

LiTG-Fachgebiet: Außenbeleuchtung

AUSSENBELEUCHTUNG UND UMWELTASPEKTE



49



**Deutsche Lichttechnische
Gesellschaft e.V.**

Inhalt

Vorwort	3
1. Einleitung	4
2. Allgemeine Grundlagen zur Umweltwirkung von Licht	6
2.1 Die Nacht als biologischer »Lebensraum«	6
2.2 Lichtwahrnehmung bei Tieren	7
2.3 Nicht-visuelle Wirkungen	9
2.4 Verschiebung von Nahrungsnetzen und Verlust von Ökosystemleistungen	9
3. Ökologische Auswirkungen auf ausgewählte Organismengruppen	11
3.1 Auswirkungen auf Insekten	12
3.2 Auswirkungen auf Spinnen	16
3.3 Auswirkungen auf Fische und aquatische Mikroorganismen	17
3.4 Auswirkungen auf Amphibien	18
3.5 Auswirkungen auf Vögel	19
3.6 Auswirkungen auf Säugetiere mit Ausnahme von Fledermäusen	21
3.7 Auswirkungen auf Fledermäuse	21
3.8 Auswirkungen auf Pflanzen	23
4. Möglichkeiten zur Gestaltung	25
5. Ausblick	28
6. Weiterführende Literatur	29
Literaturverzeichnis	30
Impressum und Kontakt	42

Vorwort

Die Beleuchtung im Freien von zum Beispiel Straßen, Arbeitsplätzen oder Sportstätten dient in den Dunkelstunden der Aufrechterhaltung ausreichender Sehbedingungen zur Wahrnehmbarkeit relevanter Sehobjekte. Dabei gilt es – im Besonderen in naturnahen Gebieten – die durch die Beleuchtungsanlagen gegebenenfalls hervorgerufenen Störwirkungen auf Fauna und Flora auf ein vertretbares Maß zu beschränken. Dies kann durch Abschalten (nicht notwendiger Beleuchtungsanlagen), Dimmen (auf ein noch angemessenes Beleuchtungsniveau) oder Begrenzen der Beleuchtung (auf die zu beleuchtenden Flächen) durch geeignete Abstrahlcharakteristiken erfolgen. Bei Kenntnis der spektralen Hellempfindlichkeiten der zu schützenden Arten (Fauna und Flora) sind nur solche Lichtquellen zum Einsatz zu bringen, deren spektrale Verteilungen kleinstmögliche Störwirkungen hervorrufen.

1. Einleitung

Die nächtliche Beleuchtung von Außenräumen und Verkehrsräumen im Freien hat eine Reihe von Funktionen. Wichtige Bereiche, die eng im Zusammenhang mit den Nutzwirkungen der Außenbeleuchtung in den Dunkelstunden stehen, sind:

- die Nutzbarkeit von Infrastruktur
- die Verkehrssicherheit
- die öffentliche Ordnung und Sicherheit
- gestalterische Aspekte der (öffentlichen) Räume.

Neben den Nutzwirkungen können mit der nächtlichen Beleuchtung von Außenräumen Störwirkungen in unterschiedlichem Maße einhergehen. Bedeutsame Anteile solcher Störwirkungen werden unter dem Aspekt »Lichtimmission« zusammengefasst. Die LiTG hat hierzu umfangreiche Ausführungen in der Schrift 12.3 »Empfehlungen für die Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen« veröffentlicht.

Ein besonderer und besonders sensibler Bereich für Störwirkungen durch künstliche Beleuchtung stellen Umwelt und Naturräume dar. Ökologische Studien der letzten 30 Jahre zeigen, dass künstliches Licht bei Nacht deutliche Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen hat [1-10].

Störwirkungen durch Außenbeleuchtung können auf drei Wegen entstehen:

- durch direkte Lichteinstrahlung
- durch indirekte Lichteinstrahlung, zum Beispiel durch Reflexion an Flächen (Straßen, Hausfassaden und so weiter)
- sekundär durch Reflexion und Streuung in der Atmosphäre.

Lichtplanende stehen oft vor der Aufgabe, Beleuchtung mit größtmöglichem Nutzen und kleinstmöglicher Störwirkung zu schaffen. Dies kann nur gelingen, wenn unterschiedliche Disziplinen, vor allem Biologie, Medizin, Physik und Lichtplanung, ihr Wissen und ihre Anforderungen teilen. Bisher fehlt es allerdings an einer gemeinsamen Sprache und Arbeitsweisen [11]. Für Lichtplanerinnen und -planer ist es außerdem nicht einfach, die biologischen Erkenntnisse in den ökologischen Kontext einzuordnen. Diese Publikation soll einen Überblick über den aktuellen Kenntnisstand der Auswirkungen geben und einige Lösungsansätze vorstellen, um Störwirkungen in Naturräumen zu vermindern oder sogar zu verhindern. Ziel ist eine umweltfreundliche nachhaltige Beleuchtung, die möglichst viele Aspekte berücksichtigt.

Zu beachten ist, dass die Wirkungen von Licht sehr komplex sind und verschiedene Organismen unterschiedlich auf Licht reagieren. Es kann daher keine einfache allgemeingültige Lösung oder Empfehlung geben. Konkrete Gestaltungen können nur nach einer Priorisierung der Aspekte entstehen und lokal unter Berücksichtigung aller Umstände entschieden werden.

