aktivität des Bewegungsapparates ist durch nächtliche Beleuchtung für einen Tag länger verringert, ein Hinweis auf längere Übelkeit nach der Injektion(Fonken et al. 2013c) • Bei Kurzschwanz-Zwerghamster (<i>Phodopus sungorus</i>) wird durch geringe Beleuchtung in der Nacht die zelluläre Immunantwort
--	--	--	---

			<p>gehemmt, vergrößerte Nebenhoden sowie Hoden und reduzierte Dichte der Dornenfortsätze im Hippocampus (Region CA1) festgestellt (Bedrosian et al. 2011)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Wanderratten (<i>Rattus norvegicus</i>) erhöhen sich Neuromelanin-haltige Neuronen entsprechend zur Expositionszeit, 90 Tagen extremer Dauerbeleuchtung (3000 lx) führt zu einer Reduzierung der Tyrosinhydroxylase-haltigen Neuronen (Romeo et al. 2013) <p>Reproduktion:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei Labormäuse (B6) können durch Hell-Dunkelrhythmusstörungen im Vergleich zu einem 12:12 LD-Rhythmus erfolgreiche Schwangerschaften verhindert werden (Summa et al. 2012) • Tammar-Wallabies (<i>Macropus eugenii</i>) zeigen verspätete Reproduktionsrhythmen bei In-Situ-Monitorings (Robert et al. 2015) • Bei Grauen Mausmakis (<i>Microcebus murinus</i>) beeinträchtigt Lichtverschmutzung die Reproduktionsphase, die Bewegungsaktivität während des Östrus verringert sich, der Östrus tritt früher ein mit reduzierter Dauer (Tallec et al. 2013) • An Saanenziegen (<i>Capra hircus</i>) zeigt sich, dass verlängertes Tageslicht bei der Kurztagvermehrung die Expression von Typ 2 Deiodase und Trijodthyronin (T3) verringert, welche die photoperiodische Antwort der Gonaden auslöst, verlängertes
--	--	--	---

			Tageslicht verringert die Hodenlänge und -Größe(Yasuo et al. 2006)
Fledermäuse	<p>Aktivität und Vorkommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verhaltensänderungen sind stark artabhängig: Die meisten untersuchten Arten sind aktiver an unbeleuchteten, als an beleuchteten Orten, Ausnahme: <i>Nyctalus leisleri</i>, der Kleine Abendsegler(Stone et al. 2015a; b; Lacoecilhe et al. 2014; Lewanzik/Voigt 2014; Boldogh et al. 2007; Mathews et al. 2015) • Lichttolerante Arten sind an Jagdzeiten im Zwiellicht angepasst und schnelle Flieger, sie fangen ihre Beute meist aus der Luft, lichtintolerante Arten sind meist später in der Nacht aktiv und auf nicht fliegende Beute spezialisiert(Lacoecilhe et al. 2014) • Fledermausaktivitäten nehmen mit zunehmender Beleuchtungsintensität ab (Lacoecilhe et al. 2014) • Beleuchtung verringert und verspätet den Ausflug(Boldogh et al. 2007) • Beleuchtung schafft bessere visuelle Bedingungen für die Jagd, aber auch für die Feinde, welche Fledermäuse jagen(Schoeman 2016; Minnaar et al. 2015) • Negative Korrelation aus Beleuchtungsintensität und Überquerungslänge zu erfolgreichen Querungen beleuchteten Habitats(Hale et al. 2015) 	<p>Aktivität und Vorkommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Der Einfluss der spektralen Zusammensetzung des Lichtes auf Fledermäuse ist stark artabhängig: • Manche licht-tolerante Arten zeigen keine Unterschiede in gelben Licht verglichen mit Dunkelheit(Lacoecilhe et al. 2014) • <i>Pipistrellus</i> spp. und <i>Nyctalus noctula</i> werden stärker durch weißes als durch oranges Licht gestört(Lacoecilhe et al. 2014) • <i>Eptesicus serotinus</i>, die Breitflügel-Fledermaus, wird stärker durch orangenes, als durch weißes Licht gestört (Lacoecilhe et al. 2014) • Jagdverhalten einiger Arten wird durch das Vorkommen von Insekten gesteuert: MV>HPS>LPS>ohne Beleuchtung(Rydell 1992; Stone et al. 2015a) • <i>Pipistrellus pygmaeus</i>: Anzahl Ausflüge aus der Kolonie: unbeleuchtet>blau/rot>weiß(Downs et al. 2003) • Aktivität MV>LED, aber Aktivität der häufigsten Fledermausart in urbanen Lebensräumen, <i>Pipistrellus pipistrellus</i>, zeigt verminderte Aktivität in der Nähe von LED-Beleuchtung, während licht-intolerante <i>Myotis</i>-Arten stärkere Aktivitäten zeigen(Lewanzik/Voigt 2017) • Aktivität von <i>Eptesicus nilsonii</i>, <i>Vespertilio</i> 	<p>Aktivität und Vorkommen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Partielle Nachtbeleuchtung wirkt sich unterschiedlich auf Fledermausarten aus: • <i>Eptesicus serotinus</i> zeigt keine Verhaltensunterschiede(Azam et al. 2015) • <i>Pipistrellus pipistrellus</i> ist aktiver, wenn die ganze Nacht beleuchtet wird, und am wenigsten aktiv, wenn gar nicht beleuchtet wird(Azam et al. 2015) • <i>Myotis</i>-Arten sind am aktivsten in Dunkelheit, weniger aktiv bei partieller Beleuchtung und am wenigsten, wenn die ganze Nacht beleuchtet wird(Azam et al. 2015) • <i>Plecotus</i>-Arten sind am aktivsten bei partieller Beleuchtung, weniger wenn voll beleuchtet wird und am wenigsten an unbeleuchteten Orten(Azam et al. 2015) • <i>Rhinolophus ferrumequinum</i> ist lichtscheu und stark vom Aussterben bedroht, die höchste Aktivität (eine Stunde vor und nach Sonnenuntergang) kollidiert mit der erhöhten Notwendigkeit, in dieser Zeit zu beleuchten(Day et al. 2015)

	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl der Erkundungsflüge ist größer in Dunkelheit(Lewanzik/Voigt 2014) • Flugverhalten ändert sich, schon bei 1 lx direkter Lichtexposition(Kuijper et al. 2008) • Die Rückkehr zur Kolonie erfolgt zu geringerer Lichtintensität, als der Ausflug(Petrželková et al. 2006) • Wanderfledermäuse werden von Licht angezogen(Voigt et al. 2017) <p>Nahrungssuche und -Aufnahme:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Das Trinkverhalten ist reduziert durch Beleuchtung, eventuell stärker als das Jagdverhalten(Russ et al. 2015) <p>Wachstum und Entwicklung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beleuchtung von Kolonien führt bei Jungtieren zu verzögertem Wachstum, gemessen an Unterarmlängen und Gewicht während der Säuglingsphase (<i>Myotis</i> spp.)(Boldogh et al. 2007) 	<p><i>murinus, Nyctalus noctula</i> und <i>Pipistrellus</i> spp. = grün>weiß>rot oder unbeleuchtet(Spoelstra et al. 2017)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Überquerungsaktivität: unbeleuchtet>LPS>HPS (<i>Pipistrellus pipistrellus</i> und <i>pygmaeus</i>), in dichtem Laubbeständen hat oranges Licht den geringsten Einfluss(Mathews et al. 2015) • Grünes Licht beeinflusst Wanderfledermäuse (50% <i>P. nathusii</i> und <i>P. pygmaeus</i>) zu geringerer Zahl Nyctaloids(Voigt et al. 2017) 	
--	--	--	--

3. Handlungsempfehlungen

Handlungsbedarf ist für Regulierung von Lichtinstallationen im Außenbereich dringend gegeben, denn die hier gelisteten Studien zeigen, dass viele Arten schon bei geringen Beleuchtungsstärken Verhaltensänderungen aufweisen, in ihrem Lebensraum eingeschränkt werden und sogar gefährdet werden können (Tab. 3). Durch diese Auswirkungen können relevante Ökosystemfunktionen eingeschränkt werden (Knop et al. 2017; MacGregor et al. 2015; Moore et al. 2001; Fontaine et al. 2006; Hölker et al. 2015; Lewanzik/Voigt 2014). Vor allem die Anwendung von öffentlicher Straßenbeleuchtung bedarf einer Regulierung, denn der Anteil an öffentlicher Straßen- und Wegebeleuchtung macht einen hohen Anteil an Lichtemissionen aus (Kuechly et al. 2012) und trägt maßgeblich zur Zerschneidung von Landschaften sowie Naturschutzgebieten bei (Reck et al. 2017, S. 9).

Die EU COST Aktion ES1204 LoNNe (Das „*Loss of the Night*“ Netzwerk) hat in vier Jahren interdisziplinärer Zusammenarbeit Empfehlungen für nachhaltige Beleuchtung erarbeitet, welche in die hier beschriebenen Handlungsempfehlungen einfließen. Die Empfehlungen und Stellungnahmen des Netzwerks sind zusammengefasst auf der Webseite der Aktion einzusehen¹⁴. Eine Zusammenfassung notwendiger Maßnahmen zur Reduktion von Lichtverschmutzung für den Schutz der Biodiversität bieten auch Schroer/Hölker (2014) im *Handbook of Advanced Lighting Technology*.

3.1. Schutzgebiete

Kriterien für Lichtschutzgebiete, welche auf den Erhalt der Nachthimmelshelligkeit für das Erleben des Kulturgutes Nachthimmel fokussieren, werden bereits durch die *Internationale Dark Sky Association* gestellt¹⁵. Mehrere Studien weisen aber auch darauf hin, dass Schutzräume mit natürlich dunklen Nächten wichtig sind, um die Biodiversität zu erhalten und dass die Kriterien für Lichtschutzgebiete auf den Artenschutz ausgeweitet werden sollten (z. B. Kronfeld-Schor et al. 2013; Azam et al. 2015; Brüning/Hölker 2015; Grunsven et al. 2017). Diese Bemühungen müssen Hand in Hand gehen mit den Anstrengungen, zusammenhängende Lebensraumkorridore trotz der stetig wachsenden Infrastrukturnetze zu schaffen (Reck et al. 2017). Nicht nur in der Umgebung von Grünbrücken muss ein Schutz vor Beleuchtung geboten werden, auch Lebensraumkorridore benötigen eine Durchgängigkeit, welche für die Baugenehmigung neuer Infrastrukturen, sowie im Rahmen von Ausgleichsmaßnahmen Berücksichtigung finden sollte.

Eine Einteilung des Schutzgebietes in Zonen kann ein wichtiges Hilfsmittel sein, besonders, wenn das Schutzgebiet Besuchereinrichtungen oder Siedlungen enthält. Ein Zonierungskonzept weist normalerweise eine dunkle Kernzone ohne Beleuchtung aus, die durch eine ausgedehnte Pufferzone geschützt wird, in der künstliches Licht möglichst verantwortungsvoll in geringer Intensität und optimaler Abstrahlungsgeometrie verwendet wird (z. B. in Besucherzentren, Campingplätzen oder Ortschaften).

¹⁴ <http://www.cost-lonne.eu/recommendations/>

¹⁵ <http://www.lichtverschmutzung.de/seiten/sternenparks/>

Auf eine Objektbestrahlung von historischen Bauwerken sollte insbesondere in Schutzkerngebieten und in den Pufferzonen verzichtet werden. Wenn dieser Bedarf in Pufferzonen gegeben ist, sollten die dort heimischen Wildtiere kartiert und Schutzräume definiert werden, die durch möglichst bedarfsgerechte Aussparung der Habitate durch Abschirmung der Beleuchtung, Minimierung der Leistungsstärke und zeitlicher Abschaltung, wenn sensitive Wildtiere in ihrem saisonalem Verhalten gestört werden könnten, charakterisiert sind.

Fließgewässer sind oftmals Wanderrouten für Vögel, Fische und Fledermäuse. Die Gebiete rund um Gewässer sind sehr artenreich und tragen Lichtemissionen aufgrund der planen Fläche über weite Strecken. Bei Beleuchtungsplanungen sollten deshalb insbesondere Gewässer vor Lichtimmissionen geschützt werden und in die Planung von Lebensraumkorridoren integriert werden (Brüning/Hölker 2015; Hölker et al. im Druck).

3.2. Beleuchtungsstärkeregelung

Im Sinne des Artenschutzes sollte die installierte Lichtleistung in Außenlichtanlagen möglichst gering gewählt werden, denn Lichtimmissionen wirken sich auf Verhaltensänderungen von Flora und Fauna schon bei sehr geringer Intensität aus (Tab. 2). Für Straßenbeleuchtungsplanungen nach der Europäischen Straßenbeleuchtungsnorm DIN/EN 13201 wird die niedrigste mögliche Beleuchtungsklasse empfohlen. Für Verkehrswege mit mittleren bis höheren Fahrgeschwindigkeiten (M) entspricht das einer Leuchtdichte von $0,3 \text{ cd/m}^2$, oder ungefähr 4 lx . Dieser Wert ist angelehnt an die in Europa empfohlene Helligkeit für Straßenbeleuchtung, welche zwischen $0,3\text{-}2 \text{ cd/m}^2$ liegt (CEN/TR 13201-1: 2004). Als Parameter für die empfohlene Helligkeit für Straßenbeleuchtung werden benannt, (a) die Voraussetzungen des Infrastrukturbereichs, z. B. Kreuzung oder Konfliktbereich, (b) das Verkehrsaufkommen und die Geschwindigkeit, sowie (c) die externen Umwelteinflüsse wie Umgebungsbeleuchtung oder vorherrschende Wetterkonditionen. In Gebieten mit besonderer Relevanz für die Biodiversität können und sollten die Parameter Geschwindigkeit und Umgebungsbeleuchtung reduziert werden, um die möglichst niedrigste Beleuchtungsklasse empfehlen zu können. Für die Genehmigung von Straßenbeleuchtungsanlagen in diesen Gebieten sollte eine Begründung für die Notwendigkeit einer Beleuchtung vorausgesetzt werden und in welchem zeitlichen Rahmen diese Begründung für Beleuchtung gegeben ist.

Grundsätzlich ist bei Lichtplanungen zu berücksichtigen, dass ursprünglich nach unten gerichtetes Licht durch Reflexion am beleuchteten Objekt zu einer störenden Lichtimmission führen kann. Daher ist nicht nur die Beleuchtungsstärke, sondern auch die Leuchtdichte zu berücksichtigen, denn sie bietet ein Maß dafür, wie hell die Beleuchtung indirekt wirkt. Dabei ist weiterhin das Reflexionspotential der zu beleuchtenden Oberfläche zu berücksichtigen, z. B. farbliche Unterschiede des Bodenbelags oder vorherrschende Witterungsbedingungen. Moderne Lichtmanagementsysteme erlauben es, die Emissionen einzelner Leuchten an diese Gegebenheiten anzupassen. Ziel der Lichtmanagementsysteme sollte es sein, einen geeigneten Kontrast mit dem ein Objekt gegenüber seiner Umgebung erscheint mit möglichst geringer Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte herzustellen. Denn durch sehr hohe Leuchtdichten können sich der Kontrast und damit die Erkennbarkeit von dunklen Objekten untereinander

reduzieren. Dies führt oft zu einem Aufrüsten der Beleuchtungsstärke, um die Erkennbarkeit von dunklen Objekten zu verbessern. Sinnvoller ist es aber die maximalen Leuchtdichten direkt in der Leuchte durch eine Optimierung der Abstrahlungsgeometrie zu reduzieren (Lang 2013). Die Kontrastbildung kann weiterhin durch Verwendung von Reflektoren oder Unterschiede der Straßenoberflächen unterstützt werden, z. B. durch farbliche Absetzung von Fußgänger- oder Fahrradwegen.

Insbesondere sollten Außenlichtanlagen das Verkehrsaufkommen flexibel berücksichtigen, z. B. durch eine bedarfsorientierte Anpassung in den späten Abend- und Nachtstunden. Reduzierungsmöglichkeiten um bis zu 67 % kann für Gasentladungslampen durch geeignete Dimmungstechnologie erzielt werden¹⁶. Dabei wird die vorhandene Netzspannung in eine frequenzvariable Lampenspannung umgewandelt. Die Ausgangsspannung bleibt bei diesem Verfahren unverändert. Eine bedarfsorientierte Beleuchtung ist weiterhin durch Bewegungsmelder oder Schaltungen möglich. Besonders die LED-Technologie bietet die Möglichkeit standort- und zeitgenauer Leistungsabsenkung.

Um ein Sicherheitsgefühl für Anliegerstraßen (P-Klasse, EN-13201-2) zu erzeugen, müssen die Faktoren der Gesichts- und der Objekterkennung auf dem Bürgersteig, sowie sonstige Stolpergefahren berücksichtigt werden. Die Gesichtserkennung ist wichtig, um von Passanten und Verkehrsteilnehmern mögliche Absichten bzw. Identitäten anderer Personen in ausreichender Entfernung erkennen zu können und gegebenenfalls Vermeidungsmaßnahmen zu ergreifen. Für diese Faktoren ist die Beleuchtungsstärke entscheidend. Moderne Beleuchtungstechnologien mit hoher Farbwiedergabe erreichen die notwendige Beleuchtungsstärke bei niedrigerem Energieaufwand, als Leuchten mit geringerer Farbwiedergabe, wie beispielsweise LPH oder HPS (Fotios/Goodman 2012). Für die Mindestanforderungen des Beleuchtungsniveaus in unterschiedlichen P-Klassen sollte dieser Vorteil breitbandiger weißer Leuchtmittel Berücksichtigung finden. Fotios/Goodman (2012) diskutieren, dass die niedrigste empfohlenen Oberflächenhelligkeit von 0,3 cd/m² (niedrigste P-Klasse) sowie auch alle darüber liegende Klassen reduziert werden könnten, je nach Farbwiedergabeindex des installierten Leuchtmittels. Das würde bedeuten, dass Kommunen, welche auf moderne LED-Straßenbeleuchtung wechselten, auf Straßen mit bis zu 30 km/h Geschwindigkeitserlaubnis statt 5 nur 2,9 lx und auf Geh- und Radwegen statt 2 lx nur 1 lx Beleuchtungsstärke bereitstellen müssten.

3.3. Zeitliche Abschaltung öffentlicher Beleuchtung

Künstliches Licht sollte nur genutzt werden, wenn es einen wirklich notwendigen Bedarf erfüllt (z.B. Sicherheit). Wenn die Nutzung des öffentlichen Raums in Siedlungen in den späten Abendstunden (z.B. ab 22:00 Uhr, aber spätestens ab Mitternacht) endet, sollte die öffentliche Beleuchtung ausgeschaltet oder zumindest reduziert werden. Das Ausschalten jeder zweiten Leuchte ist dabei wenig empfehlenswert, weil sich in den unbeleuchteten Zwischenräumen Schatten bilden, welche Sicherheitsrisiken bergen könnten. Ratsamer ist es die gesamte Beleuchtungsstärke stufenweise zu dimmen.

¹⁶ <http://www.dimmlight.de/>

Die Maßnahme der zeitlichen Abschaltung ist aber nur bedingt hilfreich, denn der höchste Bedarf an natürlicher Dunkelheit für viele Wildtiere, in den frühen Abendstunden kurz nach Sonnenuntergang, fällt mit der höchsten Notwendigkeit für Beleuchtung im Verkehr zusammen (Day et al. 2015). Zeitliche Abschaltungen könnten Adaptationseffekte in Insektenpopulationen beschleunigen, sie könnten bei Säugetieren zu verbesserten Stoffwechsel führen und bei Fischen die Reproduktionsleistung verbessern (Tab. 2). Über die tatsächlichen Auswirkungen durch zeitliche Abschaltungen der Beleuchtung, zu welcher Zeit die Abschaltung am sinnvollsten durchzuführen wäre und vor allem über Auswirkungen durch standort- und zeitgebundene Abschaltungen, gibt es heute noch unzureichend Studien. Eine siebenjährige Studie mit Skybeamer am Ground Zero in New York zeigt, dass das Verhalten orientierungsloser Vögel, welche in der Strahlung gefangen sind, mit der Abschaltung der Beleuchtung sofort aufgehoben werden kann (Van Doren et al. 2017). Fledermäusen profitieren von Beleuchtungsabschaltungen nicht immer. Fünf von acht Arten profitieren nicht von der zeitlichen Abschaltung, wenn sie nicht schon in frühen Abendstunden praktiziert wird (Azam et al. 2015). Es ist aber anzunehmen, dass saisonales Wanderverhalten wie bei Vögeln (Krijgsveld et al. 2015) oder der Schwarmflug von Eintagsfliegen (Kriska et al. 2007) durch zeitliche Lichtabschaltungen geschützt werden könnten.