Ziel einer guten Lichtplanung sollte es daher sein, sowohl eine hohe Beleuchtungsqualität im Sinne guter Wahrnehmungsbedingungen zu schaffen als auch die möglichen negativen Folgen der nächtlichen Beleuchtung so gering wie nur irgend möglich zu halten. Diese Schrift soll daher als Ergänzung der Normen und Regelwerke dienen und helfen, mit den negativen Wirkungen nächtlicher Beleuchtung verantwortungsvoll umzugehen.

2. Allgemeine Grundlagen zur Umweltwirkung von Licht

Die Nacht besitzt für viele Organismen eine hohe Bedeutung. Licht und Beleuchtung können eine Wirkung auf Umwelt und Naturräume sowohl direkt durch Wahrnehmung als auch indirekt durch die Beeinflussung biologischer Rhythmen entfalten. Die künstliche Beleuchtung von Naturräumen beeinflusst die Lebensbedingungen der Organismen in ihnen, in einigen Fällen von den Auswirkungen her vergleichbar mit dem Trockenlegen von Feuchtgebieten oder dem Abholzen von Wäldern. Die grundlegenden Auswirkungen werden im Folgenden behandelt, bevor im nächsten Kapitel spezieller auf bestimmte Organismengruppen eingegangen wird.

Zur Bewertung der hier dargestellten Erkenntnisse ist es wichtig, sich der Arbeitsweisen in der Biologie bewusst zu sein. Biologische Resultate weisen stärkere Schwankungen auf als technische Messungen und müssen in komplexe ökologische und physiologische Zusammenhänge eingeordnet werden. Dabei wird deutlich, dass die Wirkungen von Licht sehr komplex sind und verschiedene Organismen unterschiedlich auf Licht reagieren. Leider fehlen in biologischen Studien mitunter lichttechnische Angaben. Messungen erfolgen meist in der für die Beleuchtungsplanung relevanten Einheit Lux, die sich aufgrund unterschiedlicher spektraler Hellempfindlichkeiten der Tiere nur bedingt übertragen lässt. Dennoch gibt es hinreichend Gründe, über einen sorgsameren Umgang mit Licht im Außenraum nachzudenken.

2.1 Die Nacht als biologischer »Lebensraum«

Organismen sind an verschiedene Lebensräume und Bedingungen angepasst. Während Generalisten Veränderungen ihrer Umwelt tolerieren oder sogar zu ihrem Vorteil nutzen können, besitzen Spezialisten nur eine eingeschränkte Anpassungsfähigkeit. Lebensräume haben nicht nur eine geographische, sondern auch eine temporäre Komponente, das sogenannte Chronotop. Die Nacht ist daher ein »Lebensraum«, deren Bewohner bestimmte Anpassungen an die nachtypischen Verhältnisse, vor allem die Lichtverhältnisse, aufweisen.

Wohl keine natürliche Veränderung ist so intensiv, regelmäßig und verlässlich wie der tägliche, monatliche und saisonale Wechsel des Beleuchtungsniveaus. Alle Lebewesen an der Oberfläche haben sich evolutionär diesem Rhythmus angepasst. Nur wenige Tiere sind fähig, ihren optischen Apparat an die starken Unterschiede anzupassen, weshalb die meisten Tierarten als tag- oder nachtaktiv eingestuft werden. Etwa ein Drittel der Wirbeltiere und zwei Drittel aller Wirbellosen sind nachtaktiv [1].

Die natürliche nächtliche Helligkeit ist nicht konstant, sondern schwankt mit der Wolkendecke und vor allem mit den Mondphasen. Relativ helle Nächte bedeuten für Raubtiere wie Eulen, Füchse, Marder etc. oft bessere Sichtbedingungen, weswegen viele Kleinsäuger die Futtersuche auf ein Minimum reduzieren [12].

Viele Organismen synchronisieren ihre Fortpflanzung mit dem Mondzyklus, sei es, um optimale Futterbedingungen für die Jungenaufzucht zu haben (z. B. Nachtschwalben), sich mit den Gezeiten zu koordinieren (z. B. Zuckmücken im Wattenmeer) oder um gemeinsam für die Paarung bereit zu sein (z. B. Eintagsfliegen) [12]. Zeitliche Verschiebungen können Gefahr durch Fressfeinde, Nahrungsknappheit oder schlechte Wetterbedingungen bedeuten.

Künstliche Beleuchtung erhellt den Nachthimmel vielerorts zum Teil deutlich; in einigen Fällen um ein 1000-faches im Vergleich zu einer klaren Vollmondnacht [13]. Damit verändern sich die optischen Bedingungen vor Ort deutlich und die natürlichen Mondzyklen werden überdeckt [14]. Punktuell kann künstliches Licht deutlich höhere Werte erreichen, beispielsweise mehr als 1000 lx auf den Blättern in einer Baumkrone oder wenige Meter vor der Leuchte in Flughöhe von Insekten und Fledermäusen vertikal in Richtung Leuchte gemessen [15]. Bei der Lichtplanung ist daher zu beachten, dass aus ökologischer Sicht nicht nur die mittlere Beleuchtungsstärke der zu beleuchtenden Fläche relevant ist, sondern auch die an Einzelpunkten erreichten Maximalwerte, beispielsweise in der Krone eines Baumes neben der Straßenleuchte. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die potentielle Anlockwirkung eher von der Leuchtdichte leuchtender oder beleuchteter Flächen als von der Beleuchtungsstärke abhängig ist.

Diese Veränderung der Lichtbedingungen führt zu einer Vielzahl von Veränderungen im Verhalten und in der Physiologie verschiedenster Lebensformen. In Kapitel 3 wird darauf detaillierter eingegangen. Dabei zeigt sich, dass einige Arten von der künstlichen Beleuchtung profitieren, während andere Arten Nachteile erfahren. In einigen Lebensräumen beispielsweise in aquatischen Bereichen konnten Veränderungen in der Artenzusammensetzung beobachtet werden. Lichtemissionen werden daher als ernstzunehmende Bedrohung angesehen, vor allem im Zusammenspiel mit anderen Umweltproblemen [1, 4, 7, 8, 10, 16–20].

2.2 Lichtwahrnehmung bei Tieren

Künstliches Licht kann sich auch direkt auf die Sehfähigkeit von Tieren auswirken. Nachtaktive Tiere sind meist sehr lichtempfindlich und helles Licht führt zu Blendung. Bei Fledermäusen kann dies zu Kollisionen führen [21, 22]. Problematisch ist auch die Dunkeladaptation, die bei einigen Fischen und Amphibien bis zu einer Stunde betragen kann. In dieser Zeit ist die Sehfähigkeit der Tiere deutlich eingeschränkt, was zu Einschränkungen in der Fortbewegung und wahrscheinlich auch zu höherem Risiko durch Fressfeinde führt [10, 23].

Die Messung von Licht erfolgt im Allgemeinen photometrisch. Dies bedeutet, dass die emittierte Strahlung mit der spektralen Hellempfindung des menschlichen Auges gewichtet wird. Die spektrale Helligkeitswahrnehmung bei Tieren unterscheidet sich je nach Art deutlich von der beim Menschen. So können beispielsweise einige Krebse, Insekten und Fische Helligkeitsunterschiede im UV-Bereich, teilweise aber nicht im Rotbereich (siehe Abbildung 1) wahrnehmen. Zur ökologischen Bewertung von optischer Strahlung ist daher eine radiometrische Messung, die auch von Tierarten im Umfeld der geplanten Lichtquelle wahrnehmbare Spektralbereiche einschließt, sinnvoller. Für die Außenbeleuchtung sollten die für Menschen nicht sichtbaren Spektralbereiche möglichst minimiert werden.