3.4. Abstrahlungsgeometrie

Störwirkungen von Außenlichtanlagen werden von der internationalen Beleuchtungskommission (CIE) unterschieden in Raumaufhellung, Himmelaufhellung, psychologische und physiologische Blendung. Die maximal erlaubte Störwirkung wird in Umweltzonen E1-4 und nach Tageszeit geregelt (Walkling/Stockmar 2013). Die Raumaufhellung wird mit Hilfe der Vertikal-Beleuchtungsstärke beispielsweise vor dem Fenster von Wohnräumen bewertet. Maximalwerte für vertikale Beleuchtungsstärken liegen zwischen 0 und 15 lx. Das nach oben gerichtete Licht, das die direkte Himmelaufhellung verursacht, darf je nach Umweltzone einen bestimmten ULR-Wert (d.h. *Upward Light Ratio*) nicht überschreiten (Walkling/Stockmar 2013, S. 139):

ULR 0% = E1: dunkle Bereiche, beispielsweise Nationalparks

ULR 5% = E2: Bereiche mit geringer Gebietsshelligkeit, beispielsweise in ländlicher Umgebung

ULR 15% = E3: mittlere Gebietsshelligkeit, zum Beispiel Wohngebiete in Vororten

ULR 25% = E4: hohe Gebietsshelligkeit, beispielsweise Stadtzentren

Die psychologische Blendung wird durch das Blendmaß beschrieben, welches anhand der Leuchtdichte der Lichtquelle, sowie der Leuchtdichte der Umgebung und von dem Beobachter aus gesehenen Raumwinkel der Lichtquelle ermittelt wird. Für die Begrenzung der psychologischen Blendung werden maximale Lichtstärken der Leuchte in Störrichtung zwischen 0 und 2.500 cd vorgegeben. Die physiologische Blendung von Verkehrsteilnehmern wird durch eine Schwellenwerterhöhung (TI = *threshold increment*) bemessen. Zur Begrenzung der physiologischen Blendung darf der Höchstwert beispielsweise für

Sportanlagen und andere Anlagen, die keine Straßenbeleuchtung darstellen, eine Schwellenwerterhöhung von 15% nicht überschreiten.

Für Verkehrsflächen bieten voll abgeschirmte Leuchten, die im installierten Zustand nur Licht unterhalb der Horizontalen abstrahlen (ULR = 0 %) und möglichst wenig blenden, z. B. entsprechend einer Lichtstärkeklasse G6 (Abb. 6), die bisher nachhaltigste Form für eine Straßenbeleuchtung. Diese höchste Lichtstärkeklasse wird in Sterneparks empfohlen und sollte ebenfalls in Schutzgebieten ausnahmslos für die Straßenbeleuchtung angewendet werden. Vor allem in und um Schutzgebiete und in der Nähe von Gewässern sollten strengere Kriterien für Lichtmissionen Anwendung finden. So sollten Lichtschutzrichtlinien in Zukunft Blendschutz auf wichtige Biotope und auf die Flughöhe von Insekten berücksichtigen. Weder die vorgeschriebene Begrenzung der Raumaufhellung, noch die der Himmelsaufhellung deckt heute die Lichtmission auf die Flughöhe von Insekten ab, welche vor allem in einer Höhe zwischen 5,4 und 1,7 m stattfindet (Soneira 2013). Für einen nachhaltigen Artenschutz sollten daher in Zukunft Lampenschirme und weitere Lichtverteilungsklassen entwickelt werden, welche jegliche Abstrahlung und Reflektion auf die Flughöhe von Insekten minimieren.



Abbildung 6: Beispiel für Leuchten mit Lichtstärkeklasse G6 (Beschränkung der Abstrahlungsgeometrie in Winkeln von 10-20° unterhalb der Horizontalen). Foto: A. Hänel.

Bei Genehmigungen von Fassadenbestrahlungen sollte der Schutz bedrohter Arten Vorrang haben und Quartiere in Gemäuern sollten vor Lichtmissionen geschützt werden (siehe Schutzgebiete 3.1.). Wenn Akzente für die Gestaltung der Nachtlandschaft durch Beleuchtung historischer Bauwerke gesetzt werden sollen, darf die Fläche des Bauwerkes nicht überstrahlt werden und die Reflektion am Bauwerk sollte auf ein Mindestmaß reduziert werden. Eine Möglichkeit der zielgenauen Beleuchtung bietet eine anspruchsvolle neue Technologie, das

Projektionsverfahren. Anhand eines Diapositivs des zu beleuchtenden Objektes innerhalb eines Projektionssystems wird dieses zielgenau angestrahlt. Dies ermöglicht eine gleichmäßige Ausleuchtung und verhindert Störlicht neben dem Objekt (Lang 2013, S. 93). Sogar das Anstrahlen von Objektteilen, z. B. um Ausflugslöcher von Fledermausquartieren zu schützen, kann auf diese Weise gewährleistet werden, so dass es möglich ist, einen spezifischen Schutz für die lokal vorkommenden Arten zu schaffen.

3.5. Spektrale Zusammensetzung der Lichtimmission

Studien über die Auswirkungen unterschiedlicher Lichtspektren auf Flora und Fauna unterscheiden sich sehr und sind teilweise konträr. Zum Beispiel unterscheiden sich Fledermausarten sehr stark in ihrem Verhalten auf Lichtspektren, oder bestimmte wandernde Fledermausarten reagieren exakt auf den grünen Teil des Spektrums besonders empfindlich (Voigt et al. 2017), der für Zugvögel als am wenigsten irritierend empfohlen wird (Poot et al. 2008). Die Studien zeigen, dass die Berücksichtigung aller lokal vorkommenden Arten für die spektrale Zusammensetzung der Beleuchtung hoch komplex ist. Für die Entwicklungen ortsspezifischer, intelligenter Beleuchtungslösungen ist noch viel Forschung notwendig. Mit heutiger Technologie kann aber schon heute dem Schutz von Wildtieren entgegengekommen werden:

Beleuchtung mit grellem Licht - und besonders mit Licht unterhalb einer Wellenlänge von 500 nm (blau) - sollte während des Abends und der Nacht weitestgehend vermieden werden. Lampen für Außenbereiche sollten eine Farbtemperatur von weniger als 3000 K haben (siehe dazu Abb. 7. Denn die relevantesten Auswirkungen auf Insekten und Amphibien und einiger andere Taxa werden durch den kurzwelligen Spektralbereich hervorgerufen (Tab. 3). Dieser Spektralbereich wirkt sich direkt auf melanopsinhaltige Ganglienzellen, ein Photorezeptorsystem der Netzhaut, das bei höheren Wirbeltieren für die Unterdrückung des Melatonins involviert ist (Bailes/Lucas 2013; Enezi et al. 2011).

Weiterhin wirkt die UV-Strahlung, welche für den Menschen nicht sichtbar ist, besonders attraktiv auf Vögel, Insekten und Amphibien (Mège et al. 2016; Glösmann et al. 2008; Bennett/Cuthill 1994; Avilés/Parejo 2013; Jong de et al. 2017). Dieser Spektralbereich sollte daher für die Außenraumbelichtung in der Nacht keine Anwendung finden oder möglichst restlos ausgefiltert werden.

Aber auch künstliches Licht im langwelligen Bereich kann sich auf unterschiedliche Taxa auswirken. Vor allem bei Nagetieren ist bekannt, dass sie auch im langwelligen Spektralbereich eine Unterdrückung der Melatoninproduktion erfahren (Dauchy et al. 2015). Pflanzen reagieren empfindlich auf den langwelligen Spektralbereich (Cathey/Campbell 1975) und auch Vögel reagieren auf rotes Licht (Jong de et al. 2017; Poot et al. 2008). Das bedeutet, dass die Wahl des Leuchtmittels allein keinen hundertprozentigen Artenschutz gewährleisten kann, sondern nur im Zusammenspiel mit anderen Maßnahmen, um die negativen Auswirkungen auf Flora und Fauna zu reduziert werden können, wie z. B. durch Beleuchtungsstärkeregelung, Optimierung der Abstrahlungsgeometrie und zeitliche Abschaltung.

In Abb. 7 werden die spektralen Verteilungen einiger Leuchtmittel dargestellt. Deutlich wird hier, wie der Blaulichtanteil ab 2400 K deutlich zunimmt. Im Außenbereich allgemein, insbesondere aber in Schutzgebieten sollte diese kurzwellige Lichtemission vermieden werden. Empfehlenswert sind Natriumdampf-Niederdrucklampen (LPS), Natriumdampf-Hochdrucklampen (HPS) mit Dimmungstechnologie und LED mit möglichst geringem Blaulichtanteil, wie schmalbandige Amber LED oder PC Amber.

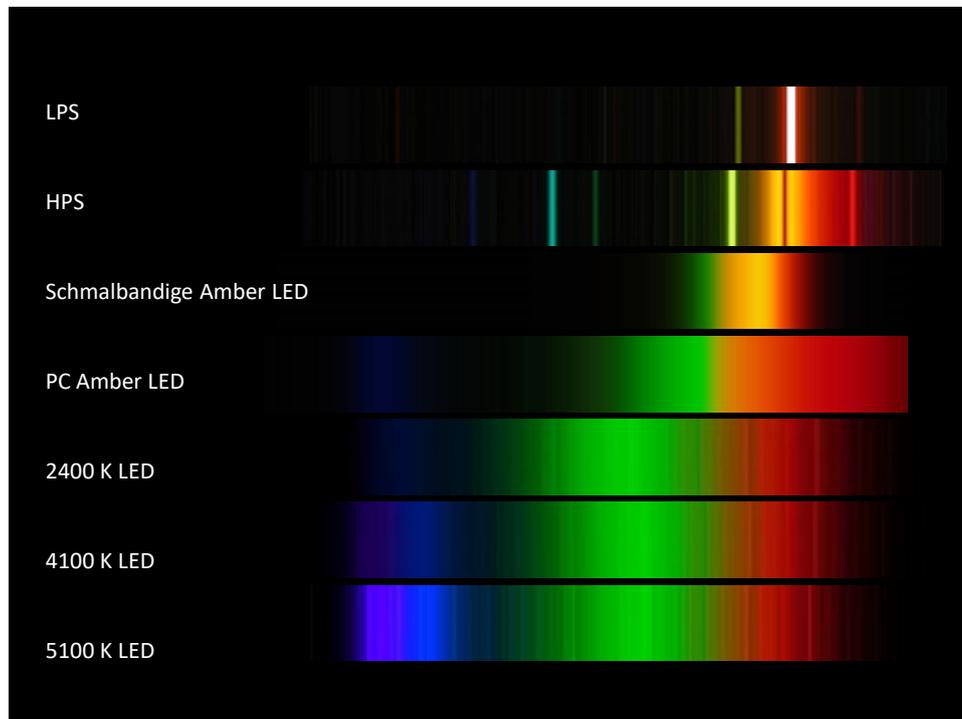


Abbildung 7: Lichtspektren unterschiedlicher Leuchtmittel, Natriumdampf- Niederdruck und Hochdruck und LED mit unterschiedlichen Farbtemperaturen nach „Flagstaff Darkskies Coalition“

4. Beurteilung und Messung von Lichtimmissionen

Die aktuelle Licht-Richtlinie der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) stellt den Immissionsschutzbehörden bundesweit ein Beurteilungssystem zur Verfügung. Damit lassen sich Lichtimmissionen im Sinne des Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) bewerten. Die Richtlinie besitzt in Deutschland einen bindenden Charakter. Das heißt, die Anwendung ist obligatorisch für nicht öffentliche Beleuchtung. Zu den lichtemittierenden Anlagen zählen künstliche Lichtquellen aller Art wie z. B. Scheinwerfer zur Beleuchtung von Sportstätten, von Verladeplätzen und für Anstrahlungen sowie Lichtreklamen, aber auch hell beleuchtete Flächen wie z. B. angestrahlte Fassaden. Ausgenommen sind Anlagen zur Beleuchtung des öffentlichen Straßenraumes, Beleuchtungsanlagen von Kraftfahrzeugen und dem Verkehr zuzuordnende Signalleuchten¹⁷. Inhaltlich umfasst die Richtlinie im Wesentlichen die beiden Bereiche Raumaufhellung und psychologische Blendung¹⁸. Die Vorgaben zur einheitlichen Messung und Beurteilung von

¹⁷ https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_show_anlage?p_id=583

¹⁸ Bei der Blendung durch Lichtquellen wird zwischen der physiologischen und psychologischen Blendung unterschieden. Bei der physiologischen Blendung wird das Sehvermögen durch Streulicht im Glaskörper des

Lichteinwirkungen ermöglichen eine Abschätzung, ob eine erhebliche Belästigung für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft im Sinne des BImSchG vorliegt (Walkling/Stockmar 2013, S. 139-140). In den Hinweisen zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen der LAI, 2012¹⁹ werden Lichtimmissionen als schädliche Umwelteinwirkung nach dem BImSchG eingestuft, „(...) wenn sie nach Art, Ausmaß und Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder für die Nachbarschaft herbeizuführen.“ Neben dem Schutz des Menschen ist es ebenfalls Ziel des Gesetzes, Tiere und Pflanzen vor schädlichen Umwelteinflüssen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen. Es werden weiterhin geeignete Maßnahmen zum Schutz von Insekten und Vögeln genannt, deren Bemessung im Text der Richtlinie aber nicht weiter erläutert wird. Im Ergebnis gemäß BImSchG (§ 3 Abs. 5) unterliegen nicht genehmigungsbedürftige Lichtanlagen der Vermeidungspflicht, wenn die hervorgerufenen Lichtimmissionen eine schädliche Umwelteinwirkung verursacht. Eine objektive Beurteilung durch Dritte, ab wann eine Lichteinwirkung als erhebliche Belästigung im Sinne des § 3 Abs. 1 BImSchG einzuschätzen ist, gestaltet sich aber aufgrund vieler subjektiver Parameter oft schwierig²⁰. Das bedeutet, dass der Licht-Immissionsschutz in der heutigen gesetzlichen Fassung vielen subjektiven Variablen unterliegt und ungenügend Gesetzesvorlagen für den Artenschutz bietet.

Weitere Instrumente zur Vermeidung und Verminderung von Lichtimmissionen stellen:

- Das Raumordnungsgesetz (ROG), welches Freiraumschutz und raumbedeutsame Erfordernisse und Maßnahmen des Naturschutzes berücksichtigt.
- Das Bundes-Baugesetzbuch (BauGB), das gebietsbezogene Maßnahmen zum Schutz der Umwelt und bietet einschlägigen Fachgesetzen für die Vorhabenplanung regelt.
- Das Instrument der Bauleitplanung bietet Möglichkeiten, Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft durch Lichtimmissionen vor einer Installation zu vermeiden oder zu reduzieren, sowie Umsetzungen der Eingriffsregelungen wie das Vermeidungs- oder Ausgleichsgebot anzuwenden (Böttcher 2001, S. 131-132 und 156-158.). Dafür müssen allerdings vorerst die Erheblichkeit und Nachhaltigkeit einer Beeinträchtigung nachgewiesen werden.
- Das Bundes-Naturschutzgesetz (BNatSchG), bietet die nachhaltige Sicherung von Natur und Landschaft in ihren Bestandteilen und stellt damit die Nutzungsmöglichkeiten als Lebensgrundlage des Menschen und als Voraussetzung für Erholung sicher.

In folgenden Abschnitten regelt das BNatSchG den Schutz besonders sensibler Bereiche (nach Böttcher 2001):

- a) Landschaftsplanung (§§ 5-7 BNatSchG, Zweiter Abschnitt), welche negative Veränderungen von Natur und Landschaft z. B. die Ausweisung von Erfordernissen und Maßnahmen zum Schutz von besonders empfindlichen Lebensräumen und deren Lebensgemeinschaften behandelt,

Auges vermindert. Die Störimpfindung durch Blendung wird als psychologische Blendung bezeichnet und kann auch ohne Minderung des Sehvermögens auftreten und zu erheblicher Belästigung führen.

¹⁹ <http://www.lai-immissionsschutz.de/servlet/is/20170/>

²⁰ <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/3467.htm>

- b) Eingriffsregelung (§8 BNatSchG, Dritter Abschnitt), welche vorschreibt, vermeidbare Beeinträchtigungen des Naturhaushaltes und des Landschaftsbildes durch vorrangige Eingriffe zu unterlassen und die verbleibenden, erheblichen und nachhaltigen Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft mittels Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen zu kompensieren,
- c) Schutzgebietsvorschriften (§12 f BNatSchG, Vierter Abschnitt), für konkrete Vorkehrungen und Maßnahmen, die Lichtimmissionen vermindern oder sogar verhindern können. Laut §19 c in Verbindung mit der Flora-Fauna-Habitat Richtlinie (FFH-RL) sind negative Einwirkungen von außen, d. h. Fernwirkungen wie Verdriftung von Pestiziden, Nährstoffeinträgen, Lärm- und Lichteinwirkungen zu unterbinden, wenn sie den Erhaltungszustand der Lebensräume und Arten im Schutzgebiet negativ beeinflussen.

Laut BNatSchG ist schlussfolgernd die Bemessung von Lichtimmissionen dringend erforderlich, denn unterschiedliche Studien weisen auf die Veränderung von Nachtlandschaften und Lebensräumen durch Beleuchtung deutlich hin. Gaston et al. (2015) beschreiben in bis zu 42% der ausgewiesenen Schutzgebiete weltweit eine Erhellung des Nachthimmels und Labuda et al. (2015) benennen konkret, dass 70% der kartierten Straßenbeleuchtung im Naturpark Nossentiner / Schwinzer Heide aufgrund unzureichender Abschirmung der Leuchten zu einer Erhellung der Nachtlandschaft beitragen.

Die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung bezieht nicht nur Aspekte der Beeinträchtigung der Funktionen des Naturhaushalts ein, sondern ebenso Veränderungen des Landschaftsbildes. Böttcher (2001, S. 133) weist darauf hin, dass für das Landschaftsbild die jahres- und tageszeitlich wechselnden Lichtverhältnisse ebenso eine Rolle spielen, wie die Flächennutzung. Aufgrund mangelnder naturwissenschaftlicher Untersuchungen und Ungewissheiten über Art und Umfang der Beeinträchtigungen kommen aber in der Regel weder Ausgleichs- noch Ersatzmaßnahmen zum Tragen (Böttcher 2001, S. 134). Diese Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen stellen aber für die Landschaftsplanung eine zentrale Steuerungsfunktion, um Lichtimmissionen effektiv bei naturschutzfachlichen Begutachtungen zu bewerten und in Maßnahmen zum Schutz von Arten und Lebensräumen einzubeziehen (Hofmeister 2013).

Straßenbeleuchtungen sind nach heutigem Stand des BImSchG von der Vermeidungspflicht ausgenommen. Empfehlungen zur Messung und Minderung von Lichtimmissionen durch künstliche Lichtquellen werden in der LiTG-Schrift 12.3²¹ aufgezeigt. Als beschreibende Größe der Lichtquelle dient der Lichtstärkeverteilungskörper und für die Bewertung der Himmelsaufhellung die Abstrahlung in den oberen Halbraum (ULR). Eine Empfehlung für Lichtimmissionsmaxima für Nutzflächen ist lediglich für Fenster von Wohnungen bzw. begrenzende Wände von Balkonen und Terrassen gegeben, aber nicht für Biotope (Völker/Krenz 2013, S. 87). Weiterhin fehlt vielen Normen für Infrastrukturbeleuchtung die Berücksichtigung sicherheitsrelevanter Auswirkungen der Lichtimmissionen. Beispielsweise schreibt die DIN 67524 Mindestanforderungen für die Beleuchtungsstärke von Straßentunneln und Unterführungen vor. Die Lichtimmission aus den Tunneln heraus kann aber Attraktionen auf Insekten ausüben, folglich deren Räuber wie Vögel und Fledermäuse in

²¹ LiTG (2011): Publikation 12.3: Empfehlungen für die Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen. Berlin: Deutsche Lichttechnische Gesellschaft.

die Straßentunnel anziehen und damit zu Orientierungslosigkeit und fatalen Kollisionen führen. Die Normungen für Sicherheitsvorkehrungen im Straßenverkehr sollten diese Risiken durch nichtintendierte Lichtimmissionen auf Fauna, stärker in Betracht ziehen und entsprechende zeit- und ortsspezifische Lichtimmissionsgrenzwerte festlegen, zum Schutz der Fauna und zur Prävention von Kollisionen mit Kraftfahrzeugen und Infrastrukturen.