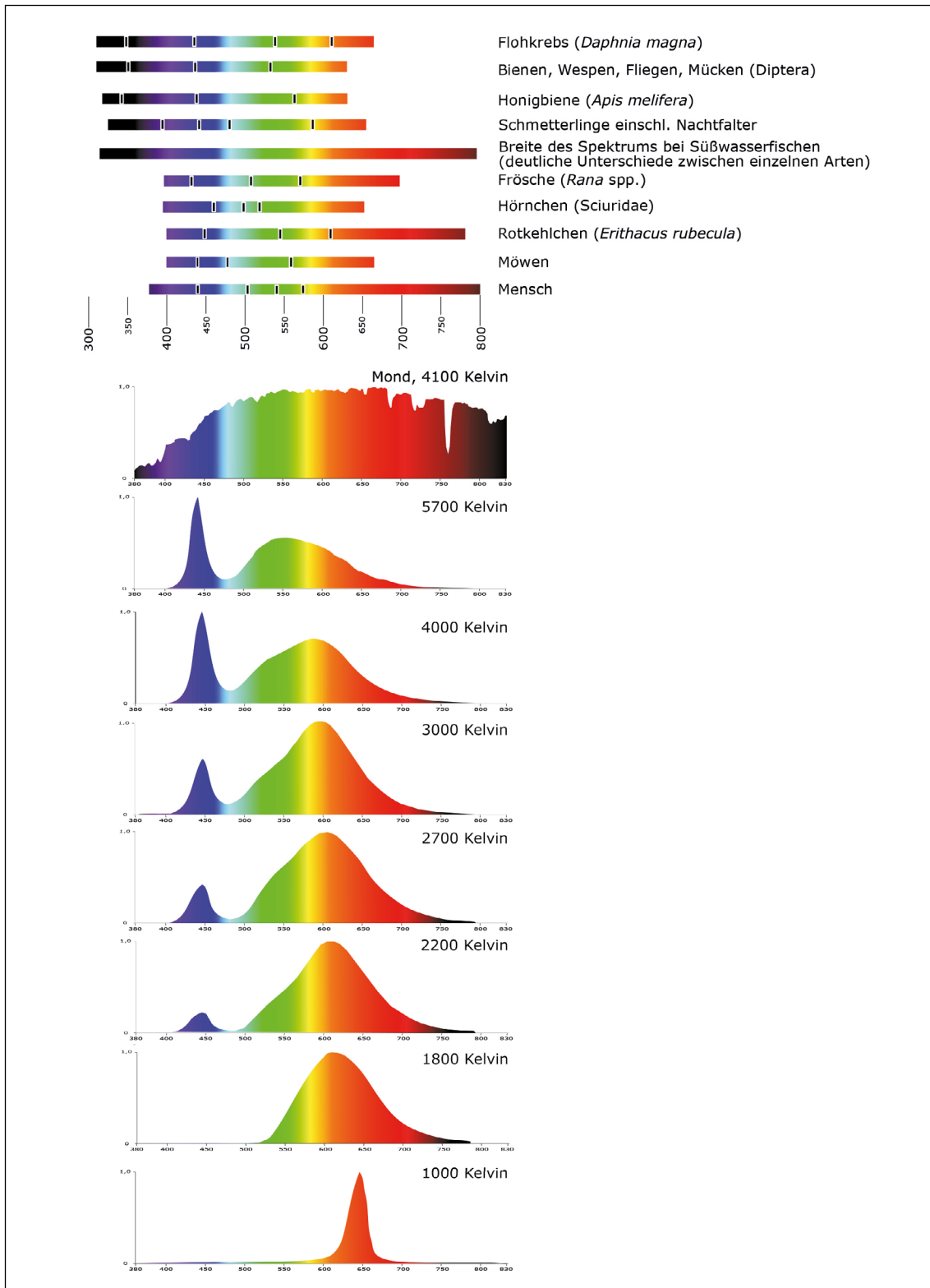


Abbildung 1

Wahrnehmbare Wellenlängen und Absorptionsmaxima (schwarze senkrechte Striche im Spektrum) für verschiedene Tiergruppen und beispielhafte Spektren für zur Zeit erhältliche LEDs (verändert nach Perkin et al. [24] und National Light Pollution Guidelines for Wildlife [25]). Die für Süßwasserfische wahrnehmbaren Spektren unterscheiden sich deutlich zwischen den Arten, daher ist der Gesamtbereich ohne Absorptionsmaxima angegeben. Die Spektren von auf dem Markt verfügbaren Lampen wurden von Signify zur Verfügung gestellt. Mondspektrum entnommen von OliNo.org.

2.3 Nicht-visuelle Wirkungen

Fast alle Lebewesen weisen einen zirkadianen Tag-Nacht-Rhythmus in ihren Körperfunktionen auf. Dieser Rhythmus erlaubt eine optimale Nutzung der Licht- und Temperaturverhältnisse und gewährleistet Ruheperioden, in denen sich der Körper regeneriert und Lernvorgänge sowie die Immunabwehr ablaufen [7, 16, 26, 27]. Eine wichtige Rolle spielt dabei das Hormon Melatonin, welches bei Bakterien, einzelligen Eukaryoten, Pilzen, Pflanzen und Tieren gefunden wurde und sowohl in der Immunabwehr, bei Wachstums- und Regenerationsvorgängen und bei der Steuerung zirkadianer sowie saisonaler Rhythmen eine Rolle spielt [7, 27]. Bei Wirbeltieren folgt die Bildung von Melatonin einem endogenen Rhythmus, der durch Licht mit der Umgebung synchronisiert wird. Die Unterdrückung von Melatonin erfolgt dabei am stärksten durch kurzwelliges Licht [7]. Die Schwellenwerte für die Melatoninunterdrückung zeigen deutliche artspezifische Unterschiede. Bei verschiedenen Wirbeltieren konnten jedoch mit Beleuchtungsstärken, die im Alltag durch künstliche Außenbeleuchtung erreicht werden, physiologisch relevante Absenkungen der Melatoninproduktion erreicht werden [7]. Bei Säugetieren, Vögeln und Fischen führen Störungen im Melatoninrhythmus durch nächtliches Licht nachweislich zu Stoffwechselstörungen, erhöhter Infektanfälligkeit und Fortpflanzungsstörungen [16, 27].

Das zirkadiane System ist wiederum an der Steuerung saisonaler Vorgänge beteiligt. Veränderungen der Tageslänge steuern unter anderem Fortpflanzung, Fettstoffwechsel, Mauser beziehungsweise Fellwechsel und Zugverhalten [28–32]. Verschiebungen der Tageslänge können negative Auswirkungen auf die Fitness eines Lebewesens haben [18] und verschiedene Studien fanden einen Zusammenhang zwischen Außenbeleuchtung und saisonalen Vorgängen im Freiland (siehe Kapitel 3).

Bei Pflanzen erfolgt die zirkadiane Steuerung primär über Cryptochrome, die Strahlung zwischen 320 und 500 nm absorbieren. Neben den zirkadianen Rhythmen beispielsweise im Wachstum steuern sie auch die Entwicklung von Knospen und Früchten sowie den Laubfall [16, 32]. Künstliches Licht wird daher in der Pflanzenzucht angewandt. Es gibt aber auch Hinweise, welche Einflüsse die Straßenbeleuchtung auf Pflanzen haben kann (siehe Kapitel 3.8) [33].

2.4 Verschiebung von Nahrungsnetzen und Verlust von Ökosystemleistungen

Verschiedene Arten reagieren unterschiedlich auf künstliche Beleuchtung. Einige nutzen das Licht, andere vermeiden es. Bei Fledermäusen zeigen sich bereits Verschiebungen der Artenzusammensetzung in einem Gebiet, nachdem Beleuchtung neu installiert oder im Spektrum verändert wurde [34].

Auch bei Arthropoden¹ kann es zu Veränderungen in Nahrungsnetzen kommen. In drei Studien führte die Beleuchtung eines Gewässers durch Natriumdampflampen beziehungs-

¹ »Gliederfüßer«, wirbellose Tiere, zu denen Insekten, Tausendfüßler, Asseln, Spinnen, Milben, Skorpione und Krebse gehören.

weise LEDs zu vermehrtem Schlupf aquatischer Insekten und einer allgemein erhöhten Anzahl an aquatischen Insekten [35–37]. Einige der Autoren und Autorinnen vermuten, dass die Insekten durch den Staubsaugereffekt in die beleuchteten Uferbereiche gelockt und dort gehalten werden, wodurch der natürliche Austausch mit umliegenden Bereichen zum Erliegen kommt [35, 36]. Eine Studie fand Veränderungen in der Artenzusammensetzung und in den Nahrungsketten der terrestrischen Arten, vor allem bei Spinnen, mit einem stärkeren Anteil an aquatischen Beutetieren. Die Anzahl von Radnetzspinnen nahm dabei ab [37]. Alle drei Studien fanden starke artspezifische Unterschiede in der Reaktion auf künstliches Licht.

Die erhöhte Menge an Insekten führt zu einem verbesserten Nahrungsangebot, das von einigen Spinnenarten ausgenutzt wird (siehe 4.2 Auswirkungen auf Spinnen) [36,38]. Eine Studie fand eine erhöhte Anzahl räuberischer und aasfressender Arthropoden unterhalb von Straßenleuchten (NATRIUMDAMPFHOCHDRUCKLAMPE, circa 19 lx) im Vergleich mit dem Bereich zwischen den Leuchten, wo etwa 3 lx gemessen wurden [39]. Wurde ein zuvor unbeleuchteter Entwässerungsgraben großflächig mit Natriumdampfhochdruck-Straßenleuchten ausgestattet (1–50 lx), nahm die Anzahl bodenlebenden Raubarthropoden ab, obwohl vermehrt lichttolerante Spinnen und Raubkäfer gefunden wurden [35].

Nahrungsnetze reagieren empfindlich auf Veränderungen auf der untersten Ebene. Störungen führen zu kaskadenartigen Veränderungen. So kann künstliche Beleuchtung zu reduziertem Pflanzenwachstum führen [40, 41] oder die Beschaffenheit des Pflanzenmaterials verändern [42]. Beides kann sich nicht nur direkt auf die Konsumenten der Pflanzen, sondern auch auf deren Fressfeinde auswirken.

Deutliche Auswirkungen künstlicher Beleuchtung zeigen sich auch bei der Bestäubung. Etwa 85 Prozent der Pflanzen sind auf tierische Bestäubung angewiesen, wovon Insekten den Hauptanteil leisten. Dabei spielen nachtaktive Insekten eine bedeutende Rolle. Künstliche Beleuchtung kann deren Aktivität jedoch signifikant verändern. In einer Studie sank die Häufigkeit von Motten am Boden bei 0,2 bis 12,1 lx um 50 Prozent, obwohl 1,7 mal so viele Motten im Luftraum gefunden wurden. Auch Artenvielfalt und Pollentransport sanken [43]. Künstliche Beleuchtung reduzierte die Fruchtbildung einer Distelart um 13 Prozent, da weniger Nachtbestäuber auf den beleuchteten Flächen auftraten. Dadurch sinkt nicht nur der Fortpflanzungserfolg der Pflanze, sondern es fehlt auch Nahrung für pflanzenfressende Insekten, die wiederum die Nahrung für insektenfressende Tiere bilden [44]. Auch der Mensch ist davon betroffen, beispielsweise durch den Verlust von Ökosystemleistungen wie der Bestäubung von Nutzpflanzen. Eine Beleuchtung am Wegesrand zieht damit Veränderungen im gesamten Ökosystem nach sich.