Nachhaltige Lichtplanungen erfordern ein regionales Gesamtkonzept um Lichtkontraste zu optimieren und dadurch das Beleuchtungsstärkeniveau der Umgebung niedrig zu halten (Lang 2013). Aber auch an frei stehenden Objekten, besonders in der Nähe von Gewässern oder Schutzgebieten sollten Lichtanlagen mit Konzepten geplant werden, welche Lichtimmissionen in benachbarte Biotope minimieren. Für die Bemessung der vertikalen Lichtemissionen können Fotografien dienen (Siehe dieses Gutachten, Themenfeld 1, Kapitel 3.1.4.). Dieser Ansatz der Bemessung funktioniert aber nur in einem Vorher-Nachher-Vergleich und unterliegt vielen subjektiven Variablen. Um ungewollte Lichtimmissionen außerhalb der Nutzfläche durch vertikale Emissionen, Himmels- und Raumaufhellung zu kalkulieren gibt es unterschiedliche Berechnungen, wie beispielsweise im CIE-Report 150²² beschrieben. Beleuchtungsanlagen werden nach ihrer Abstrahlungsgeometrie klassifiziert und Grenzwerte für nach oben abgestrahltes Licht (ULR) je nach Umweltzone definiert. Die vertikale Abstrahlung wird in dieser Publikation aber nur auf benachbarte sensible Bereiche berechnet, wie Fenster von Wohnräumen. Die Lichttechnische Gesellschaft (LiTG-Publikation 12.3, 2011) bezieht die Blendung beim Blick ins Freie oder in die Landschaft, sowie Beeinträchtigungen von Flora und Fauna mit ein, indem der Anteil der direkt oder durch Reflektion in den oberen Halbraum abgestrahlten Emission des gesamten Lichtstroms der Leuchten als Prozentsatz (*upward flux ratio*) berechnet wird. Diese Berechnung geht auf Berechnungen der Vereinigung der französischen Beleuchtungsingenieure zurück²³. Ein weiterer Lösungsansatz verfolgt die Bewertung der Lichtemission an der Objektgrenze, z. B. die Grenzen eines Grundstückes. Brons et al. (2008) haben dafür eine virtuelle Berechnungsbox beschrieben, welche eine Außenbeleuchtungsinstallation umgibt, die der Grundstücksgrenze folgt und eine obere Ebene enthält. Anhand dieser virtuellen Box könnte das Licht berechnet werden, das die Ebene in jede Richtung kreuzt und es könnten Grenzwerte für die Überschreitung der Grundstücksgrenze definiert werden. Auf diese Weise kann der Anwender frei über die Leuchtentypen entscheiden, muss aber die Lichtemission an der Grenze des Objektes unter einem bestimmten Grenzwert halten oder könnte zu Ausgleichsmaßnahmen für die Überschreitung des Grenzwertes veranlasst werden.

Nach heutigem Stand der Technik könnten theoretisch Lichtemissionen für Objektgrenzen durch kommerzielle Beleuchtungssoftware (z.B. Relux oder DIALux) berechnet werden. Nur die Reflektion von Oberflächen kann mit den heute auf dem Markt befindlichen Softwaresystemen noch nicht hinreichend berechnet werden. Weiterhin sind nach heutigem Stand noch keine Grenzwerte für die Lichtemission definiert. Die Grenzwerte für nichtintendierte Raumaufhellung auf Häuserfassaden und Wohnfenster erscheinen für Schutzgebiete und Biotope zu hoch, denn Schwellenwerte für Auswirkungen von

²² Commission Internationale de l'Éclairage. CIE Publication 150. Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installations. Vienna: CIE, 2003.

²³ Association Française de l'Éclairage. Les Nuisances Dues à la Lumière. Paris: AFE, 2006

Lichtimmissionen auf Physiologie und Verhalten von Tieren liegen sehr niedrig, oft schon bei 0,3 lx (Tab. 2). Es besteht dringender Forschungsbedarf, um die Grenzwerte für nichtintendierte Lichtemissionen auf Biotope zu definieren und Kalkulationssoftware für Lichtemissionen zu optimieren (siehe Kapitel 6).

5. Die Unterstützung von Maßnahmen der Bundesregierung zum Schutz der Umwelt, des Klimas und von Ressourcen

Auch wenn nach heutigem Stand der Wissenschaft und Technik noch keine optimale Lösung für die Berechnung und Begrenzung von Lichtimmissionen gegeben werden kann, unterstützen alle in Kapitel 3 genannten Maßnahmen zur Reduzierung der nichtintendierten Lichtemissionen die Bemühungen der Bundesregierung zum Schutz der Umwelt, des Klimas und von Ressourcen. Im Folgenden werden wir detailliert auf bestehende Maßnahmen der Bundesregierung eingehen und Handlungsempfehlungen unterbreiten, wie diese Maßnahmen durch Regulierungen zur Minimierung der negativen Auswirkungen durch Lichtverschmutzung unterstützt und optimiert werden könnten.

5.1. Klimaschutzziele

Alle hier gelisteten Maßnahmen zur Reduzierung von Lichtimmissionen in Nachtlandschaften unterstützen die ambitionierten Ziele für Klimaschutz und Nachhaltigkeit, welche die Bundesregierung im Klimaschutzplan 2050 verfolgt und für das Jahr 2020 eine Treibhausgasminderung von mindestens 55% im Vergleich zum Jahr 1990 vorsieht. Im Rahmen der Straßenbeleuchtung können deutliche Einsparungen und nachhaltige Emissionsminderungen erzielt werden, wenn Lichtplanungen stärker reguliert würden.

Durch Sanierung von Außenbeleuchtungslösungen und eine Umrüstung auf moderne LED-Beleuchtung könnten Kommunen und Städte bis zu 2,2 Milliarden Kilowattstunden Strom einsparen und rund 1,4 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen vermeiden²⁴. Aufgrund der hohen Effizienz der LED-Beleuchtung werden Umrüstungen durch die LED-Leitmarktinitiative und finanziell durch das BMUB im Rahmen der Klimaschutzinitiative unterstützt. Wird eine Beleuchtungsumrüstung jedoch ohne eine solide Lichtplanung durchgeführt, ist die Beleuchtungsqualität nicht gewährleistet. Das kann sowohl zu Beschwerden von Bürgern in Bezug auf Blendung, Helligkeit oder Lichtfarbe führen als auch die negativen Auswirkungen auf Ökosysteme verstärken. Zudem besteht die Gefahr, dass obwohl LED-Lampen Energie und Geld sparen können, die Ersparnis für zusätzliche oder hellere Lampen ausgegeben wird, was mit einem weiteren Verlust natürlicher Nachtlandschaften einhergeht. So nahmen trotz der weltweiten Umrüstung auf LED die Intensität der künstlichen Beleuchtung als auch die beleuchteten Flächen seit 2012 global um jährlich zwei Prozent zu – ein klassischer Rebound-Effekt (Kyba et al. 2017).

Wenn die Qualität der LED-Beleuchtung nicht garantiert wird, kann es weiterhin zu stärkerem Flicker kommen. Flickern entsteht weil manche Leuchtmittel keinen konstanten Lichtstrom

²⁴ BMUB, Pressemitteilung, 2017: <http://www.bmub.bund.de/pressemitteilung/klima-und-kasse-mit-led-lampen-entlasten/>

produzieren, sondern eine Reihe von Impulsen. Das flackernde Licht kann sich nachteilig auf Menschen und Tiere auswirken (Inger et al. 2014). Hier besteht dringender Forschungsbedarf, um herauszufinden welche Arten von diesem Flicker in welcher Weise betroffen sind (Kapitel 6).

Aufgrund einzelner Untersuchungen wird die LED-Beleuchtung als besonders insektenfreundlich vermarktet. Dies ist jedoch eine nicht immer zutreffende Pauschalität, denn auch LED-Beleuchtung zieht Insekten aus ihren Habitaten an und stellt eine Barriere in ihrem Lebensraum dar (siehe Kapitel 2.2.1.). Zudem kann es durch erhöhte Emissionen im blauen Spektralbereich zu einer Beeinflussung des zirkadianen Systems höherer Wirbeltiere kommen. Dringend werden daher Richtlinien benötigt, um mögliche negative Begleiterscheinungen bei der Umrüstung auf LED-Beleuchtung zu minimieren.

Leistungsreduzierung und Abschaltungen bieten die höchsten Einsparpotentiale und verlängern die Lebensdauer der Leuchtmittel. Dieses Potenzial der Energieeinsparung wird aber leider oft nicht genutzt, obwohl die LED-Technologie hier eindeutige Vorteile aufweist.

Eine Investition in LED-Beleuchtung ist nicht der einzige Weg zu Energieeinsparung, durch stufenweises dimmen von Gasentladungslampen kann bis zu 67% gedimmt werden²⁵. Wenn nun von 21-24 Uhr um 30% und von 24 bis 6 Uhr auf 67% die Beleuchtungsstärke gedimmt würde, könnten bei 4000 Nachtstunden pro Jahr über 50% Energieverbrauch gespart werden. Vergleichsweise wird durch eine Umrüstung von HPS auf LED-Beleuchtung bei vergleichbarer Beleuchtungsstärke und Verteilung, ohne bedarfsgerechte Beleuchtungsreduzierung 59% Energie eingespart (Schroer, unveröffentlichte Zahlen des *Verlust der Nacht* Experimentalfeldes). Durch gänzlichem Abschalten der Beleuchtung für täglich 5½ Stunden (z. B. von Mitternacht bis 5:30 Uhr morgens) könnte der Energieverbrauch bei jährlich ca. 4.000 Nachtstunden ebenfalls halbiert werden.

Zusammenfassend möchten wir folgende Regulierungen für die Ausschöpfung der Energieeinsparungspotentiale in der öffentlichen Beleuchtung empfehlen:

- Regional verbindliche Lichtplanungskonzepte oder Masterpläne für ein einheitliches Beleuchtungsstärkeniveau
- Reduzierung der Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte auf ein Mindestmaß
- Zeitliche Abschaltung oder Reduzierung der Beleuchtungsstärke angelehnt an das tatsächliche Verkehrsaufkommen
- Bemessung der umweltrelevanten Lichtemission nach dem Vorsorgeprinzip
- Aufnahme der Straßenbeleuchtung in die Vermeidungspflichtenregelung des BImSchG

5.2. Maßnahmen gegen Lärmbelästigung

„Der Bund sollte nach dem Vorbild der Technischen Anordnung (TA) Luft und der TA Lärm auch eine „TA Licht“ erlassen.“ (Hettlich/Herzog 2009). Diesen Satz möchten wir hier aufgreifen, weil Lichtimmissionen vor allem mit Lärmimmissionen vergleichbar sind. Denn Daten über die Exposition von Lärm und Licht sind im Vergleich zu Daten über andere Umweltprobleme oft unvollständig und aufgrund der unterschiedlichen Mess- und

²⁵ http://www.dimmlight.de/fileadmin/dimmlight/downloads/160120_LED_-_dL_Vergleich_70W_NAV.pdf

Bewertungsverfahren oft schwer vergleichbar. Die Empfindlichkeit gegenüber Schalldruckpegel und unterschiedlichen Tonfrequenzen unterscheidet sich stark zwischen Wildtierarten und dem Menschen, vergleichbar mit der artspezifischen Wahrnehmung von Lichtintensität und Farbspektren. Der Lärmschutz wurde aber im Gegensatz zum Licht bereits in Richtlinien und im Gesetz berücksichtigt (Tab 4), wahrscheinlich weil sich das menschliche Gehör nicht wie Augen schließen lässt.

Normen für die Planung von Lichtenanlagen im Außenraum beinhalten größtenteils nur Mindestanforderungen für die Sicherheit (z. B. DIN 13201-1 für Straßenbeleuchtung, DIN EN 12464-2 für Licht und Beleuchtung von Arbeitsstätten im Freien, oder DIN EN 12193 für Licht und Beleuchtung von Sportstätten). Es fehlen aber Verordnungen, Richtlinien und Höchstwertbemessungen für die Reduzierung der negativen, nichtintendierte Auswirkungen durch Beleuchtungsanwendungen im Außenraum, wie sie für Lärm schon formuliert sind (Tab. 4).

Durch das Grünbuch „Künftige Lärmschutzpolitik“ wurde 1996 der Lärmschutz auf den Weg in Richtung rechtliche Regelungen in der Umwelt gebracht. Führende Wissenschaftler trugen die Erkenntnisse wie sie die Folgen des Nachtlärms eindämmen und damit zu mehr Gesundheit in der Region beitragen können aus der Europäischen Region der WHO zusammen und verwendeten sie für den Entwurf von Leitlinien (Abb. 8)²⁶

²⁶ http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0017/43316/E92845.pdf

Tabelle 4: Auswahl aus den Richtlinien und Normen für Lärmschutz (aus: Städtebauliche Lärmfibel, Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg²⁷)

Emission / Lärmquelle	
DIN 45 635	Geräuschemessung an Maschinen
DIN EN 12354-1	Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften
VDI 2571	Schallabstrahlung von Industriebauten
DIN EN 11690	Akustik – Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen, maschinenbestückter Arbeitsstätten
VDI 3720-2	Lärmarm konstruieren – Beispielsammlung
Transmission / Schall-Ausbreitung	
DIN ISO 9613-2	Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren
VDI 2714	Schallausbreitung im Freien
VDI 2720/1	Schallschutz durch Abschirmung im Freien
VDI 2720/3	Schallschutz durch Abschirmung im Nahfeld; teilweise Umschließung
Immission / Lärmeinwirkung	
DIN 45 641	Mittelung von Schallpegeln
DIN 45 645-1	Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen; Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft
DIN 4109	Schallschutz im Hochbau, Anforderungen und Nachweise
VDI 4100	Schallschutz im Hochbau – Wohnungen – Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz
VDI 2719	Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen
Emission – Transmission – Immission	
DIN 18005-1	Schallschutz im Städtebau, Grundlagen und Hinweise für die Planung
16. BImSchV	Verkehrslärmschutzverordnung
Schall 03	Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen
RLS-90	Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen
18. BImSchV	Sportanlagenlärmschutzverordnung
FluLärmG	Fluglärmschutzgesetz
1. FlugLSV	Verordnung über die Datenerfassung und das Berechnungsverfahren
2. FlugLSV	Flugplatz-Schallschutzmaßnahmenverordnung
TA Lärm	Verwaltungsvorschrift „Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm“
AVV Baulärm	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm

²⁷ <http://www.staedtebauliche-laermfibel.de>

Effect		Indicator	Threshold, dB
Biological effects	Change in cardiovascular activity	*	*
	EEG awakening	$L_{A,max,inside}$	35
	Motility, onset of motility	$L_{A,max,inside}$	32
	Changes in duration of various stages of sleep, in sleep structure and fragmentation of sleep	$L_{A,max,inside}$	35
Sleep quality	Waking up in the night and/or too early in the morning	$L_{A,max,inside}$	42
	Prolongation of the sleep inception period, difficulty getting to sleep	*	*
	Sleep fragmentation, reduced sleeping time	*	*
	Increased average motility when sleeping	$L_{night,outside}$	42
Well-being	Self-reported sleep disturbance	$L_{night,outside}$	42
	Use of somnifacient drugs and sedatives	$L_{night,outside}$	40
Medical conditions	Environmental insomnia**	$L_{night,outside}$	42

Table 1
Summary of effects and threshold levels for effects where sufficient evidence is available

* Although the effect has been shown to occur or a plausible biological pathway could be constructed, indicators or threshold levels could not be determined.

Effect		Indicator	Estimated threshold, dB
Biological effects	Changes in (stress) hormone levels	*	*
Well-being	Drowsiness/tiredness during the day and evening	*	*
	Increased daytime irritability	*	*
	Impaired social contacts	*	*
	Complaints	$L_{night,outside}$	35
	Impaired cognitive performance	*	*
Medical conditions	Insomnia	*	*
	Hypertension	$L_{night,outside}$	50
	Obesity	*	*
	Depression (in women)	*	*
	Myocardial infarction	$L_{night,outside}$	50
	Reduction in life expectancy (premature mortality)	*	*
	Psychic disorders	$L_{night,outside}$	60
	(Occupational) accidents	*	*

Table 2
Summary of effects and threshold levels for effects where limited evidence is available**

* Although the effect has been shown to occur or a plausible biological pathway could be constructed, indicators or threshold levels could not be determined.

** Note that as the evidence for the effects in this table is limited, the threshold levels also have a limited weight. In general they are based on expert judgement of the evidence.

Abbildung 8: Zusammenfassung der Schwellenwerte für Lärm, für die ausreichend Nachweise vorliegen. (Leitlinien für die Europäische Region gegen Nachtlärm) Beispiel Tabelle 1 und 2.

Im Jahr 2002 trat die „Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und die Bekämpfung von Umgebungslärm“ in Kraft. Das grundsätzliche Ziel der Richtlinie lautet: „Die Gewährleistung eines hohen Gesundheits- und Umweltschutzniveaus ist Teil der Gemeinschaftspolitik, wobei eines der Ziele im Lärmschutz besteht.“ Hierfür ist es

notwendig, „schädliche Auswirkungen, einschließlich Belästigung, durch Umgebungslärm zu verhindern, ihnen vorzubeugen oder sie zu mindern.“²⁸

Maßnahmen der Umgebungslärmrichtlinie beinhalten:

- Die Belastung durch Umgebungslärm wird anhand von Lärmkarten nach gemeinsamen Bewertungsmethoden ermittelt;
- Es wird sichergestellt, dass die Öffentlichkeit über Umgebungslärm und seine Auswirkungen informiert wird;
- Die Mitgliedsstaaten erstellen Aktionspläne, die auf Basis von Lärmkarten erarbeitet wurden. Ziel ist es, den Umgebungslärm soweit erforderlich – und insbesondere in Fällen, in denen das Ausmaß der Belastung gesundheitsschädliche Auswirkungen haben kann – zu verhindern, zu mindern sowie die Umweltqualität in den Fällen zu erhalten, in denen sie zufriedenstellend ist.

In Deutschland wurde die Richtlinie in das BImSchG aufgenommen. Der sechste Teil des BImSchG die „Lärminderungsplanung“ bietet Aussagen zu Zuständigkeiten, Zeiträumen und Anforderungen an Lärmkarten und Lärmaktionsplänen. Der Schutz vor Lichtimmissionen könnte in diese Lärmkarten und –Aktionen einfließen, um die Umwelt während der skotopischen Phase im gleichen Zuge vor Lichtwellen zu schützen, denn die Auswirkungen durch Licht ähneln denen durch Lärm in der Nacht: die Störung der Ruhephasen beeinträchtigt Stoffwechsel- und Regenerationsprozesse bei Mensch und Tier (Vergleich Tab. 3 und Abb. 8).

5.3. Maßnahmen zum Schutz von Lebensräumen und der biologischen Vielfalt

Am 1. Februar 2017 wurde das Bundesprogramm "Blaues Band Deutschland" beschlossen. Die Bundesregierung will verstärkt in die Renaturierung von Bundeswasserstraßen investieren und damit neue Akzente in Natur- und Gewässerschutz, Hochwasservorsorge sowie Wassertourismus, Freizeitsport und Erholung setzen.²⁹ Eine weitere Initiative, die des „Europäischen Grünen Bandes“, welche sich aufgrund der historischen Situation entlang der gesamten ehemaligen Grenze des „Eisernen Vorhangs“ entwickeln konnte, durchzieht ganz Europa von der Barentssee im Norden bis zur Adria und zum Schwarzen Meer im Süden. Es erstreckt sich über gut 12.500 km und verläuft entlang der Grenzen von 24 Staaten.³⁰

Diese Initiativen könnten genutzt werden, um flächenverbundene Lichtschutzzonen zu entwickeln und der rasant zunehmenden Zerschneidung der Lebensräume durch Infrastrukturentwicklung und Beleuchtung entgegenzuwirken (Reck et al. 2017).

Die Initiativen eignen sich insbesondere um zusammenhängende Lebensraumkorridore zu entwickeln und Wanderkorridore für Wildtiere zu schaffen und leisten in diesem Zuge einen wichtigen Beitrag zum Schutzgebietssystem Natura 2000 in Europa. Die Nutzung von Natura

²⁸ UBA 04.09.2017: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/umgebungslaermrichtlinie>

²⁹ www.blaues-band.bund.de

³⁰ https://www.bfn.de/0311_gruenes_band_europa.html

2000-Gebieten für den Menschen ist kein Tabu, sondern es sollen wirtschaftliche und soziale Interessen mit den Richtlinien des Naturschutzes übereinkommen. Das Natura Netzwerk besteht seit 1992 aus Flora-Fauna-Habitat- (FFH)-Schutzgebieten. Ist in einem Natura 2000-Gebiet oder in dessen Nähe ein Vorhaben wie z. B. die Errichtung eines Bauwerks geplant, ist dieses grundsätzlich möglich, wenn davon keine negativen Auswirkungen auf die für das Gebiet jeweils festgelegten Erhaltungsziele für die dort geschützten Arten und Lebensräume ausgehen.

Für Pläne und Projekte, die auf ein Natura 2000-Gebiet einwirken könnten, besteht deshalb kein kategorisches Verbot, sondern jedes Vorhaben unterläuft einer FFH-Verträglichkeitsprüfung. Erhebliche Beeinträchtigungen auf das FFH-Gebiet sind auszuschließen. Ausnahmen entstehen wenn keine geeigneten Alternativen gegeben und zwingende Gründe des überwiegend öffentlichen Interesses vorliegen die höherwertig einzustufen sind als der Schutzanspruch des Gebiets. Für solche Vorhaben, die eine Ausnahme beantragen, müssen entstehende Beeinträchtigungen durch geeignete Ausgleichsmaßnahmen kompensiert werden, so dass das Schutzgebietsnetz insgesamt ohne Funktionsverluste und der Wert des Natura 2000-Netzes erhalten bleibt.³¹

Lichtimmissionen sollten als Beeinträchtigung innerhalb der Gebiete aber auch von außen verstärkt Berücksichtigung finden, um der rasanten Zunahme der Nachthimmelshelligkeit von Schutzgebieten entgegenzusteuern (Gaston et al. 2015; Falchi et al. 2016). Vermeidungspflicht und Kompensationsauflagen sollten nicht nur für Bauvorhaben sondern auch für Lichtplanung und mögliche daraus entstehenden Barriereeffekte Anwendung finden.

In Deutschland wurde 2007 die Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt vom Bundeskabinett verabschiedet³². Es geht in der nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt (NSB) gleichermaßen um Schutz, nachhaltige Nutzung und soziale Aspekte der Erhaltung der biologischen Vielfalt.

Es fehlen der NSB heute noch Maßnahmen zum Schutz der Biodiversität durch nachhaltige Beleuchtungslösungen, wie z. B. die Entwicklung geeigneter Leuchtenabschirmungen für Lichtverteilungskurven, welche Lichtimmissionen auf der Flughöhe von Insekten minimiert, oder Vorgaben für die Nutzung von Technologien zur Reduzierung der Beleuchtungsstärke. Lichtimmissionsschutz ist ein kritischer Faktor für die Erhaltung der Biodiversität und Maßnahmen zur Regulierung der nichtintendierten Lichtimmissionen ein wichtiger Beitrag für viele der Schwerpunkte der NBS:

- Viele Lebensraumtypen, welche für die Erhaltung spezialisierter, heimischer Arten Voraussetzung sind, werden durch menschliche Infrastrukturen fragmentiert oder in ihrer Qualität reduziert. Straßenbeleuchtung trägt zur Zerschneidung und qualitativen Beeinträchtigung von Biotopen maßgeblich bei. Kriterien zum Schutz von sensiblen Gebieten, wie empfindliche Stillgewässer, Flüsse und Auen vor Lichtimmissionen sind

³¹ <http://www.bmub.bund.de/themen/natur-biologische-vielfalt-arten/naturschutz-biologische-vielfalt/gebietsschutz-und-vernetzung/natura-2000/> (Fassung vom 26.09.2016)

³² www.biologischevielfalt.de

dringend erforderlich. Neben dem Schutz von Insekten können damit auch Wanderwege für Fische, Fledermäuse und Zugvögel geschützt sowie natürliche Rückzugsgebiete für nachtaktive Wildtiere geschaffen werden. Zudem können Fließgewässer, Grünbrücken und Fischtreppe gezielter vor Lichtimmissionen geschützt werden (NBS Schwerpunkt C1: Biotopverbund und Schutzgebietsnetz).

- Einige der „Verantwortungsarten“ des NBS sind von Auswirkungen durch Beleuchtung direkt betroffen (siehe Tab. 2) und fast alle dieser Arten indirekt, z. B. durch Auswirkungen auf das Nahrungsangebot oder verminderte Ökosystemfunktionen, wie beispielsweise die nächtliche Bestäubung von Pflanzen (NBS Schwerpunkt C2: Artenschutz und genetische Vielfalt Vielfalt).
- Ein wirkungsvoller Lichtimmissionsschutz unterstützt die Erhaltung nächtlicher Kulturlandschaften, denn das Erscheinungsbild der Nachtlandschaft ist auch von kultureller Bedeutung. Die Wertschätzung einer Kulturlandschaft, kann durch die Erhaltung der Sichtbarkeit des Nachthimmels gesteigert werden (C13 Naturnahe Erholung und Tourismus).
- Nicht zuletzt trägt eine gezielte Bewusstseinsbildung für das Konsumgut Licht maßgeblich zu einer naturverträglichen Erholungsnutzung in Naturschutz-, Freizeit- und Erholungsgebieten bei (NBS Schwerpunkt C14: Bildung und Information).

Zusammenfassend konstatieren wir, dass Initiativen und Maßnahmen zum Schutz von Klima, Ressourcen und Umwelt heute schon ein breites Feld an Möglichkeiten für die Regulierung von Lichtimmissionen bieten könnte, Handlungsempfehlungen und Regulierungen für nichtintendierte Lichtimmissionen aber noch in den einzelnen Initiativen und Maßnahmen festgeschrieben werden müssten. Als Vorlage und Orientierung könnten hierfür die normativen Regulierungen für Lärm herangezogen werden (siehe Kapitel 5.2., Tab. 4).

6. Forschungsbedarf

Viele Auswirkungen von künstlichem Licht in der Nacht sind heute noch unzureichend erforscht. Ab wann werden Helligkeitsunterschiede vom menschlichen Auge tatsächlich wahrgenommen, wenn kein unmittelbarer Vergleich vorliegt? Wie hoch müssen Beleuchtungsniveaus tatsächlich sein, damit Menschen sich wohlfühlen? Diese Daten sind wichtig, um Werte für Mindestanforderungen und dringend benötigte Maximalwerte für Beleuchtung zu definieren, denn subjektive Sicherheitsbedenken gegen reduzierte Beleuchtungsniveaus sind oft objektiv nicht zu belegen (Marchant 2017).

Die Auswirkungen von künstlichem Licht auf Ökosysteme und die biologische Vielfalt sind immer noch wenig bekannt. Von daher sind sorgfältig konzipierte Experimente notwendig, um die genauen Auswirkungen von künstlichem Licht sowohl auf Organismen als auch auf Ökosysteme zu untersuchen. Es muss geklärt werden, welches Licht in welcher Intensität und welcher spektralen Verteilung sich negativ auf welche Lebewesen, in welchen räumlichen und zeitlichen Zusammenhängen auswirkt. Nur durch Experimente auf Ökosystemebene lässt sich beurteilen, ob künstliches Licht in der Nacht (i) die biologische Vielfalt von Gewässerökosystemen bedroht, (ii) die Nahrungsnetzynamik beeinflusst und (iii)

Auswirkungen auf die Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Lebensräumen hat (Hölker/Tockner 2013).

Noch immer ist nicht hinreichend geklärt, warum Insekten in so hohem Maße von Licht angezogen werden. Wie können Adaptationseffekte begünstigt werden? Welche Auswirkungen hat das auf sensiblere Arten? In den vergangenen Jahrzehnten wird die Abnahme an Insektenbiomasse auf bis zu 80% eingeschätzt (Vogel 2017). Es fehlen aber Studien, welche Arten am stärksten betroffen sind und welche Handlungsempfehlungen auszusprechen sind, um diesem Rückgang entgegenzuwirken. Als Gründe werden vorrangig Landnutzung, Pestizideinsatz und damit einhergehender Verlust an Wildblumen genannt (Hallmann et al. 2017). Beleuchtung als Faktor der Gefährdung von Insekten wird oft nur am Rande berücksichtigt. Eine Studie über die Entwicklung von Falterpopulationen von 1985-2015 in den Niederlanden zeigt aber, dass tagaktive Arten weniger gefährdet sind als nachtaktive Arten und Letztere umso gefährdeter sind, umso attraktiver Licht auf sie wirkt (van Langevelde et al. 2017). Diese Auswirkungen auf einzelne Arten können weitreichende Folgen auch für andere tagaktive Arten haben, wenn einzelne Ökosystemfunktionen nicht mehr bedient werden können (Knop et al. 2017; Fontaine et al. 2006). Es besteht hier dringender Handlungsbedarf für die Forschung, denn es ist heute noch nicht absehbar, welche Ökosystemfunktionen und -leistungen in welchem Maße betroffen sein könnten. Um den Verlusten an Insekten entgegenzutreten ist eine Kooperation unterschiedlicher Akteursgruppen wichtig. Beispielsweise könnten Akteure aus Landwirtschaft, Stadt- und Landschaftsplaner mit Ökologen und Entomologen in Form einer Kooperation für Wissenschaft und Technik (EU COST Action) gemeinsam Lösungswege für den Schutz von Insekten und ihren Lebensräumen erarbeiten.

Obwohl beispielsweise Uferpromenaden und Brücken gerne umfangreich beleuchtet werden (Abb. 9) wissen wir noch relativ wenig über die Auswirkungen künstlichen Lichts in Gewässern und aquatischen Ökosystemen. Es besteht weiterhin Forschungsbedarf darüber, welche Taxa durch welche Form von Lichtimmissionen (Skyglow, direkte Beleuchtung) wie stark beeinträchtigt werden und wie hoch der Einfluss auf die Biodiversität und damit in Zusammenhang stehende Ökosystemfunktionen und -leistungen ist. Dringend werden Erkenntnisse benötigt, wie sich Brücken- und Uferpromenadenbeleuchtungen auf die Uferbereiche und Wasserkörper vieler Seen, Teiche, Flüsse und Kanäle auswirken. Vor allem über die Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung auf saisonales Verhalten von Fauna und Flora in und an Gewässern ist heute noch wenig bekannt. Studien sind erforderlich, um durch nachhaltige Beleuchtung das Wanderverhalten von Vögeln, Fledermäusen und Fischen vor Lichtimmissionen zu schützen. Beispielsweise könnte so erforscht werden, wie der Schutz von Aalen schon in den Binnengewässern unterstützt werden könnte, um dem derzeitig diskutierten Fangverbot für professionelle und private Fischerei entgegenwirken zu können³³. Ebenso sind Auswirkungen zeitlicher Lichtabschaltung auf den Schwarmflug von aquatischen Insekten wie Eintagsfliegen bisher unerforscht und könnten hilfreiche Maßnahmen für den Bestandsschutz aquatischer Insekten bilden.

³³ BMELV: <http://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/2017/91-Fischfangquoten.html>, 10.10.17

Weiterhin zeigen unterschiedliche Arten wie Aale, Signalkrebse, Insektenlarven Vermeidungsstrategien in das Sediment von Flüssen (Lowe 1952; Thomas et al. 2016). Welche Auswirkungen die veränderte Aktivität auf biogeochemische Prozesse und in der Folge auf andere aquatische Organismen und Ökosystemeigenschaften haben kann, ist heute noch unzureichend erforscht.

Primärproduzenten (Algen und Cyanobakterien) bilden die Basis des aquatischen Nahrungsnetzes und spielen eine Schlüsselrolle für Ökosysteme. Auswirkungen durch eine Zunahme an künstlichem Licht in der Nacht könnten Ökosystemfunktionen wie Sauerstoff-, Biomasseproduktion sowie Ökosystemstoffwechsel beeinträchtigen. In bisherigen Studien zeigte eine Beleuchtungsstärke von 20 lx eine Abnahme der Biomasse der Primärproduzenten (Grubisic et al. 2017), während eine Beleuchtungsstärke von 70 lx diese erhöhte (Hölker et al. 2015). Obwohl Primärproduzenten eine so grundlegende Rolle für Ökosystemfunktionen spielt, ist heute noch nicht bekannt, ab welcher Wirkungsschwelle welche tagesrhythmischen und saisonalen Veränderungen zu erwarten sind und inwieweit der Einfluss multipler Stressoren (Licht, Lärm, Temperatur, chemische Belastung, etc.) berücksichtigt werden sollte. Vor allem die Auswirkungen der Veränderungen in Gemeinschaften der Primärproduzenten und folglich Veränderungen auf höhere Ebenen der Nahrungsnetze sind essentielle Informationen, welche heute noch nicht hinreichend erforscht sind.

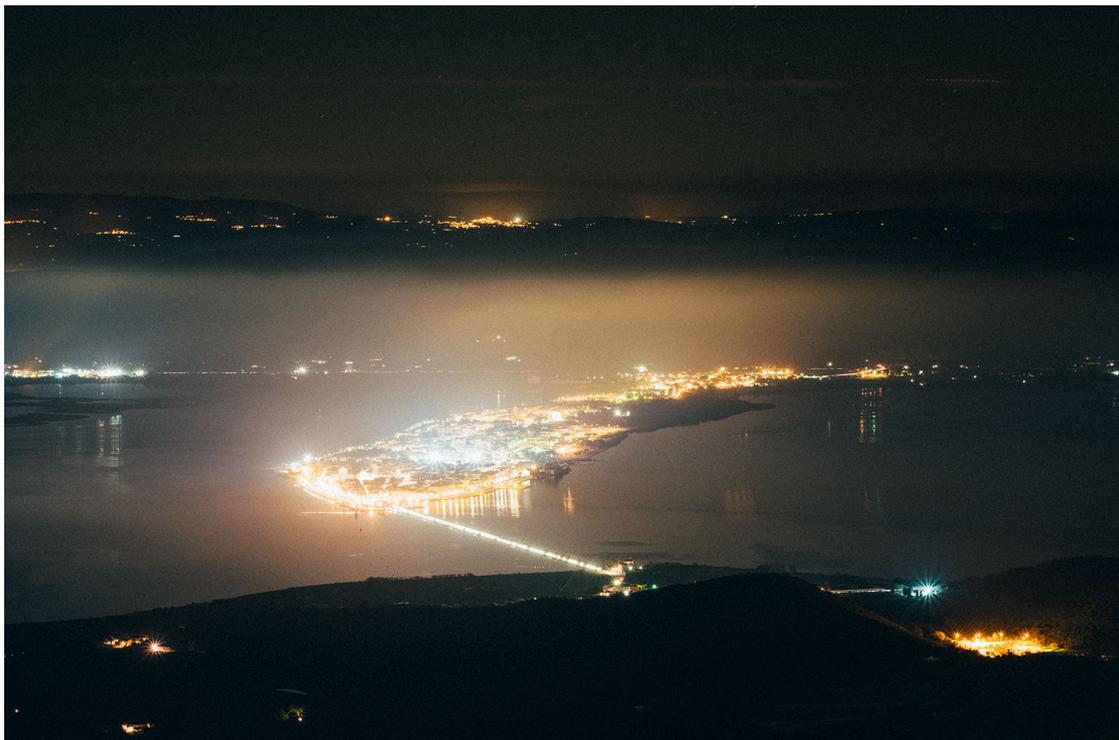


Abbildung 9: Beispiel für Brückenbeleuchtung, Langzunge Orbetello (Italien). Foto Volker Crone

Durch künstliches Licht in der Nacht kann die Vertikalwanderung von Organismen unterdrückt werden (Villamizar et al. 2011; Oppedal et al. 2001; Moore et al. 2001). Es können dadurch Ökosystemfunktionen zur Erhaltung der Wasserqualität gemindert und Funktionen wie der Transport von Nährstoffen in höheren Gewässerschichten unterdrückt werden. Es gibt daher noch großen Forschungsbedarf, welche Auswirkungen durch die Unterdrückung von Vertikalwanderung unterschiedlicher Organismen zu erwarten sind.

Es ist schwer nachzuweisen, wie viele lichtsensible Arten schon in Europa aufgrund der Erhellung der Nachtlandschaften verschwunden sind. Außerdem gibt es kaum Zahlen über die tatsächliche Referenzdunkelheit, vor allem zu bewölkten Bedingungen. Laut des neuen Weltatlas von Falchi et al. (2016) gibt es nur noch wenige Gebiete in Europa in der die natürlichen Lichtbedingungen zu unterschiedlichen Klima- und Vegetationsbedingungen gemessen werden können. Die Aufnahme dieser Daten steht daher unter zeitlichem Druck.

Um der rasant ansteigenden Erhellung der Nachtlandschaften entgegenzuwirken sind leicht anwendbare Mess- und Bewertungsmethoden erforderlich. Studien zur Definition von Grenzwerten für nichtintendierte Lichtimmissionen in Biotop sind dringend erforderlich. Ebenso wird die Entwicklung lichtplanerischer Bemessungssoftware für die Bewertung der Himmels- und Raumaufhellung benötigt (siehe Kapitel 3.4.)

Ergänzend dazu müssen die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Raum- und Zeitskalen untersucht und beachtet werden, um ein optimales Nachtmanagement für unterschiedliche raumzeitliche Kontexte wie Grünflächen, Uferzonen, Innenstädte, Wohngebiete zu unterschiedlichen Jahreszeiten entwickeln zu können (Hölker/Tockner 2013). Die Signalstärke von Temperatur und Licht variiert, es gibt artspezifische Schwellenwerte ab welchen Temperatur das Signal Licht überlagert, z.B. bei unter 12° C für den Laubabwurf von Laubbäume (Cathey/Campbell 1975) oder bei 4° C für die Vertikalwanderung von Fischen (Porter et al. 1999). Im Zuge der Klimaerwärmung könnten diese Werte zukünftig in der Saison verschoben werden, oder ausbleiben. Forschung ist dringend erforderlich, wie sich die Faktoren Licht und Temperatur zueinander verhalten, wenn beide global ansteigen. Es ist anzunehmen, dass Licht einen noch höheren Stellenwert einnehmen wird, wenn die Temperatur ansteigt.

Schließlich möchten wir noch auf das Flicker vieler moderner Leuchten eingehen. Manche LED-Leuchten haben keinen kontinuierlichen Lichtstrom, sie flackern. Dieses Flicker ist für die meisten Menschen nicht wahrnehmbar, kann aber bei sehr empfindlichen Menschen Kopfschmerzen oder Epilepsie auslösen (Martinsons/Zissis 2014, S. 40). Ob und wie ein Organismus auf das Flicker reagiert hängt von der zeitlichen Auflösung der visuellen Wahrnehmung ab (Inger et al. 2014). Für manche Fluginsektenarten könnte das Flicker wie stroboskopische Lichtimpulse wirken. Bei Insekten können die Schwankungen geringere oder eventuell auch stärkere Attraktion ausüben (Barroso et al. 2017). Es besteht noch viel Forschungsbedarf, wie sich Flicker auf Arten und Artengemeinschaften auswirken könnte und welche Frequenzen für unterschiedliche Applikationen der Außenraumbeleuchtung zu empfehlen sind, bzw. wo die Grenzbereiche für relevante Störungen liegen.

Die Klärung dieser Forschungsfragen ist dringend, denn durch den dynamischen Wandel auf moderne Beleuchtungstechnologien und immer größere Infrastrukturnetzwerke nimmt die Beleuchtung quantitativ rasch zu und ändert sich qualitativ.

7. Fazit

Auch wenn das Themenfeld Auswirkungen künstlichen Lichts auf Flora und Fauna noch viele offene Forschungsfragen birgt, können doch schon mit dem heutigen Wissen und Stand der Technik Handlungsleitlinien konkretisiert werden, die helfen die negativen Auswirkungen auf Flora, Fauna und ihre Habitate zu reduzieren ohne auf künstliches Licht in der Nacht verzichten zu müssen. Diese beinhalten

- (a) die Bildung von Schutzgebieten
- (b) die Regulierung der Beleuchtungsstärke
- (c) zeitliche Adaption an die Anforderungen der jeweiligen Infrastrukturen
- (d) die Lichtverteilung durch optimale Abstrahlungsgeometrie
- (e) die Minimierung der Emissionen von kurzwelligem (UV bzw. blauem) Licht.