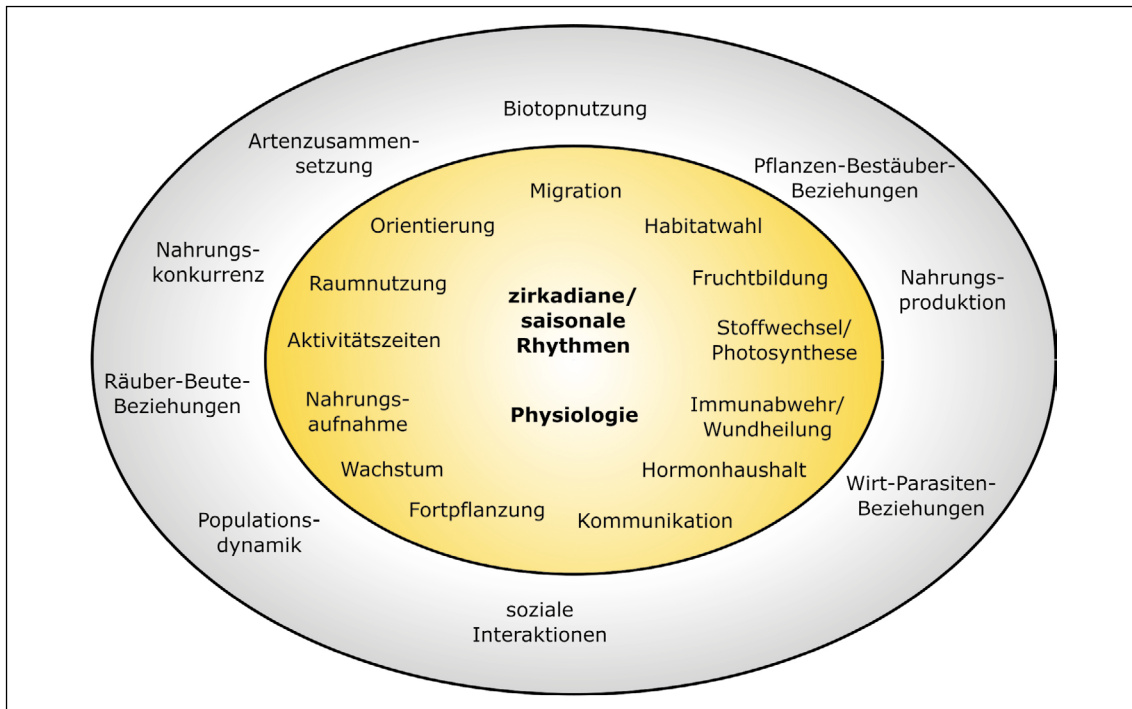
3. Ökologische Auswirkungen auf ausgewählte Organismengruppen

Die Auswirkungen künstlicher Beleuchtung sind vielfältig und abhängig von der Organismengruppe und dem Lebensraum. Betroffen sind Raumnutzung, Nahrungsaufnahme, Fortpflanzung, Aktivität, allgemeine Physiologie sowie übergeordnet Artenzusammensetzung und vielfältige Abläufe in Ökosystemen (siehe Abbildung 4.1). Während einige Auswirkungen für ganze Organismengruppen ähnlich sind, zeigen sich bei anderen Aspekten artenspezifische Unterschiede. So unterscheidet sich beispielsweise zwischen verschiedenen Fischarten die Fähigkeit, einzelne Wellenlängen wahrzunehmen, deutlich. Doch wie der Vergleich verschiedener Fledermausarten zeigt, kann sich die Reaktion selbst bei gleicher Hellempfindung ändern: Einige Arten nutzen künstliches Licht zur Jagd, andere vermeiden beleuchtete Bereiche.

Für einige Organismen könnte Licht sogar Vorteile bringen. Allerdings ist zu bedenken, dass jegliche anthropomorphe Änderung in einem Ökosystem bedenklich und unerwünscht ist. Die Datenlage zur Wirkung künstlicher Außenbeleuchtung auf die Umwelt ist keineswegs vollständig und steht im Fokus aktueller Forschung. Vor allem fehlen klare Schwellenwerte zur Abschätzung, wie viel Licht verträglich ist. Basierend auf dem aktuellen Wissen fordert das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) dazu auf, nicht auf die aufwendige Erforschung populationsrelevanter Parameter und Schwellenwerte zu warten, sondern Lichtemissionen vorsorgeorientiert zu beurteilen, um denkbare Schäden zu vermeiden oder zu verringern [45].

Klarzustellen ist, dass es kein neutrales umweltfreundliches Licht gibt, auch wenn einige Wellenlängen einen geringeren ökologischen Einfluss haben als andere. Idealerweise bleiben Naturräume daher unbeleuchtet und Lichtemissionen werden so eng wie möglich begrenzt.

Bei der Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Licht darf nicht nur die Lichtausbeute der Lichtquelle eine Rolle spielen, sondern ebenso der Lichtanteil, der nicht unmittelbar der Wahrnehmung dient. Dieser kann durch eine auf die örtliche Situation angepasste Lichtstärkeverteilung reduziert werden. Der Einsatz künstlicher Beleuchtung muss auf seinen Nutzen überprüft werden, insbesondere bei Licht, das nicht für Verkehrssicherheit notwendig ist. Auch gibt es keine allgemeingültige Lösung für umweltschonende Beleuchtung, stattdessen müssen Lichtinstallationen an den Ort angepasst sein. Beleuchtung sollte daher mit entsprechendem Fachwissen geplant, installiert und überprüft werden. In einer interdisziplinären Zusammenarbeit von Biologen und Biologinnen, Lichttechnikern und Lichttechnikerinnen, Lichtplanern und -planerinnen sowie Stadtarchitekten und -architektinnen kann so der negative Einfluss von Beleuchtung verringert werden [11], in den meisten Fällen ohne eine Verschlechterung der visuellen Wahrnehmungsbedingungen. Beispiele für Leitfäden finden sich in Kapitel 6. In den folgenden Kapiteln wird ein Überblick für die im deutschsprachigen Raum relevanten Gruppen gegeben, wobei die Darstellungen im ständig wachsenden Erkenntnisstand nur Ausschnitt und Momentaufnahme sein können.