Diese Handlungsleitlinien für die Reduzierung von nichtintendierten Lichtimmissionen bieten die Voraussetzung, die Vermeidung nichtintendierter Lichtimmissionen als ergänzendes Ziel in die bestehenden Richtlinien der Bundesrepublik zum Schutz von Klima, Ressourcen und Umwelt einzuarbeiten. Vor allem Richtlinien für Lärmschutz bieten ideale Grundlagen, um die zum heutigen Zeitpunkt bruchstückhafte und von subjektiven variablen besetzte Gesetzgebung zum Thema Lichtimmissionsschutz zu konkretisieren. Weiterhin bieten die Initiative der Bundesrepublik das „Blaue-“ und das Europäische „Grüne Band“ die Möglichkeit, in den sich entwickelnden Lebensraumkorridoren Lichtimmissionen stärker zu regulieren und damit Refugien für empfindliche Arten zu bieten.

Maßnahmen zum Schutz von Flora-Fauna-Habitat-Gebieten und der Bildung von Lebensraumkorridoren benötigen weiterhin wissenschaftlich geprüfte Mess- und Bewertungsverfahren für Lichtimmissionen. Für die Beurteilung von Lichtimmissionen kann aber nicht auf die Erforschung populationsrelevanter Parameter und Schwellenwerte gewartet werden, denn diese Forschung über Auswirkungen auf einzelne Arten und Ökosysteme ist sehr kostenintensiv und zeitaufwendig. Um dem globalen Trend der Aufhellung von Nachtlanschaften entgegenzuwirken, sollten Lichtimmissionen daher nicht nach ihrer Erheblichkeit und Nachhaltigkeit einer Beeinträchtigung, nach dem Wissenschaftsprinzip bemessen, sondern nach dem Vorsorgeprinzip beurteilt werden. Das bedeutet, dass Lichtemissionen an ihrer Objektgrenze gemessen und beurteilt werden sollten. Die Software hierfür könnte nach heutigem Stand der Technik entwickelt und angeboten werden, doch es fehlt bisher die Nachfrage dafür. Um in Zukunft Lichtemissionen planen, messen und beurteilen sowie Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen entwickeln zu können, sind Forschung und Entwicklung geeigneter Verfahren zur Quantifizierung von ökologisch relevanten Lichtemissionen dringend erforderlich und eventuell durch die Bundesregierung zu unterstützen.

Die Auswirkungen durch künstliches Licht in der Nacht auf Flora und Fauna sind hoch komplex und können sich in Ökosystemen kaskadenartig ausweiten (Bennie et al. 2015; Knop et al. 2017). Die globale Helligkeit der Nachtlandschaften nimmt im Mittel mehr als 2% jährlich zu (Kyba et al. 2017). Dieser Faktor könnte weitreichende Änderungen in Ökosystemen hervorrufen, welche heute noch nicht kalkulierbar sind. Weiterhin können die zirkadianen und saisonalen Verhaltensänderungen durch eine gesteigerte Umgebungstemperatur im Zuge der Klimaerwärmung noch verstärkt werden (Miller et al. 2017). Forschung ist daher dringend erforderlich, um Veränderungen in Ökosystemen verstehen zu können, wenn die wichtigsten Zeitgeber für saisonale Rhythmen abgeschwächt werden.

Referenzen

- Altermatt, F.; Baumeier, A.; Ebert, D. (2009): Experimental evidence. In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 130(3), DOI: 10.1111/j.1570-7458.2008.00817.x, S. 259–265.
- Altermatt, F.; Ebert, D. (2016): Reduced flight-to-light behaviour of moth populations exposed to long-term urban light pollution. In: *Biology Letters* 12, DOI: 10.1098/rsbl.2016.0111, S. 201160111.
- Arnao, M.B.; Hernández-Ruiz, J. (2006): The physiological function of melatonin in plants. In: *Plant Signaling & Behavior* 1(3), DOI: 10.4161/psb.1.3.2640, S. 89–95.
- Aubrecht, T.G.; Weil, Z.M.; Nelson, R.J. (2014): Dim light at night interferes with the development of the short-day phenotype and impairs cell-mediated immunity in Siberian hamsters (*Phodopus sungorus*). In: *Journal of Experimental Zoology* 321(8), DOI: 10.1002/jez.1877, S. 450–456.
- Avilés, J.M.; Parejo, D. (2013): Colour also matters for nocturnal birds: Owllet bill coloration advertises quality and influences parental feeding behaviour in little owls. In: *Oecologia* 17(2), DOI: 10.1007/s00442-013-2625-8, S. 399–408.
- Azam, C.; Kerbiriou, C.; Vernet, A.; Julien, J.F.; Bas, Y.; Plichard, L.; Maratrat, J.; Le Viol, I. (2015): Is part-night lighting an effective measure to limit the impacts of artificial lighting on bats? In: *Global Change Biology* 21(12), DOI: 10.1111/gcb.13036, S. 4333–4341.
- Azam, C.; Le Viol, I.; Julien, J.-F.; Bas, Y.; Kerbiriou, C. (2016): Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program. In: *Landscape Ecology* 31(10), DOI: 10.1007/s10980-016-0417-3, S. 1–13.
- Bailes, H.J.; Lucas, R.J. (2013): Human melanopsin forms a pigment maximally sensitive to blue light ($\lambda_{\max} \approx 479$ nm) supporting activation of G(q/11) and G(i/o) signalling cascades. In: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 280, DOI: 10.1098/rspb.2012.2987, S. 20122987.
- Baker, B.J.; Richardson, J.M.L. (2006): The effect of artificial light on male breeding-season behaviour in green frogs, *Rana clamitans melanota*. In: *Canadian Journal of Zoology* 84(10), DOI: 10.1139/z06-142, S. 1528–1532.
- Barroso, A.; Haifig, I.; Janei, V.; da Silva, I.; Dietrich, C.; Costa-Leonardo, A. (2017): Effects of flickering light on the attraction of nocturnal insects. In: *Lighting Research Technology* 49(1), DOI: 10.1177/1477153515602143, S. 100–110.
- Bayarri, M.J.; Madrid, J.A.; Sánchez-Vázquez, F.J. (2002): Influence of light intensity, spectrum and orientation on sea bass plasma and ocular melatonin. In: *Journal of Pineal Research* 32(1), DOI: 10.1034/j.1600-079x.2002.10806.x, S. 34–40.
- Becker, A.; Whitfield, A.K.; Cowley, P.D.; Järnegren, J.; Næsje, T.F. (2013): Potential effects of artificial light associated with anthropogenic infrastructure on the abundance and foraging behaviour of estuary-associated fishes. In: *Journal of Applied Ecology* 50(1), DOI: 10.1111/1365-2664.12024, S. 43–50.
- Bedrosian, T.A.; Fonken, L.K.; Walton, J.C.; Haim, A.; Nelson, R.J. (2011): Dim light at night provokes

- depression-like behaviors and reduces CA1 dendritic spine density in female hamsters. In: *Psychoneuroendocrinology* 36(7), DOI: 10.1016/j.psyneuen.2011.01.004, S. 1062–1069.
- Bedrosian, T.A.; Vaughn, C.A.; Galan, A.; Daye, G.; Weil, Z.M.; Nelson, R.J. (2013): Nocturnal Light Exposure Impairs Affective Responses in a Wavelength-Dependent Manner. In: *Journal of Neuroscience* 33(32), DOI: 10.1523/JNEUROSCI.5734-12.2013, S. 13081–13087.
- Ben Ammar, I.; Teletchea, F.; Milla, S.; Ndiaye, W.N.; Ledoré, Y.; Missaoui, H.; Fontaine, P. (2015): Continuous lighting inhibits the onset of reproductive cycle in pikeperch males and females. In: *Fish Physiology and Biochemistry* 41(2), DOI: 10.1007/s10695-014-9987-7, S. 345–356.
- Bengsen, A.J.; Leung, L.K.P.; Lapidge, S.J.; Gordon, I.J. (2010): Artificial illumination reduces bait-take by small rainforest mammals. In: *Applied Animal Behaviour Science* 127(1–2), DOI: 10.1016/j.applanim.2010.08.006, S. 66–72.
- Bennett, A.T.D.; Cuthill, I.C. (1994): Ultraviolet Vision in Birds : What is its Function? In: *Vision research* 34(11), DOI: 10.1016/0042-6989(94)90149-X, S. 1471–1478.
- Bennie, J.; Davies, T.W.; Cruse, D.; Inger, R.; Gaston, K.J. (2015): Cascading effects of artificial light at night : resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 370(1667), DOI: 10.1098/rstb.2014.0131, S. 20140131.
- Blask, D.E.; Dauchy, R.T.; Dauchy, E.M.; Mao, L.; Hill, S.M.; Greene, M.W.; Belancio, V.P.; Sauer, L.A.; Davidson, L. (2014): Light exposure at night disrupts host/cancer circadian regulatory dynamics: Impact on the Warburg effect, lipid signaling and tumor growth prevention. In: *PLoS ONE* 9(8), DOI: 10.1371/journal.pone.0102776, S. e102776.
- Boldogh, S.; Dobrosi, D.; Samu, P. (2007): The effects of the illumination of buildings on house-dwelling bats and its conservation consequences. In: *Acta Chiropterologica* 9(2), DOI: 10.3161/1733-5329(2007)9[527:TEOTIO]2.0.CO;2, S. 527–534.
- Böttcher, M. (2001): Auswirkungen von Fremdlicht auf die Fauna im Rahmen von Eingriffen in Natur und Landschaft - Analyse, Inhalte, Defizite und Lösungsmöglichkeiten. *Landwirtschaftsverlag Münster*
- Brainard, G.C.; Hanifin, J.P.; Rollag, M.D.; Greeson, J.; Byrne, B.; Glickman, G.; Gerner, E.; Sanford, B. (2001): Human melatonin regulation is not mediated by the three cone photopic visual system. In: *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 86(1), DOI: 10.1210/jcem.86.1.7277, S. 433–436.
- Brons, J.; Bullough, J.; Rea, M. (2008): Outdoor site-lighting performance: A comprehensive and quantitative framework for assessing light pollution. In: *Lighting Research and Technology* 40(3), DOI: 10.1177/1477153508094059, S. 201–224.
- Brüning, A.; Hölker, F.; Wolter, C. (2011): Artificial light at night: implications for early life stages development in four temperate freshwater fish species. In: *Aquatic Sciences* 73(1), DOI: 10.1007/s00027-010-0167-2, S. 143–152.
- Brüning, A.; Hölker, F.; Franke, S.; Preuer, T.; Kloas, W. (2015): Spotlight on fish: Light pollution affects circadian rhythms of European perch but does not cause stress. In: *Science of the Total Environment* 511, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.12.094, S. 516–522.
- Brüning, A.; Hölker, F.; Franke, S.; Kleiner, W.; Kloas, W. (2016): Impact of different colours of artificial light at night on melatonin rhythm and gene expression of gonadotropins in European perch. In: *Science of the Total Environment* 543, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.11.023, S. 214–222.
- Brüning, A.; Hölker, F.; Franke, S.; Kleiner, W.; Kloas, W. (2017): Influence of light intensity and spectral composition of artificial light at night on melatonin rhythm and mRNA expression of gonadotropins in roach *Rutilus rutilus*. In: *Fish Physiology and Biochemistry*, DOI: 10.1007/s10695-017-0408-6, S. 1–12.
- Brüning, A.; Hölker, F. (2015): Künstliches Licht an Gewässern – Auswirkungen und Lösungsansätze. In: *Fauna Focus* 23 (24), S. 1–12.
- Buchanan, B.W. (1993): Effects of enhanced lighting on the behaviour of nocturnal frogs. In: *Animal Behaviour* 45(5), DOI: 10.1006/anbe.1993.1109, S. 893–899.

- Buchanan, B.W. (1998): Low-illumination prey detection by Squirrel Treefrogs. In: *Journal of Herpetology* 32(2), DOI: 10.2307/1565308, S. 270–274.
- Buchanan, B.W. (2006): Observed and potential effects of artificial night lighting on anuran amphibians. In: Rich/Longcore (Hg.). Washington: Island Press. S. 192–220.
- Bukalev, A.V.; Vinogradova, I.A.; Zabezhinskii, M.A.; Semenchenko, A.V.; Anisimov, V.N. (2013): Light pollution increases morbidity and mortality rate from different causes in female rats. In: *Advances in Gerontology* 3(3), DOI: 10.1134/S207905701303003X, S. 180–188.
- Carazo, I.; Norambuena, F.; Oliveira, C.; Sánchez-Vázquez, F.J.; Duncan, N.J. (2013): The effect of night illumination, red and infrared light, on locomotor activity, behaviour and melatonin of Senegalese sole (*Solea senegalensis*) broodstock. In: *Physiology and Behavior* 118, 10.1016/j.physbeh.2013.05.032, S. 201–207.
- Cathey, H.M.; Campbell, L.E. (1975): Security lighting and its impact on the landscape. In: *Journal of Arboriculture* 1(1), S. 181–187.
- Chaney, W.R. (2002): Does Night Lighting Harm Trees ? In: *Forestry and Natural Resources, FAQ* 17, S. 1–4.
- Choi, H.; Kim, H.; Kim, J.G. (2009): Landscape Analysis of the Effects of Artificial Lighting around Wetland Habitats on the Giant Water Bug *Lethocerus deyrollei* in Jeju Island. In: *Journal of Ecology and Field Biology* 32(2), DOI: 10.5141/JEFB.2009.32.2.083, S. 83–86.
- Cockrem, J.F. (1991): Circadian rhythms of plasma melatonin in the Adelie penguin (*Pygoscelis adeliae*) in constant dim light and artificial photoperiods. In: *Journal of Pineal Research* 11(2), DOI: 10.1111/j.1600-079X.1991.tb00457.x, S. 63–69.
- Coelho, I.P.; Teixeira, F.Z.; Colombo, P.; Coelho, A.V.P.; Kindel, A. (2012): Anuran road-kills neighboring a peri-urban reserve in the Atlantic Forest, Brazil. In: *Journal of Environmental Management* 112, DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.07.004, S. 17–26.
- Conrad, K.F.; Warren, M.S.; Fox, R.; Parsons, M.S.; Woivod, I.P. (2006): Rapid declines of common, widespread British moths provide evidence of an insect biodiversity crisis. In: *Biological Conservation* 132(3), DOI: 10.1016/j.biocon.2006.04.020, S. 279–291.
- Da Silva, A.; Samplonius, J.M.; Schlicht, E.; Valcu, M.; Kempenaers, B. (2014): Artificial night lighting rather than traffic noise affects the daily timing of dawn and dusk singing in common European songbirds. In: *Behavioral Ecology* 25(5), DOI: 10.1093/beheco/aru103, S. 1037–1047.
- Da Silva, A.; de Jong, M.; van Grunsven, R.H.A.; Visser, M.E.; Kempenaers, B.; Spoelstra, K. (2017): Experimental illumination of a forest: no effects of lights of different colours on the onset of the dawn chorus in songbirds. In: *Royal Society Open Science* 4(1), DOI: 10.1098/rsos.160638, S. 160638.
- Da Silva, A.; Kempenaers, B. (2017): Singing from North to South: latitudinal variation in timing of dawn singing under natural and artificial light conditions. In: *Journal of Animal Ecology* 86(6), DOI: 10.1111/1365-2656.12739, S. 1286–1297.
- Dauchy, R.T.; Dauchy, E.M.; Tirrell, R.P.; Hill, C.R.; Davidson, L.K.; Greene, M.W.; Tirrell, P.C.; Wu, J.; Sauer, L.A.; Blask, D.E. (2010): Dark-phase light contamination disrupts circadian rhythms in plasma measures of endocrine physiology and metabolism in rats. In: *Comparative Medicine* 60 (5), S. 348–356.
- Dauchy, R.T.; Xiang, S.; Mao, L.; Brimer, S.; Wren, M.A.; Yuan, L.; Anbalagan, M.; Hauch, A.; Frasc, T.; Rowan, B.G.; Blask, D.E.; Hill, S.M. (2014): Circadian and melatonin disruption by exposure to light at night drives intrinsic resistance to tamoxifen therapy in breast cancer. In: *Cancer Research* 74(15), DOI: 10.1158/0008-5472.CAN-13-3156, S. 4099–4110.
- Dauchy, R.T.; Wren, M.A.; Dauchy, E.M.; Hoffman, A.E.; Hanifin, J.P.; Warfield, B.; Jablonski, M.R.; Brainard, G.C.; Hill, S.M.; Mao, L.; Dobek, G.L.; Dupepe, L.M.; Blask, D.E. (2015): The influence of red light exposure at night on circadian metabolism and physiology in Sprague-Dawley rats. In: *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science* 54(1), S. 40–50.
- Davies, T.W.; Bennie, J.; Gaston, K.J. (2012): Street lighting changes the composition of invertebrate communities. In: *Biology Letters*, DOI: 10.1098/rsbl.2012.0216, S. rsbl20120216.

- Davies, T.W.; Bennie, J.; Inger, R.; Ibarra, N.H.; Gaston, K.J. (2013): Artificial light pollution: Are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions? In: *Global Change Biology* 19(5), DOI: 10.1111/gcb.12166, S. 1417–1423.
- Day, J.; Baker, J.; Schofield, H.; Mathews, F.; Gaston, K.J. (2015): Part-night lighting: Implications for bat conservation. In: *Animal Conservation* 18(6), DOI: 10.1111/acv.12200, S. 512–516.
- Degen, T.; Mitesser, O.; Perkin, E.K.; Weiß, N.S.; Oehlert, M.; Mattig, E.; Hölker, F.; Chapman, J. (2016): Street lighting: sex-independent impacts on moth movement. In: *Journal of Animal Ecology* 85(5), DOI: 10.1111/1365-2656.12540, S. 1352–1360.
- Degen, T.; Hovestadt, T.; Mitesser, O.; Hölker, F. (2017): Female mating success and rapid changes in sex-specific mortality: Ecological effects and evolutionary responses. In: *Ecosphere* 8(5), DOI: 10.1002/ecs2.1820, S. e01820.
- Deveson, S.L.; Arendt, J.; Forsyth, I.A. (1990): Sensitivity of goats to a light pulse during the night as assessed by suppression of melatonin concentrations in the plasma. In: *Journal of Pineal research* 8(2), DOI: 10.1111/j.1600-079X.1990.tb00677.x, S. 169–177.
- Dominoni, D.; Quetting, M.; Partecke, J. (2013a): Artificial light at night advances avian reproductive physiology Artificial light at night advances avian reproductive physiology. In: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 280(1756), DOI: 10.1098/rspb.2012.3017, S. 20123017.
- Dominoni, D.M.; Quetting, M.; Partecke, J. (2013b): Long-term effects of chronic light pollution on seasonal functions of European blackbirds (*Turdus merula*). In: *PLoS ONE* 8(12), DOI: 10.1371/journal.pone.0085069, S. 1–9.
- Dominoni, D.M.; Goymann, W.; Helm, B.; Partecke, J. (2013c): Urban-like night illumination reduces melatonin release in European blackbirds (*Turdus merula*): implications of city life for biological time-keeping of songbirds. In: *Frontiers in Zoology* 10(1), DOI: 10.1186/1742-9994-10-60, S. 60.
- Dominoni, D.M.; Carmona-Wagner, E.O.; Hofmann, M.; Kranstauber, B.; Partecke, J. (2014): Individual-based measurements of light intensity provide new insights into the effects of artificial light at night on daily rhythms of urban-dwelling songbirds. In: *The Journal of Animal Ecology* 83(3), DOI: 10.1111/1365-2656.12150, S. 681–692.
- Dominoni, D.M.; Partecke, J. (2015): Does light pollution alter daylength? A test using light loggers on free-ranging European blackbirds (*Turdus merula*). In: *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 370(1667), DOI: 10.1098/rstb.2014.0118, S. 20140118.
- 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*. In: *Biological Conservation* 111(2), DOI: 10.1016/S0006-3207(02)00298-7, S. 247–252.
- Dwyer, R.G.; Bearhop, S.; Campbell, H.A.; Bryant, D.M. (2013): Shedding light on light: benefits of anthropogenic illumination to a nocturnally foraging shorebird. In: *The Journal of Animal Ecology* 82(2), DOI: 10.1111/1365-2656.12012, S. 478–85.
- Eisenbeis, G. (2006): Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany. In: Rich, C./Longcore, T.(Hg.). *Island Press*. S. 191–198.
- Eisenbeis, G.; Eick, K. (2011): Studie zur Anziehung nachtaktiver Insekten an die Straßenbeleuchtung unter Einbeziehung von LEDs. In: *Natur und Landschaft* 86(7), S. 298–306.
- Eisenbeis, G.; Hassel, F. (2000): Zur Anziehung nachtaktiver Insekten durch Straßenlaternen—eine Studie kommunaler Beleuchtungseinrichtungen in der Agrarlandschaft Rheinhessens. In: *Natur und Landschaft* 4, S. 145–156.
- Enezi, J. Al; Revell, V.; Brown, T.; Wynne, J.; Schlangen, L.; Lucas, R. (2011): A „melanopic“ spectral efficiency function predicts the sensitivity of melanopsin photoreceptors to polychromatic lights. In: *Journal of Biological Rhythms* 26(4), DOI: 10.1177/0748730411409719, S. 314–23.
- Falchi, F.; Cinzano, P.; Duriscoe, D.; Kyba, C.C.M.; Elvidge, C.D.; Baugh, K.; Portnov, B.A.; Rybnikova, N.A.;

- Furgoni, R. (2016): The new world atlas of artificial night sky brightness. In: *Science Advances* 2 (6) 10.1126/sciadv.1600377, S. e1600377.
- Farnworth, B.; Innes, J.; Waas, J.R. (2016): Converting predation cues into conservation tools: The effect of light on mouse foraging behaviour. In: *PLoS ONE* 11(1), DOI: 10.1371/journal.pone.0145432, S. 1–17.
- Feuka, A.B.; Hoffmann, K.E.; Hunter, M.L.; Calhoun, A.J.K. (2017): Effects of light pollution on habitat selection in post-metamorphic Wood Frogs (*Rana sylvaticus*) and unisexual Blue-spotted Salamanders (*Ambystoma laterale* × *jeffersonianum*). In: *Herpetological Conservation and Biology* 12(2), S. 470–476.
- Fitzpatrick, C.; McLean, D.; Harvey, E.S. (2013): Using artificial illumination to survey nocturnal reef fish. In: *Fisheries Research* 146, DOI: 10.1016/j.fishres.2013.03.016, S. 41–50.
- Fonken, L.K.; Lieberman, R.A.; Weil, Z.M.; Nelson, R.J. (2013a): Dim light at night exaggerates weight gain and inflammation associated with a high-fat diet in male mice. In: *Endocrinology* 154(10), DOI: 10.1210/en.2013-1121, S. 3817–25.
- Fonken, L.K.; Aubrecht, T.G.; Meléndez-Fernández, O.H.; Weil, Z.M.; Nelson, R.J. (2013b): Dim light at night disrupts molecular circadian rhythms and increases body weight. In: *Journal of Biological Rhythms* 28(4), DOI: 10.1177/0748730413493862, S. 262–71.
- Fonken, L.K.; Weil, Z.M.; Nelson, R.J. (2013c): Mice exposed to dim light at night exaggerate inflammatory responses to lipopolysaccharide. In: *Brain, Behavior, and Immunity* 34, DOI: 10.1016/j.bbi.2013.08.011, S. 159–163.
- Fonken, L.K.; Nelson, R.J. (2014): The effects of light at night on circadian clocks and metabolism. In: *Endocrine Reviews* 35(4), DOI: 10.1210/er.2013-1051, S. 648–670.
- Fontaine, C.; Dajoz, I.; Meriguet, J.; Loreau, M. (2006): Functional diversity of plant-pollinator interaction webs enhances the persistence of plant communities. In: *PLoS Biology* 4(1), DOI: 10.1371/journal.pbio.0040001, S. 0129–0135.
- Fotios, S.; Goodman, T. (2012): Proposed UK guidance for lighting in residential roads. In: *Lighting Research and Technology* 44(1), DOI: 10.1177/1477153511432678, S. 69–83.
- Freake, M.J.; Phillips, J.B. (2005): Light-Dependent Shift in Bullfrog Tadpole Magnetic Compass Orientation: Evidence for a Common Magnetoreception Mechanism in Anuran and Urodele Amphibians. In: *Ethology* 111(3), DOI: 10.1111/j.1439-0310.2004.01067.x, S. 241–254.
- Fukuda, H.; Torisawa, S.; Sawada, Y.; Takagi, T. (2010): Developmental changes in behavioral and retinomotor responses of Pacific bluefin tuna on exposure to sudden changes in illumination. In: *Aquaculture* 305(1–4), DOI: 10.1016/j.aquaculture.2010.04.014, S. 73–78.
- García-López, Á.; Pascual, E.; Sarasquete, C.; Martínez-Rodríguez, G. (2006): Disruption of gonadal maturation in cultured Senegalese sole *Solea senegalensis* Kaup by continuous light and/or constant temperature regimes. In: *Aquaculture* 261(2), DOI: 10.1016/j.aquaculture.2006.09.005, S. 789–798.
- Gaston, K.J.; Duffy, J.P.; Bennie, J. (2015): Quantifying the erosion of natural darkness in the global protected area system. In: *Conservation Biology* 29(4), 10.1111/cobi.12462, S. 1132–1141.
- Geffen van, K.G.; Grunsvan van, R.H.A.; Ruijven van, J.; Berendse, F.; Veenendaal, E.M. (2014): Artificial light at night causes diapause inhibition and sex-specific life history changes in a moth. In: *Ecology and Evolution* 4(11), DOI: 10.1002/ece3.1090, S. 2082–2089.
- Geffen van, K.G.; Eck van, E.; De Boer, R.A.; Grunsvan van, R.H.A.; Salis, L.; Berendse, F.; Veenendaal, E.M. (2015): Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth. In: *Insect Conservation and Diversity* 8(3), DOI: 10.1111/icad.12116, S. 282–287.
- Glösmann, M.; Steiner, M.; Peichl, L.; Ahnelt, P.K. (2008): Cone photoreceptors and potential UV vision in a subterranean insectivore, the European mole. In: *Journal of vision* 8(4), DOI: 10.1167/8.4.23, S. 23.
- Gonzalez-Bernal, E.; Greenlees, M.J.; Brown, G.P.; Shine, R. (2016): Toads in the backyard: why do invasive cane toads (*Rhinella marina*) prefer buildings to bushland? In: *Population Ecology* 58(2), DOI: 10.1007/s10144-

016-0539-0, S. 293–302.

Gorman, M.R.; Elliott, J.A. (2004): Dim nocturnal illumination alters coupling of circadian pacemakers in Siberian hamsters, *Phodopus sungorus*. In: *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 190(8), DOI: 10.1007/s00359-004-0522-7, S. 631–639.

Grubisic, M.; Singer, G.; Bruno, M.C.; van Grunsven, R.H.A.; Manfrin, A.; Monaghan, M.T.; Hölker, F. (2017): Artificial light at night decreases biomass and alters community composition of benthic primary producers in a sub-alpine stream. In: *Limnology and Oceanography* 62(6), 10.1002/lno.10607, S. 2799–2810.

Grunsvan, van R.H.A.; Creemers, R.; Joosten, K.; Donners, M.; Veenendaal, E.M. (2017): Behaviour of migrating toads under artificial lights differs from other phases of their life cycle. In: *Amphibia-Reptilia* 38(1), DOI: 10.1163/15685381-00003081, S. 49–55.

Grunsvan van, R.H.A.; Donners, M.; Boekee, K.; Tichelaar, I.; Geffen van, 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. In: *Journal of Insect Conservation* 18(2), DOI: 10.1007/s10841-014-9633-9, S. 225–231.

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. In: *Global change biology* 21(7), DOI: 10.1111/gcb.12884, S. 1–12.

Hallmann, C.A.; Sorg, M.; Jongejans, E.; Siepel, H.; Hofland, N.; Schwan, H.; Stenmans, W.; Müller, A.; Sumser, H.; Hörrén, T.; Goulson, D.; de Kroon, H. (2017): More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. In: *Plos ONE* 12(10), DOI: 10.1371/journal.pone.0185809, S. e0185809.

Henn, M.; Nichols, H.; Zhang, Y.; Bonner, T.H. (2014): Effect of artificial light on the drift of aquatic insects in urban central Texas streams. In: *Journal of Freshwater Ecology* 29(3), DOI: 10.1080/02705060.2014.900654, S. 307–318.

Hettlich P.; Herzog R. (2009): Lichtverschmutzung. Es werde Schatten. In: *Politische Ökologie* 114, Oekom Verlag, S. 69–70

Hof, C.; Araújo, M.B.; Jetz, W.; Rahbek, C. (2011): Additive threats from pathogens, climate and land-use change for global amphibian diversity. In: *Nature* 480(7378), DOI: 10.1038/nature10650, S. 516–519.

Hoffmann, K. (1979): Photoperiodic effects in the Djungarian hamster: one minute of light during darktime mimics influence of long photoperiods on testicular recrudescence, body weight and pelage colour. In: *Experientia* 35(11), DOI: 10.1007/BF01962828, S. 1529–1530.

Hofmeister, S. (2013): Handlungsmöglichkeiten der Raum- und Umweltplanung. In: Held, M.; Hölker, F.; Jessel B. (Hg.). *BfN-Skripten* 336, Bonn - Bad Godesberg, S. 133–136.

Hogan, M.K.; Kovalycsik, T.; Sun, Q.; Rajagopalan, S.; Nelson, R.J. (2015): Combined effects of exposure to dim light at night and fine particulate matter on C3H/HeNHsd mice. In: *Behavioural Brain Research* 294, DOI: 10.1016/j.bbr.2015.07.033, S. 81–88.

Hölker, F.; Wolter, C.; Perkin, E.K.; Tockner, K. (2010a): Light pollution as a biodiversity threat. In: *Trends in Ecology and Evolution* 25(12), DOI: 10.1016/j.tree.2010.09.007, S. 681–682.

Hölker, F.; Moss, T.; Griefahn, B.; Kloas, W.; Voigt, C.C. (2010b): The dark side of light: a transdisciplinary research agenda for light. In: *Ecology and Society* 15(4), S. 13.

Hölker, F.; Tockner, K. (2013) Der Einfluss von künstlichem Licht in der Nacht auf Gewässerökosysteme. In Posch, T., Hölker, F., Uhlmann, T.; Freyhoff, A. (Hg.): *Das Ende der Nacht. Die globale Lichtverschmutzung und ihre Folgen*. Wiley-VCH, Weinheim, S. 174-189.

Hölker, F.; Wurzbacher, C.; Weißenborn, C.; Monaghan, M.T.; Holzhauer, S.I.J.; Premke, K. (2015): Microbial diversity and community respiration in freshwater sediments influenced by artificial light at night. In: *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 370(1667), DOI: 10.1098/rstb.2014.0130, S. 20140130.

- Hölker, F., Jechow, A., Schroer, S.; Gessner, M.O. (im Druck) Nächtliches Licht und Lichtverschmutzung in und um Gewässer. In: Hupfer, M.; Calmano, W.; Fischer, H.; Klapper, H. (Hg.) Handbuch Angewandte Limnologie: Grundlagen - Gewässerbelastung - Restaurierung - Aquatische Ökotoxikologie - Bewertung - Gewässerschutz.. Wiley-VCH, DOI: 10.1002/9783527678488
- Holzhauser, S.I.J.; Franke, S.; Kyba, C.C.M.; Oehlert, M.; Monaghan, M.T.; Schneider, S.; Heller, S. (2015): Out of the Dark: Establishing a Large-Scale Field Experiment to Assess the Effects of Artificial Light at Night on Species and Food Webs. In: Sustainability 7(11), DOI: 10.3390/su71115593, S. 15593–15616.
- Horváth, G.; Kriska, G.; Malik, P.; Robertson, B. (2009): Polarized light pollution: a new kind of ecological photopollution. In: Frontiers in Ecology and the Environment 7(6), DOI: 10.1890/080129, S. 317–325.
- Huemer, P.; Köhltreiber, H.; Tarmann, G. (2011): Anlockwirkung moderner Leuchtmittel auf nachtaktive Insekten einer Feldstudie in Tirol (Österreich). In: Wissenschaftliches Jahrbuch der Tiroler Landesmuseen 4, S. 110–135.
- Ikeda, M.; Sagara, M.; Inoué, S. (2000): Continuous exposure to dim illumination uncouples temporal patterns of sleep, body temperature, locomotion and drinking behavior in the rat. In: Neuroscience Letters 279(3), DOI: 10.1016/S0304-3940(99)00943-X, S. 185–189.
- Ikeno, T.; Weil, Z.M.; Nelson, R.J. (2014): Dim light at night disrupts the short-day response in Siberian hamsters. In: General and Comparative Endocrinology 197, DOI: 10.1016/j.ygcen.2013.12.005, S. 56–64.
- Inger, R.; Bennie, J.; Davies, T.W.; Gaston, K.J. (2014): Potential biological and ecological effects of flickering artificial light. In: PLoS ONE 9(5), DOI: 10.1371/journal.pone.0098631, S. e98631.
- Ishibashi, Y.; Honryo, T.; Saida, K.; Hagiwara, A.; Miyashita, S.; Sawada, Y.; Okada, T.; Kurata, M. (2009): Artificial lighting prevents high night-time mortality of juvenile Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis*, caused by poor scotopic vision. In: Aquaculture 293(3–4), DOI: 10.1016/j.aquaculture.2009.04.029, S. 157–163.
- Johansen, N.S.; Vänninen, I.; Pinto, D.M.; Nissinen, A.I.; Shipp, L. (2011): In the light of new greenhouse technologies: 2. Direct effects of artificial lighting on arthropods and integrated pest management in greenhouse crops. In: Annals of Applied Biology 159(1), DOI: 10.1111/j.1744-7348.2011.00483.x, S. 1–27.
- Jones, J.; Francis, C.M. (2003): The effects of light characteristics on avian mortality at lighthouses. In: Journal of Avian Biology 34(4), DOI: 10.1111/j.0908-8857.2003.03183.x, S. 328–333.
- Jong de, M.; Ouyang, J.Q.; Grunsvan van, R.H.A.; Visser, M.E.; Spoelstra, K. (2016a): Do wild great tits avoid exposure to light at night? In: PLoS ONE 11(6), DOI: 10.1371/journal.pone.0157357, S. 1–8.
- Jong de, M.; Jenning, L.; Ouyang, J.Q.; Oers van, K.; Spoelstra, K.; Visser, M.E. (2016b): Dose-dependent responses of avian daily rhythms to artificial light at night. In: Physiology & Behavior 155, DOI: 10.1016/j.physbeh.2015.12.012, S. 172–179.
- Jong de, M.; Caro, S.P.; Gienapp, P.; Spoelstra, K.; Visser, M.E. (2017): Early birds by light at night: Effects of light color and intensity on daily activity patterns in blue tits. In: Journal of Biological Rhythms 32(4), DOI: 10.1177/0748730417719168, S. 323–333.
- Jung, K.; Kalko, E.K. V. (2010): Where forest meets urbanization: foraging plasticity of aerial insectivorous bats in an anthropogenically altered environment. In: Journal of Mammalogy 91(1), DOI: 10.1644/08-MAMM-A-313R.1., S. 144–153.
- Justice, M.J.; Justice, T.C. (2016): Attraction of Insects to Incandescent, Compact Fluorescent, Halogen, and Led Lamps in a Light Trap: Implications for Light Pollution and Urban Ecologies. In: Entomological News 125(5), DOI: 10.3157/021.125.0502, S. 315–326.
- Keenan, S.F.; Benfield, M.C.; Blackburn, J.K. (2007): Importance of the artificial light field around offshore petroleum platforms for the associated fish community. In: Marine Ecology Progress Series 331, S. 219–231.
- Kemp, P.S.; Williams, J.G. (2009): Illumination influences the ability of migrating juvenile salmonids to pass a submerged experimental weir. In: Ecology of Freshwater Fish 18(2), DOI: 10.1111/j.1600-0633.2008.00347.x, S. 297–304.

- Kempnaers, B.; Borgström, P.; Loës, P.; Schlicht, E.; Valcu, M. (2010): Artificial night lighting affects dawn song, extra-pair siring success, and lay date in songbirds. In: *Current biology* 20(19), 10.1016/j.cub.2010.08.028, S. 1735–9.
- Kissil, G.W.; Lupatsch, I.; Elizure, A.; Zohar, Y. (2001): Long photoperiod delayed spawning and increased somatic growth in gilthead seabream (*Sparus aurata*). In: *Aquaculture* 200(3), DOI: 10.1016/S0044-8486(01)00527-0, S. 363–379.
- Kleinteich, A. (2009): Life history of the bridge spider, *Larionides sclopetarius* (Clerck, 1775). Universität Hamburg.
- Knop, E.; Zoller, L.; Ryser, R.; Gerpe, C.; Hörler, M.; Fontaine, C. (2017): Artificial light at night as a new threat to pollination. In: *Nature* 548(7666), DOI: 10.1038/nature23288, S. 206–209.
- Krijgsveld, K.L.; Fijn, R.C.; Lensink, R. (2015): Occurrence of peaks in songbird migration at rotor heights of offshore wind farms in the southern North Sea. *Rijkswaterstaat Zee en Delta*
- Kriská, G.; Bernáth, B.; Horváth, G. (2007): Positive polarotaxis in a mayfly that never leaves the water surface: Polarotactic water detection in *Palingenia longicauda* (Ephemeroptera). In: *Naturwissenschaften* 94(2), DOI: 10.1007/s00114-006-0180-4, S. 148–154.
- Kronfeld-Schor, N.; Dominoni, D.; de la Iglesia, H.; Levy, O.; Herzog, E.D.; Dayan, T.; Helfrich-Forster, C. (2013): Chronobiology by moonlight. In: *Proceedings. Biological Sciences* 280(1765), DOI: 10.1098/rspb.2012.3088, S. 20123088.
- Kuechly, H.U.; Kyba, C.C.M.; Ruhtz, T.; Lindemann, C.; Wolter, C.; Fischer, J.; Hölker, F. (2012): Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in Berlin, Germany. In: *Remote Sensing of Environment* 126, DOI: 10.1016/j.rse.2012.08.008, S. 39–50.
- Kuijper, D.P.J.; Schut, J.; Dulleman, D. Van; Toorman, H.; Goossens, N.; Ouwehand, J.; Limpens, J.G.A. (2008): Experimental evidence of light disturbance along the commuting routes of pond bats (*Myotis dasycneme*). In: *Lutra* 51(1), S. 37–49.
- Kyba, C.C.M.; Hänel, A.; Hölker, F. (2014): Redefining efficiency for outdoor lighting. In: *Energy & Environmental Science* 7(6), DOI: 10.1039/C4EE00566J, S. 1806–1809.
- Kyba, C.C.M.; Kuester, T.; Sánchez de Miguel, A.; Baugh, K.; Jechow, A.; Hölker, F.; Bennie, J.; Elvidge, C.D.; Luis, G.; Gaston, K.J. (2017): Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. In: *Science Advances* 3(11), DOI: 10.1126/sciadv.1701528, S. e1701528.
- La Sorte, F.; Fink, D.; Buler, J.; Farnsworth, A.; Cabrera-Cruz, S. A. (2017): Seasonal associations with urban light pollution for nocturnally migrating bird populations. In: *Global Change Biology* 23(11), 10.1111/gcb.13792, S. 4609–4619.
- Labuda, M.; Koch, R.; Nagyová, A. (2015): Sterneparks zur Unterstützung des Naturtourismus. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung* 47(12), S. 380–388.
- Lacoeuilhe, A.; Machon, N.; Julien, J.F.; Le Bocq, A.; Kerbiriou, C. (2014): The influence of low intensities of light pollution on bat communities in a semi-natural context. In: *PLoS ONE* 9(10), DOI: 10.1371/journal.pone.0103042, S. e103042.
- Lang, D. (2013): Neue Systemlösungen und Beleuchtungsstrategien im Außenraum. In: Held, M.; Hölker, F.; Jessel B. (Hg.). *BfN-Skripten* 336, Bonn - Bad Godesberg, S. 91–94.
- Le Tallec, T.; Théry, M.; Perret, M. (2015): Effects of light pollution on seasonal estrus and daily rhythms in a nocturnal primate. In: *Journal of Mammalogy* 96(2), DOI: 10.1093/jmammal/gyv047, S. 438–445.
- Levey, D.J. (2005): Effects of Landscape Corridors on Seed Dispersal by Birds. In: *Science* 309(5731), 10.1126/science.1111479, S. 146–148.
- Lewanzik, D.; Voigt, C.C. (2014): Artificial light puts ecosystem services of frugivorous bats at risk. In: *Journal of Applied Ecology* 51(2), DOI: 10.1111/1365-2664.12206, S. 388–394.