**Abbildung 2**

Prozesse, Beziehungen, Verhaltensweisen und Parameter in Organismen und Ökosystemen, die durch künstliche Beleuchtung beeinflusst werden. (Quelle: Annette Krop-Benesch)

3.1 Auswirkungen auf Insekten

Künstliche Beleuchtung wird aus verschiedenen Gründen als Faktor für den Rückgang von Insekten diskutiert [17, 46]. In der Tat zeigen Analysen Zusammenhänge zwischen der Helligkeit einer Region und dem Rückgang verschiedener Insektengruppen [47–49]. Im Rahmen eines Feldversuches mit experimenteller mehrfarbiger LED-Beleuchtung fand sich ein Rückgang von 14 Prozent in der Populationsgröße von Großschmetterlingen [50]. Eine weitere Studie fand an Straßenrändern eine Reduktion der Nachfalterraupenpopulation von 52 Prozent unter LED-Beleuchtung und 41 Prozent unter Natriumdampfhochdruck-Beleuchtung (Natrium-Hochdruck) [49]. Für die Ursachen dieses Rückgangs gibt es mehrere Erklärungsansätze, zum einen die Anziehung durch Lichtquellen, zum anderen eine Vielzahl physiologischer Auswirkungen, die noch nicht vollständig geklärt sind [51, 52].

3.1.1 Anlockwirkung durch Lichtquellen

Allgemein bekannt ist das Phänomen, dass Insekten nachts künstliche Lichtquellen umschwirren. Die Attraktivität von Licht ist so stark, dass sich der Begriff Staubsaugereffekt etabliert hat. Eine Studie ergab für Nachtfalter einen Attraktionsradius von etwa 23 Metern, womit beleuchtete Straßenzüge zu einer unüberwindbaren Barriere für Insekten

werden könnten [53]. Noch unklar ist, welcher Mechanismus diesem Verhalten zugrunde liegt. Außerdem gibt es zwischen den verschiedenen Insektengruppen Unterschiede in der Wirkung von Licht [54–58]. Zu den am häufigsten gefangenen Insektenordnungen gehörten Diptera (Mücken und Fliegen), Lepidoptera (Schmetterlinge und Nachtfalter), Hymenoptera (Bienen, Wespen und Ameisen), Coleoptera (Käfer), Trichoptera (Köcherfliegen) und Hemiptera (Wanzen) [54, 56–63].

Die Auswirkungen des sogenannten »Staubsaugereffekts« auf Insekten sind vielfältig. Viele der angezogenen Insekten sterben direkt durch Hitzeeinwirkung an der Leuchte. Andere Insekten dringen ins Gehäuse ein, wo sie verenden. Im Lichtkegel sind Insekten zudem anfälliger für Beutegreifer wie Spinnen und Fledermäuse. So fehlen bei vielen Motten die typischen Ausweichmanöver, wenn sich eine Fledermaus nähert [64]. Insekten, die dem Lichtkegel entkommen, ruhen oft auf dem Boden, wo sie ebenfalls Beutegreifern zum Opfer fallen.

Verschiedene Studien untersuchten die Attraktivität unterschiedlicher elektrischer Lichtquellen, mit teilweise abweichenden Ergebnissen. Die Studien unterscheiden sich in den lichttechnischen Gegebenheiten (Art der Lichtquelle, Lichtstrom, Leuchtenform, Messmethode) sowie dem Untersuchungsgebiet und damit der lokalen Artenzusammensetzung. Ein Vergleich der Studien ist daher schwierig, weshalb hier nur ein Überblick über die Studienlage gegeben wird.

Eine britische Studie fand die höchste Attraktivität einer Wolframglühlampe, gefolgt von einer Quecksilberdampflampe. Signifikant weniger attraktiv waren LEDs mit 5.000 K und 2.700 K [59].

Eine US-amerikanischen Studie bestätigte, dass handelsübliche Glühlampen die höchste Attraktivität, gefolgt von Halogenglühlampen und Kompaktleuchtstofflampen besitzen. Die niedrigste Attraktivität wiesen auch hier LEDs mit 5.000 K und 3.000 K auf. Der Unterschied zwischen Glühlampen und Halogenlampen/Kompaktleuchtstofflampen bzw. Halogenlampen/Kompaktleuchtstofflampen und LEDs war jedoch nicht statistisch signifikant [60].

Eine Tiroler Studie fand die höchste Attraktivität bei Metallhalogenlampen, gefolgt von Natriumdampfhochdrucklampen. Die LED-Leuchten zogen am wenigsten Insekten an, wobei 6.000 K attraktiver waren als 3.000 K [56].

Auch eine deutsche Studie fand die höchste Attraktivität bei Quecksilberdampflampen, Metallhalogenlampen und Leuchtstoffröhren, gefolgt von Natriumdampflampen. LEDs mit 6.500 K und 3.000 K waren am wenigsten attraktiv [54].

In einer österreichischen Studie waren die Metaldampflampen um ein dreifaches attraktiver als 4.500 K-LEDs [62].

In einer spanischen Studie waren Quecksilberdampflampen signifikant attraktiver als 5.000 K-LEDs [61].

Eine niederländische Studie fand die höchste Attraktivität für Quecksilberdampf lampen, gefolgt von Metallhalogen- und Induktionslampen. Natriumdampfniederdrucklampen waren weniger attraktiv, die geringste Attraktivität hatte eine Phosphor-LED [63].

Eine britische Studie fand für Nachtfalter eine höhere Attraktivität von Metaldampflampen als von Natriumdampfhochdrucklampen [55].