- Lewanzik, D.; Voigt, C.C. (2017): Transition from conventional to light-emitting diode street lighting changes activity of urban bats. In: *Journal of Applied Ecology* 54(1), DOI: 10.1111/1365-2664.12758, S. 264–271.
- Longcore, T.; Rich, C.; Mineau, P.; MacDonald, B.; Bert, D.G.; Sullivan, L.M.; Mutrie, E.; Gauthreaux, S.A.; Avery, M.L.; Crawford, R.L.; Manville, A.M.; Travis, E.R.; Drake, D. (2012): An Estimate of Avian Mortality at Communication Towers in the United States and Canada. In: *PLoS ONE* 7(4), DOI: 10.1371/journal.pone.0034025, S. e34025.
- Longcore, T.; Aldern, H.L.; Eggers, J.F.; Flores, S.; Franco, L.; Hirshfield-yamanishi, E.; Petrinc, L.N.; Yan, W.A.; Yamanishi, E.; Ln, P.; Wa, Y.; Am, B. (2015): Tuning the white light spectrum of light emitting diode lamps to reduce attraction of nocturnal arthropods. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 370(1667), S. 20140125.
- Lowe, R.H. (1952): The influence of light and other factors on the seaward migration of the silver eel (*Anguilla anguilla* L.). In: *Journal of Animal Ecology* 21(2), S. 275–309.
- MacGregor, C.J.; Pocock, M.J.O.; Fox, R.; Evans, D.M. (2015): Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: a review. In: *Ecological Entomology* 40(3), DOI: 10.1111/een.12174, S. 187–198.
- MacGregor, C.J.; Evans, D.M.; Fox, R.; Pocock, M.J.O. (2017): The dark side of street lighting: Impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport. In: *Global Change Biology* 23(2) DOI: 10.1111/gcb.13371, S. 697–707.
- Manfrin, A.; Singer, G.; Larsen, S.; Weiß, N.; Grunsvan, R.H.A.; Weiß, N.-S.; Wohlfahrt, S.; Monaghan, M.T.; Hölker, F. (2017): Artificial light at night affects organism flux across ecosystem boundaries and drives community structure in the recipient ecosystem. In: *Frontiers in Environmental Science* 5, DOI: 10.3389/fenvs.2017.00061, S. 61.
- Marchant, P. (2017): Why Lighting Claims Might Well Be Wrong. In: *International Journal of Sustainable Lighting* 19(1), DOI: 10.26607/ijsl.v19i1.71, S. 69–74.
- Marczak, L.B.; Richardson, J.S. (2008): Growth and development rates in a riparian spider are altered by asynchrony between the timing and amount of a resource subsidy. In: *Oecologia* 156(2), 10.1007/s00442-008-0989-y, S. 249–258.
- Martinsons, C.; Zissis, G. (2014): Solid State Lighting Annex: Potential Health Issues of SSL.
- 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. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370(1667), DOI: 10.1098/rstb.2014.0124, S. 20140124.
- Matzke, E.B. (1936): The effect of street lights in delaying leaf-fall in certain trees. In: *American Journal of Botany* 23(6), S. 446–452.
- Mazerolle, M.J.; Huot, M.; Gravel, M. (2005): Behaviour of amphibians on the road in response to car traffic. In: *Journal of Herpetology* 61(4), DOI: 10.1655/04-79.1, S. 380–388.
- Mège, P.; Ödeen, A.; Théry, M.; Picard, D.; Secondi, J. (2016): Partial Opsin Sequences Suggest UV-Sensitive Vision is Widespread in Caudata. In: *Evolutionary Biology* 43(1), DOI: 10.1007/s11692-015-9353-4, S. 109–118.
- Migaud, H.; Wang, N.; Gardeur, J.N.; Fontaine, P. (2006): Influence of photoperiod on reproductive performances in Eurasian perch *Perca fluviatilis*. In: *Aquaculture* 252(2–4), DOI: 10.1016/j.aquaculture.2005.07.029, S. 385–393.
- Migaud, H.; Cowan, M.; Taylor, J.; Ferguson, H.W. (2007): The effect of spectral composition and light intensity on melatonin, stress and retinal damage in post-smolt Atlantic salmon, *Salmo salar*. In: *Aquaculture* 270(1–4), DOI: 10.1016/j.aquaculture.2007.04.064, S. 390–404.
- Miles, W.; Money, S.; Luxmoore, R.; Furness, R.W. (2010): Effects of artificial lights and moonlight on petrels at St Kilda. In: *Bird Study* 57(2), DOI: 10.1080/00063651003605064, S. 244–251.

- Miller, M.W. (2006): Apparent Effects of Light Pollution on Singing Behavior of American Robins. In: *The Condor* 108(1), DOI: 10.2307/4123202, S. 130–139.
- Miller, C.R.; Barton, B.T.; Zhu, L.; Radeloff, V.C.; Oliver, K.M.; Harmon, J.P.; Ives, A.R. (2017): Combined effects of night warming and light pollution on predator–prey interactions. In: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 284(1864), 10.1098/rspb.2017.1195, S. 20171195.
- Minnaar, C.; Boyles, J.G.; Minnaar, I.A.; Sole, C.L.; Mckechnie, A.E. (2015): Stacking the odds: Light pollution may shift the balance in an ancient predator-prey arms race. In: *Journal of Applied Ecology* 52(2), DOI: 10.1111/1365-2664.12381, S. 522–531.
- Molcan, L.; Vesela, A.; Zeman, M. (2014): Repeated Phase Shifts in the Lighting Regimen Change the Blood Pressure Response to Norepinephrine Stimulation in Rats. In: *Physiological Research* 63(5), S. 567–575.
- Molcan, L.; Vesela, A.; Zeman, M. (2016): Influences of phase delay shifts of light and food restriction on blood pressure and heart rate in telemetry monitored rats. In: *Biological Rhythm Research* 47(2), DOI: 10.1080/09291016.2015.1103945, S. 233–246.
- Moore, M. V; Pierce, S.M.; Walsh, H.M.; Kvalvik, S.K.; Lim, J.D. (2001): Urban light pollution alters the diel vertical migration of *Daphnia*. In: *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen* 27(2), DOI: 10.1080/03680770.1998.11901341, S. 779–782.
- Newbery, B.; Jones, D.N. (2007): Presence of Asian House Gecko *Hemidactylus frenatus* across an urban gradient in Brisbane: influence of habitat and potential for impact on native gecko species. In: Lunney, B.; Eby, P., Hutchings, P.; Burgin, S. (Hg.). Western Sydney University. Sydney, Australia, S. 59–65.
- Newman, R.C.; Ellis, T.; Davison, P.I.; Ives, M.J.; Thomas, R.J.; Griffiths, S.W.; Riley, W.D. (2015): Using novel methodologies to examine the impact of artificial light at night on the cortisol stress response in dispersing Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fry. In: *Conservation Physiology* 3(1), DOI: 10.1093/conphys/cov051, S. cov051.
- Nordt, A.; Klenke, R. (2013): Sleepless in Town – Drivers of the Temporal Shift in Dawn Song in Urban European Blackbirds. In: *PLoS ONE* 8(8), DOI: 10.1371/journal.pone.0071476, S. e714716.
- Ogden, L.J.E. (1996): Collision Course : The Hazards of Lighted Structures and Windows to Migrating Birds Collision Course. digitalcommons.unl.edu/flap/3 (14.12.2017).
- Okuliarova, M.; Molcan, L.; Zeman, M. (2016): Decreased emotional reactivity of rats exposed to repeated phase shifts of light–dark cycle. In: *Physiology & Behavior* 156, DOI: 10.1016/j.physbeh.2016.01.003, S. 16–23.
- Oliveira, C.; Ortega, A.; López-Olmeda, J.F.; Vera, L.M.; Sánchez-Vázquez, F.J. (2007): Influence of Constant Light and Darkness, Light Intensity, and Light Spectrum on Plasma Melatonin Rhythms in Senegal Sole. In: *Cronobiology International* 24(2), 10.1080/07420520701534657, S. 645–627.
- Oliveira, C.C. V; Aparício, R.; Blanco-Vives, B.; Chereguini, O.; Martín, I.; Javier Sánchez-Vazquez, F. (2013): Endocrine (plasma cortisol and glucose) and behavioral (locomotor and self-feeding activity) circadian rhythms in Senegalese sole (*Solea senegalensis* Kaup 1858) exposed to light/dark cycles or constant light. In: *Fish Physiology and Biochemistry* 39(3), DOI: 10.1007/s10695-012-9713-2, S. 479–487.
- Oppedal, F.; Juell, J.E.; Taranger, G.L.; Hansen, T. (2001): Artificial light and season affects vertical distribution and swimming behaviour of post-smolt Atlantic salmon in sea cages. In: *Journal of Fish Biology* 58(6), DOI: 10.1006/jfbi.2001.1562, S. 1570–1584.
- Ouyang, J.; de Jong, M.; Hau, M.; Visser, M.E.; Grunsvan van, R.H.A.; Spoelstra, K. (2015): Stressful colours: corticosterone concentrations in a free-living songbird vary with the spectral composition of experimental illumination. In: *Biology letters* 11(8), DOI: 10.1098/rsbl.2015.0517, S. 20150517.
- Ouyang, J.Q.; de Jong, M.; van Grunsvan, R.H.A.; Matson, K.D.; Haussmann, M.F.; Meerlo, P.; Visser, M.E.; Spoelstra, K. (2017): Restless roosts: Light pollution affects behavior, sleep, and physiology in a free-living songbird. In: *Global Change Biology* 23(11), DOI: 10.1111/gcb.13756, S. 4987–4994.
- Pawson, S.M.; Bader, M.F. (2014): LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. In: *Ecological Applications* 24(7), S. 1561–1568.

- Perkin, E.K.; Hölker, F.; Heller, S.; Berghahn, R. (2014a): Artificial light and nocturnal activity in gammarids. In: *PeerJ* 2, DOI: 10.7717/peerj.279, S. e279.
- Perkin, E.K.; Hölker, F.; Tockner, K.; Richardson, J.S. (2014b): Artificial light as a disturbance to light-naïve streams. In: *Freshwater Biology* 59(11), DOI: 10.1111/fwb.12426, S. 2235–2244.
- Perry, G.; Buchanan, B.W.; Fisher, R.N.; Salmon, M.; Wise, S.E. (2008): Effects of artificial night lighting on amphibians and reptiles in urban environments. In: Mitchell, J.C.; Jung Brown, R.E., Bartholomew B. (Hg.). *Society for the Study of Amphibians & Reptiles*, S. 239–256.
- Petrželková, K.J.; Downs, N.C.; Zúkal, J.; Racey, P.A. (2006): A comparison between emergence and return activity in pipistrelle bats *Pipistrellus pipistrellus* and *P. pygmaeus*. In: *Acta Chiropterologica* 8(2), DOI: 10.3161/1733-5329(2006)8[381:ACBEAR]2.0.CO;2, S. 381–390.
- Phillips, J.B.; Borland, S.C.; Freake, M.J.; Brassart, J.; Kirschvink, J.L. (2002): „Fixed-axis“ magnetic orientation by an amphibian: non-shoreward-directed compass orientation, misdirected homing or positioning a magnetite-based map detector in a consistent alignment relative to the magnetic field? In: *The Journal of Experimental Biology* 205(24), S. 3903–3914.
- Polak, T.; Korine, C.; Yair, S.; Holderied, M.W. (2011): Differential effects of artificial lighting on flight and foraging behaviour of two sympatric bat species in a desert. In: *Journal of Zoology* 285(1), DOI: 10.1111/j.1469-7998.2011.00808.x, S. 21–27.
- Poot, H.; Ens, B.J.; Vries, H. De; Donners, M.A.H.; Wernand, M.R.; Marquenie, J.M. (2008): Green light for nocturnally migrating birds. In: *Ecology and Society* 13(2), S. 47. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art47/>
- Porter, M.J.R.; Duncan, N.J.; Mitchell, D.; Bromage, N.R. (1999): The use of cage lighting to reduce plasma melatonin in Atlantic salmon (*Salmo salar*) and its effects on the inhibition of grilising. In: *Aquaculture* 176(3–4), DOI: 10.1016/S0044-8486(99)00113-1, S. 237–244.
- Porter, M.J.R.; Duncan, N.; Handeland, S.O. (2001): Temperature, light intensity and plasma melatonin levels in juvenile Atlantic salmon. In: *Journal of Fish Biology* 58(2), DOI: 10.1006/jfbi.2000.1455, S. 431–438.
- Pretzsch, H.; Biber, P.; Uhl, E.; Dahlhausen, J.; Schütze, G.; Perkins, D.; Rötzer, T.; Caldentey, J.; Koike, T.; Con, T. van; Chavanne, A.; Toit, B. du; Foster, K.; Lefer, B. (2017): Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. In: *Scientific Reports* 7(1), DOI: 10.1038/s41598-017-14831-w, S. 15403.
- Pullin, A.; Frampton, G.; Jongman, R.; Kohl, C.; Livoreil, B.; Lux, A.; Pataki, G.; Petrokofsky, G.; Podhora, A.; Saarikoski, H.; Santamaria, L.; Schindler, S.; Sousa-Pinto, I.; Vandewalle, M.; Wittmer, H. (2016): Selecting appropriate methods of knowledge synthesis to inform biodiversity policy. In: *Biodiversity and Conservation* 25(7), DOI: 10.1007/s10531-016-1131-9, S. 1285–1300.
- Raap, T.; Pinxten, R.; Eens, M. (2016a): Artificial light at night disrupts sleep in female great tits (*Parus major*) during the nestling period, and is followed by a sleep rebound. In: *Environmental Pollution* 215, DOI: 10.1016/j.envpol.2016.04.100, S. 125–134.
- Raap, T.; Casasole, G.; Pinxten, R.; Eens, M. (2016b): Early life exposure to artificial light at night affects the physiological condition: An experimental study on the ecophysiology of free-living nestling songbirds. In: *Environmental Pollution* 218, DOI: 10.1016/j.envpol.2016.08.024, S. 909–914.
- Raap, T.; Sun, J.; Pinxten, R.; Eens, M. (2017): Disruptive effects of light pollution on sleep in free-living birds: Season and/or light intensity-dependent? In: *Behavioural Processes* 144, DOI: 10.1016/j.beproc.2017.08.011, S. 13–19.
- Rad, F.; Bozaoğlu, S.; Ergene Gözükar, S.; Karahan, A.; Kurt, G. (2006): Effects of different long-day photoperiods on somatic growth and gonadal development in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). In: *Aquaculture* 255(1–4), DOI: 10.1016/j.aquaculture.2005.11.028, S. 292–300.
- Reck, H.; Hänel, K.; Strein, M.; Georgii, B.; Henneberg, M.; Peters-Ostenberg, E.; Böttcher, M. (2017): Grünbrücken, Faunatunnel und Tierdurchlässe - Anforderungen an Querungshilfen. In: *Bundesamt für Naturschutz* (Hg.). *BfN-Skripten* 465, Bonn

- Rich, C.; Longcore, T. (Hg.) (2006): *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Washington, Covelo, London: Island Press. Washington, Covelo, London
- Riley, W.D.; Davison, P.I.; Maxwell, D.L.; Bendall, B. (2013): Street lighting delays and disrupts the dispersal of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fry. In: *Biological Conservation* 158, DOI: 10.1016/j.biocon.2012.09.022, S. 140–146.
- Riley, W.D.; Davison, P.I.; Maxwell, D.L.; Newman, R.C.; Ives, M.J. (2015): A laboratory experiment to determine the dispersal response of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fry to street light intensity. In: *Freshwater Biology* 60(5), DOI: 10.1111/fwb.12568, S. 1016–1028.
- Robert, K.A.; Lesku, J.A.; Partecke, J.; Chambers, B. (2015): Artificial light at night desynchronizes strictly seasonal reproduction in a wild mammal. In: *Proceedings. Biological Sciences / The Royal Society* 282(1816), DOI: 10.1098/rspb.2015.1745, S. 20151745-.
- Robertson, B.A.; Keddy-Hector, I.A.; Shrestha, S.D.; Silverberg, L.Y.; Woolner, C.E.; Hetterich, I.; Horváth, G. (2018): Susceptibility to ecological traps is similar among closely related taxa but sensitive to spatial isolation. In: *Animal Behaviour* 135, DOI: 10.1016/j.anbehav.2017.10.023, S. 77–84.
- Rodríguez, L.; Begtashi, I.; Zanuy, S.; Carrillo, M. (2005): Long-term exposure to continuous light inhibits precocity in European male sea bass (*Dicentrarchus labrax*, L.): Hormonal aspects. In: *General and Comparative Endocrinology* 140(2), DOI: 10.1016/j.ygcen.2004.10.011, S. 116–125.
- Rodríguez, A.; Rodríguez, B.; Curbelo, Á.J.; Pérez, A.; Marrero, S.; Negro, J.J. (2012): Factors affecting mortality of shearwaters stranded by light pollution. In: *Animal Conservation* 15(5), DOI: 10.1111/j.1469-1795.2012.00544.x, S. 519–526.
- Rodríguez, A.; Burgan, G.; Dann, P.; Jessop, R.; Negro, J.J.; Chiaradia, A. (2014): Fatal attraction of short-tailed shearwaters to artificial lights. In: *PLoS ONE* 9(10), DOI: 10.1371/journal.pone.0110114.
- Rodríguez, A.; García, D.; Rodríguez, B.; Cardona, E.; Parpal, L.; Pons, P. (2015): Artificial lights and seabirds: Is light pollution a threat for the threatened Balearic petrels? In: *Journal of Ornithology* 156(4), DOI: 10.1007/s10336-015-1232-3, S. 893–902.
- Rodríguez, A.; Dann, P.; Chiaradia, A. (2017): Reducing light-induced mortality of seabirds: high pressure sodium lights decrease the fatal attraction of shearwaters. In: *Journal for Nature Conservation* 39, DOI: 10.1016/j.jnc.2017.07.001, S. 68–72.
- Rodriguez, A.; Rodriguez, B. (2009): Attraction of petrels to artificial lights in the Canary Islands: Effects of the moon phase and age class. In: *Ibis* 151(2), DOI: 10.1111/j.1474-919X.2009.00925.x, S. 299–310.
- Romeo, S.; Viaggi, C.; Di Camillo, D.; Willis, A.W.; Lozzi, L.; Rocchi, C.; Capannolo, M.; Aloisi, G.; Vaglini, F.; Maccarone, R.; Caleo, M.; Missale, C.; Racette, B.A.; Corsini, G.U.; Maggio, R. (2013): Bright light exposure reduces TH-positive dopamine neurons: implications of light pollution in Parkinson's disease epidemiology. In: *Scientific Reports* 3(3), DOI: 10.1038/srep01395, S. 1395.
- Rotics, S.; Dayan, T.; Kronfeld-Schor, N. (2011): Effect of artificial night lighting on temporally partitioned spiny mice. In: *Journal of Mammalogy* 92(1), DOI: 10.1644/10-MAMM-A-112.1, S. 159–168.
- Rowse, E.G.; Harris, S.; Jones, G. (2016a): The Switch from Low-Pressure Sodium to Light Emitting Diodes Does Not Affect Bat Activity at Street Lights. In: *Plos One* 11(3), DOI: 10.1371/journal.pone.0150884, S. e0150884.
- Rowse, E.G.; Lewanzik, D.; Stone, E.L.; Harris, S.; Jones, G. (2016b): Dark Matters: The Effects of Artificial Lighting on Bats. In: Voigt, C.C./Kingston, T. (Hg.). Springer International Publishing, S. 187–213.
- Russ, A.; Rüger, A.; Klenke, R. (2014): Seize the night: European Blackbirds (*Turdus merula*) extend their foraging activity under artificial illumination. In: *Journal of Ornithology* 156(1), DOI: 10.1007/s10336-014-1105-1, S. 123–131.
- Russ, A.; Reitemeier, S.; Weissmann, A.; Gottschalk, J.; Einspanier, A.; Klenke, R. (2015): Seasonal and urban effects on the endocrinology of a wild passerine. In: *Ecology and Evolution* 5(23), DOI: 10.1002/ece3.1820, S. 5698–5710.

- Russo, D.; Cistrone, L.; Libralato, N.; Korine, C.; Jones, G.; Ancillotto, L. (2017): Adverse effects of artificial illumination on bat drinking activity. In: *Animal Conservation*, DOI: 10.1111/acv.12340, S. 1–10.
- Rydell, J. (1992): Exploitation of insects around streetlamps by bats in Sweden. In: *Functional Ecology* 6(6), DOI: 10.2307/2389972, S. 744.
- Rydell, J.; Eklöf, J.; Sánchez-Navarro, S. (2017): Age of enlightenment: long-term effects of outdoor aesthetic lights on bats in churches. In: *Royal Society Open Science* 4(8), DOI: 10.1098/rsos.161077, S. 161077.
- Ryer, C.H.; Olla, B.L. (1998): Effect of light on juvenile walleye pollock shoaling and their interaction with predators. In: *Marine Ecology Progress Series* 167, S. 215–226.
- Santos, C.D.; Miranda, A.C.; Granadeiro, J.P.; Lourenço, P.M.; Saraiva, S.; Palmeirim, J.M. (2010): Effects of artificial illumination on the nocturnal foraging of waders. In: *Acta Oecologica* 36(2), DOI: 10.1016/j.actao.2009.11.008, S. 166–172.
- Schoech, S.J.; Bowman, R.; Hahn, T.P.; Goymann, W.; Schwabl, I.; Bridge, E.S. (2013): The effects of low levels of light at night upon the endocrine physiology of western scrub-jays (*Aphelocoma californica*). In: *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology* 319(9), DOI: 10.1002/jez.1816, S. 527–538.
- Schoeman, M.C. (2016): Light pollution at stadiums favors urban exploiter bats. In: *Animal Conservation* 19(2), DOI: 10.1111/acv.12220, S. 120–130.
- Schroer, S.; Hölker, F. (2014): Light Pollution Reduction. In: Karlicek, R.; Sun, C-C.; Zissis G.; Ma R. (Hg.): *Handbook of Advanced Lighting Technology*. Springer International Publishing. S. 1–17.
- Schroer, S.; Hölker, F. (2016): Impact of Lighting on Flora and Fauna. In: Karlicek, R.; Sun, C-C.; Zissis G.; Ma R. (Hg.): *Handbook of Advanced Lighting Technology*. Springer International Publishing. 1–33
- Shuboni, D.; Yan, L. (2010): Nighttime dim light exposure alters the responses of the circadian system. In: *NSC* 170(4), DOI: 10.1016/j.neuroscience.2010.08.009, S. 1172–1178.
- Singh, J.; Rani, S.; Kumar, V. (2012): Functional similarity in relation to the external environment between circadian behavioral and melatonin rhythms in the subtropical Indian weaver bird. In: *Hormones and Behavior* 61(4), DOI: 10.1016/j.yhbeh.2012.01.015, S. 527–534.
- Somers-Yeates, R.; Bennie, J.; Economou, T.; Hodgson, D.; Spalding, A.; McGregor, P.K.; Bennie, J.; Economou, T.; Hodgson, D.; Spalding, A.; Pk, M. (2016): Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom. In: *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 283(1833), DOI: 10.1098/rspb.2016.0813, S. 20160813.
- Soneira, M. (2013): Auswirkungen auf die Insekten-Fauna durch die Umrüstung von Kugelleuchten auf LED-Beleuchtungen. <https://documentslide.org/auswirkungen-auf-die-insekten-faunadurch-die-umruistung-von-kugelleuchtenauf-led-beleuchtungen/>. (14.12.17)
- Spoelstra, K.; van Grunsven, R.H.A.; Donners, M.; Gienapp, P.; Huigens, M.E.; Slaterus, R.; Berendse, F.; Visser, M.E.; Veenendaal, E. (2015): Experimental illumination of natural habitat--an experimental set-up to assess the direct and indirect ecological consequences of artificial light of different spectral composition. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370(1667), DOI: 10.1098/rstb.2014.0129, S. 20140129.
- Spoelstra, K.; van Grunsven, R.H.A.; Ramakers, J.J.C.; Ferguson, K.B.; Raap, T.; Donners, M.; Veenendaal, E.M.; Visser, M.E. (2017): Response of bats to light with different spectra: light-shy and agile bat presence is affected by white and green, but not red light. In: *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 284(1855), DOI: 10.1098/rspb.2017.0075, S. 11–15.
- Stone, E.L.; Wakefield, A.; Harris, S.; Jones, G. (2015a): The impacts of new street light technologies : experimentally testing the effects on bats of changing from low- pressure sodium to white metal halide. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 370(1667), DOI: 10.1098/rstb.2014.0127, S. 20140127.
- Stone, E.L.; Harris, S.; Jones, G. (2015b): Impacts of artificial lighting on bats: a review of challenges and

solutions. In: *Mammalian Biology - Zeitschrift für Säugetierkunde* 80(3), 10.1016/j.mambio.2015.02.004, S. 213–219.

Stracey, C.M.; Wynn, B.; Robinson, S.K. (2014): Light Pollution Allows the Northern Mockingbird (*Mimus polyglottos*) to Feed Nestlings After Dark. In: *The Wilson Journal of Ornithology* 126(2), DOI: 10.1676/13-107.1, S. 366–369.

Summa, K.C.; Vitaterna, M.H.; Turek, F.W. (2012): Environmental perturbation of the Circadian clock disrupts pregnancy in the mouse. In: *PLoS ONE* 7(5), DOI: 10.1371/journal.pone.0037668, S. 1–5.

Tabor, R.A.; Brown, G.S.; Luiting, V.T. (2004): The effect of light intensity on sockeye salmon fry migratory behaviour and predation by cottids in the Cedar River, Washington. *North American Journal of Fisheries Management* 24(1), DOI: 10.1577/M02-095, 128–145.

Taltec, T. Le; Perret, M.; The, M. (2013): Light Pollution Modifies the Expression of Daily Rhythms and Behavior Patterns in a Nocturnal Primate. In: *Plos One* 8(11), DOI: 10.1371/journal.pone.0079250, S. e79250.

Taltec, T. Le; Théry, M.; Perret, M. (2016): Melatonin concentrations and timing of seasonal reproduction in male mouse lemurs (*Microcebus murinus*) exposed to light pollution. In: *Journal of Mammalogy* 97(3), DOI: 10.1093/jmammal/gyw003, S. 753–760.

Tan, D.X.; Manchester, L.C.; Terron, M.P.; Flores, L.J.; Reiter, R.J. (2007): One molecule, many derivatives: A never-ending interaction of melatonin with reactive oxygen and nitrogen species? In: *Journal of Pineal Research* 42(1), DOI: 10.1111/j.1600-079X.2006.00407.x, S. 28–42.

Telfer, T.C.; Sincock, J.L.; Byr, G.V.; Reed, J.R.. (1987): Attraction of Hawaiian Seabirds to Lights : Conservation Efforts and Effects of Moon Phase. In: *Wildlife Society bulletin* 15(3), S. 406–413.

Thomas, J.R.; James, J.; Newman, R.C.; Riley, W.D.; Griffiths, S.W.; Cable, J. (2016): The impact of streetlights on an aquatic invasive species: Artificial light at night alters signal crayfish behaviour. In: *Applied Animal Behaviour Science* 176, DOI: 10.1016/j.applanim.2015.11.020, S. 143–149.

Titulaer, M.; Spoelstra, K.; Lange, C.Y.M.J.G.; Visser, M.E. (2012): Activity patterns during food provisioning are affected by artificial light in free living great tits (*parus major*). In: *PLoS ONE* 7(5), DOI: 10.1371/journal.pone.0037377, S. 5–8.

Tuttle, M.D.; Ryan, M.J. (1982): The role of synchronized calling, ambient light, and ambient noise in anti-bat behaviour of a treefrog. In: *Behavioral Ecology and Sociobiology* 154(2), S. 171–174.

Vakkuri, O.; Rintamaki, H.; Leppaluoto, J. (1985): Plasma and tissue concentrations of melatonin after midnight light exposure and pinealectomy in the pigeon. In: *Journal of Endocrinology* 105, S. 263–268.

Valenzuela, A.E.; Silva, V.M.; Klempau, A.E. (2008): Effects of different artificial photoperiods and temperatures on haematological parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). In: *Fish Physiology and Biochemistry* 34(2), DOI: 10.1007/s10695-007-9156-3, S. 159–167.

Van Doren, B.M.; Horton, K.G.; Dokter, A.M.; Klinck, H.; Elbin, S.B.; Farnsworth, A. (2017): High-intensity urban light installation dramatically alters nocturnal bird migration. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114(42), 10.1073/pnas.1708574114, S. 11175–11180.

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. In: *Biological Conservation* 144 (9), DOI: 10.1016/j.biocon.2011.06.004, S. 2274–2281.

van Langevelde, F.; Braamburg-Annegarn, M.; Huigens, M.E.; Groenendijk, R.; Poitevin, O.; van Deijk, J.R.; Ellis, W.N.; van Grunsven, R.H.A.; de Vos, R.; Vos, R.A.; Franzén, M.; DeVries, M.F.W. (2017): Declines in moth populations stress the need for conserving dark nights. In: *Global Change Biology*. DOI: 10.1111/gcb.14008.

Vänninen, I.; Pinto, D.M.; Nissinen, A.I.; Johansen, N.S.; Shipp, L. (2010): In the light of new greenhouse technologies: 1. Plant-mediated effects of artificial lighting on arthropods and tritrophic interactions. In: *Annals of Applied Biology* 157(3), DOI: 10.1111/j.1744-7348.2010.00438.x, S. 393–414.

- Vasquez, R.A. (1994): Assessment of Predation Risk Via Illumination Level - Facultative Central Place Foraging in the Cricetid Rodent *Phyllotis-Darwini*. In: *Behavioral Ecology and Sociobiology* 34(5), S. 375–381.
- Vera, L.M.; Lopez-Olmeda, J.F.; Bayarri, M.J.; Madrid, J.A.; Sanchez-Vazquez, F.J. (2005): Influence of light intensity on plasma melatonin and locomotor activity rhythms in tench. In: *Chronobiol.Int.* 22(1), DOI: 10.1081/CBI-200038157, S. 67–78.
- Vera, L.M.; Migaud, H. (2009): Continuous high light intensity can induce retinal degeneration in Atlantic salmon, Atlantic cod and European sea bass. In: *Aquaculture* 296(1–2), DOI: 10.1016/j.aquaculture.2009.08.010, S. 150–158.
- 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. In: *Journal for Nature Conservation* 28, 10.1016/j.jnc.2015.09.002, S. 105–111.
- Villamizar, N.; García-Alcazar, a.; Sánchez-Vázquez, F.J. (2009): Effect of light spectrum and photoperiod on the growth, development and survival of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) larvae. In: *Aquaculture* 292(1–2), DOI: 10.1016/j.aquaculture.2009.03.045, S. 80–86.
- Villamizar, N.; García-Mateos, G.; Sánchez-Vázquez, F.J. (2011): Behavioral responses of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) larvae and *Artemia* sp. exposed to constant light or darkness vs. light/dark cycles of white, red or blue wavelengths. In: *Aquaculture* 317(1–4), DOI: 10.1016/j.aquaculture.2011.03.036, S. 197–202.
- Viršilè, A., Olle, M., Duchovskis, P. (2017): LED Lighting in Horticulture. In: Dutta Gupta S. (Hg.) *Light Emitting Diodes for Agriculture*. Springer, Singapore
- Vogel, G. (2017): Where have all the insects gone? In: *Science* 356(6338), DOI: 10.1126/science.356.6338.576, S. 576–579.
- Voigt, C.C.; Roeleke, M.; Marggraf, L.; Petersons, G.; Voigt-Heucke, S.L. (2017): Migratory bats respond to artificial green light with positive phototaxis. In: *PLoS ONE* 12(5), DOI: 10.1371/journal.pone.0177748, S. 1–11.
- Völker, S.; Peter Krenz (2013): Entwicklung von Maßzahlen für adaptive Beleuchtungssysteme. n: Held, M.; Hölker, F.; Jessel B. (Hg.). *BfN-Skripten 336*, Bonn - Bad Godesberg, S. 87–90.
- Vriend, J.; Lauber, Jean, K. (1973): Effects of Light Intensity, Wavelength and Quanta on Gonads and Spleen of the Deer Mouse. In: *Nature* 244(5410), S. 37–38.
- Walking, A.; Stockmar, A. (2013): Normen, Richtlinien und Empfehlungen zur Begrenzung von Lichtmissionen. n: Held, M.; Hölker, F.; Jessel B. (Hg.). *BfN-Skripten 336*, Bonn - Bad Godesberg, S. 137–140.
- Welbers, A.A.M.H.; van Dis, N.E.; Kolvoort, A.M.; Ouyang, J.; Visser, M.E.; Spoelstra, K.; Dominoni, D.M. (2017): Artificial Light at Night Reduces Daily Energy Expenditure in Breeding Great Tits (*Parus major*). In: *Frontiers in Ecology and Evolution* 5(55), DOI: 10.3389/fevo.2017.00055, S. 1–10.
- Yasuo, S.; Nakao, N.; Ohkura, S.; Iigo, M.; Hagiwara, S.; Goto, A.; Ando, H.; Yamamura, T.; Watanabe, M.; Watanabe, T.; Oda, S.; Maeda, K.; Lincoln, G. a; Okamura, H.; Ebihara, S.; Yoshimura, T. (2006): Long-day suppressed expression of type 2 deiodinase gene in the mediobasal hypothalamus of the Saanen goat, a short-day breeder: implication for seasonal window of thyroid hormone action on reproductive neuroendocrine axis. In: *Endocrinology* 147(1), DOI: 10.1210/en.2005-0507, S. 432–40.
- York, J.E.; Young, A.J.; Radford, A.N. (2014): Singing in the moonlight: dawn song performance of a diurnal bird varies with lunar phase. In: *Biology letters* 10(1), 10.1098/rsbl.2013.0970, S. 20130970.
- Zhang, S.; Chen, X.; Zhang, J.; Li, H. (2014): Differences in the reproductive hormone rhythm of tree sparrows (*Passer montanus*) from urban and rural sites in Beijing: The effect of anthropogenic light sources. In: *General and Comparative Endocrinology* 206, DOI: 10.1016/j.ygcen.2014.05.020, S. 24–29.
- Ziv, L.; Tovin, A.; Strasser, D.; Gothilf, Y. (2007): Spectral sensitivity of melatonin suppression in the zebrafish pineal gland. In: *Experimental Eye Research* 84(1), DOI: 10.1016/j.exer.2006.09.004, S. 92–99.

Über die Autoren

Dr. Sibylle Schroer

Wissenschaftliche Koordinatorin am Leibniz Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, angestellt im Rahmen des Schwerpunktthemas Lichtverschmutzung für die Organisation des Aufbaus der Experimentalfelder für die interdisziplinäre Zusammenarbeit, Betreuung der interdisziplinären Vernetzung, Öffentlichkeitsarbeit, Berichterstattung und Drittmittelwerbung.

PD Dr. Franz Hölker:

Stellvertretender Abteilungsleiter der Abteilung Ökohydrologie, Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei und Privatdozent für Zoologie am Fachbereich Biologie, Chemie, Pharmazie der Freien Universität Berlin. Arbeitsgruppenleiter zur Erforschung von Auswirkungen durch künstliches Licht auf Flora, Fauna und Ökosysteme.

Das Netzwerk

Ein Gutachten über die Auswirkungen der Lichtverschmutzung auf Fauna und Flora ist ein hoch komplexes Themenfeld, das in dieser Form nur durch die umfassenden Forschungsarbeiten und das effektive Netzwerk der Autoren möglich wurde. Das Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei baut auf das strategische Ziel einer Forschung für die Gesellschaft. Daher erlaubt die Öffentlichkeitsarbeit der individuellen Projekte zu Auswirkungen von künstlichem Licht in der Nacht, in denen das IGB beteiligt ist, „Verlust der Nacht“³⁴, die EU COST-Aktion ES1204 „Loss of the Night Network (LoNNe)“³⁵, sowie die Bewusstseinsplattform „STARS4ALL“³⁶, einen transparenten Einblick in alle Forschungsergebnisse, Handlungsempfehlungen und Publikationen. Beispielsweise wurde in Kooperation mit der Internationalen Dark Sky Association (IDA) eine öffentlich zugängliche Literaturdatenbank³⁷ bereitgestellt, in der die Links zu allen in diesem Gutachten enthaltenden Publikationen zu finden sind.

Für eine fundierte Bestandsaufnahme des Wissensstands zu den Auswirkungen der Lichtverschmutzung auf Fauna und Flora reicht ein einfaches Review, wie beispielsweise das Kapitel Auswirkungen künstlicher Beleuchtung auf Flora und Fauna (Schroer/Hölker 2016), der Arbeiten nicht aus. Zu unterschiedlich sind die Auswirkungen selbst auf Vertretern innerhalb einer Klasse ausgeprägt. Noch dazu unterscheidet sich die Qualität der Originalarbeiten stark. Viele Veröffentlichungen über Studien zu künstlichen Licht geben nur ungenügend Informationen über die tatsächliche Intensität und spektrale Zusammensetzung des angewendeten Lichtes wider. Ein Trend zu effektiver interdisziplinärer Zusammenarbeit

³⁴ <http://www.verlustdernacht.de/>

³⁵ <http://www.cost-lonne.eu/>

³⁶ <http://www.stars4all.eu/>

³⁷ <http://www.darksky.org/resources/research/alan-database/>

von Biologen bzw. Ökologen mit Physikern und Lichtplanern ist in den Publikationen erkennbar. Wurde Licht oft nur als ein Faktor berücksichtigt, der ein oder ausgeschaltet wird, sind die heutigen Angaben zu den angewendeten Lichtquellen und der Strahlenexposition viel detaillierter. Diese interdisziplinäre Zusammenarbeit im Bereich der Forschung über Auswirkungen von künstlichem Licht in der Nacht wurde zum einen durch die EU-COST Aktion LoNNe gefördert und durch die internationale Konferenzreihe ALAN³⁸ (Artificial light at Night) kommuniziert, welche dem Verbundprojekt Verlust der Nacht entsprungen ist und bisher jährlich, zukünftig zweijährlich global ausgerichtet wird. Dieses interdisziplinäre Netzwerk ist essentiell um die vielen offenen Fragen rund um das Leben in der Nacht aufzuklären und diesen Lebensraum nachhaltiger gestalten zu können.

Vor allem ist es aber wichtig das Konsumverhalten zu schulen, denn was nützt effiziente Technologie, wenn damit verschwenderisch umgegangen wird? So ist zum Beispiel der Einsatz energieeffizienter Beleuchtungsmitteln allein kein Mittel für den Ressourcenschutz. Wenn der Konsum nicht reguliert wird, kann die Nutzung steigen, weil die Kosten für den Konsum durch die verbesserte Effizienz fallen.

Die Autoren sind deshalb Partner in dem Netzwerk STARS4ALL, eine Bewusstseinsplattform, welche im Rahmen des EU-CAPS-Programms³⁹ gefördert wird. Die Kollektiven Bewusstseinsplattform für nachhaltige und soziale Innovationen fördern Bürgeraktionen, Grasswurzelgruppen und NGOs, um nachhaltigen Verbrauch, Fakten und Beweisaufnahme durch Bürger und eine Entwicklung hin zu alternativen Lösungsansätzen Entscheidungsträgern zugänglich zu machen. STARS4ALL tritt für den Schutz Europäischer Nachthimmel ein und vernetzt Bürger, Wissenschaftler und Aktivisten. Die Plattform bietet Mitmach Aktionen und Initiativen für jeden. Auf der Webseite können beispielsweise Orte gefunden werden, welche heute noch weitestgehend verschont geblieben sind von der Verschmutzung der natürlichen Lichtverhältnisse durch künstliche Lichtquellen.

³⁸ <http://www.artificiallightatnight.org/>

³⁹ <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/collective-awareness-platforms-sustainability-and-social-innovation-caps>