In einer niederländischen Studie waren die Metaldampflampen signifikant am attraktivsten. Die 4.250 K-LED fing signifikant mehr Insekten als die Natriumdampfhochdrucklampen [57].

In einer neuseeländischen Studie zog eine 4.000 K-LED 48 Prozent mehr Insekten an als eine Natriumdampfhochdrucklampe [65].

In einer US-amerikanischen Studie waren Kompaktleuchtstofflampen attraktiver als LEDs mit 3.500 K und 2.700 K; für Dipteren waren Kompaktleuchtstofflampen und 3.500 K-LEDs jedoch gleichermaßen attraktiv. In dieser Studie zeigten sich auch Unterschiede zwischen LEDs mit gleicher Farbtemperatur aber unterschiedlichem Blauanteil: je geringer der Blauanteil, desto geringer die Attraktivität [58].

In einem schweizerischen Wohngebiet am Waldrand wurde zwischen LEDs mit 6500 K und 2700 K kein Unterschied in der Menge der gefangenen Insekten gefunden [66]. In einer Folgestudie wurden jedoch signifikant weniger Insekten an den 1750 K-LEDs gefangen als an den 4.000 K-beziehungsweise 3.000 K-LEDs [67].

Als Grund für die hohe Attraktivität von Metallhalogen- und Quecksilberdampflampen wird die Empfindlichkeit der meisten Insekten für UV-Strahlung beziehungsweise der hohe kurzwellige Anteil (blau) vermutet [54, 56, 57, 59, 61, 63]. Das könnte erklären, warum Natriumlampen und LEDs weniger Insekten anziehen. Glühlampen sind auch ohne UV-Emission attraktiv für manche Insektengruppen. Dies könnte an der abgegebenen Wärme liegen, da viele Dipteren warmblütige Wirte stechen [59, 60].

Einige Studien verglichen die Lichtfarbe ähnlicher Lichtquellen. Dabei ist zu bedenken, dass die ähnlichste Farbtemperatur (CCT) nur sehr bedingt die Spektralverteilung widerspiegelt, weshalb eine Angabe des jeweils verwendeten Spektrums oder der Peakwellenlängen² zu bevorzugen ist. In einem Vergleich mit Leuchtstofflampen unterschiedlicher Peakwellenlängen wurden die Lampen mit sinkender Peakwellenlänge attraktiver für Nachtfalter, ebenso stieg die Zahl unterschiedlicher Schmetterlingsfamilien mit sinkender Peakwellenlänge [68]. Auch ein Laborversuch an Nachtfaltern zeigte eine Präferenz für die Strahlung einer UV-haltigen LED, gefolgt vom Licht einer blauen LED [69].

Eine Studie an Eintagsfliegen, die während der Paarungszeit zu tausenden an Straßenleuchten in Wassernähe verenden, ergab ebenfalls Hinweise auf einen Zusammenhang mit der Peakwellenlänge. Dabei waren die blauen LEDs (Peak bei 432 nm) am attraktivsten, gefolgt von kaltweißen LEDs, Metallhalid-Lampen, warmweißen LEDs und Natrium-

2 Peakwellenlänge: Wellenlänge, bei der die spektrale Verteilung ihren höchsten Punkt erreicht

dampfhochdrucklampen. Natriumdampfniederdrucklampen- und PC-Amber-LEDs waren am wenigsten attraktiv. Blaue und grüne (Peak bei 513 nm) LEDs waren signifikant attraktiver als gelbe (Peak bei 599 nm), rote (Peak bei 659 nm) und tief-rote/Infrarot-LEDs (Peak bei 744 nm) [70].

Basierend auf bisherigen Studien wird empfohlen, auf UV-haltige Lichtquellen zu verzichten [57, 59, 69] und langwelliges Licht einzusetzen [55–57, 59, 69]. Dafür spricht auch eine Analyse der verfügbaren Aktionsspektren von Insekten [71]. Allerdings ist langwelliges Licht für einige Insektengruppen attraktiv. Einige Dipteren bevorzugen beispielsweise 2700 K-LEDs [58] und auch einige Käferarten wurden häufiger an Natriumdampflampen gefangen als an kurzwelligeren Lichtquellen [72]. Farbtemperatur und Peakwellenlänge sind daher nicht die einzigen relevanten Parameter.

Ein Grund für die geringe Attraktivität von LEDs wird in den Abstrahleigenschaften vermutet, da das Licht gezielter auf die Straße gerichtet ist als bei anderen Leuchten [54, 57, 61]. In der Tat zogen in einer Studie LED-Kofferleuchten mit 10°-Neigungswinkel signifikant mehr Insekten an als mit 0°-Neigungswinkel [62]. Auch eine weitere Studie zeigte, dass an LED-Straßenleuchten mit Diffusor ein Drittel mehr Insekten gefangen wurden als ohne Diffusor, unabhängig von der Farbtemperatur. Der Einfluss der Abstrahlgeometrie war dabei höher als der Einfluss der Farbtemperatur [67]. Des Weiteren gibt es Hinweise, dass die Attraktivität einer Lampe mit ihrer Helligkeit steigt [69, 73].

Die Ergebnisse der vorliegenden Studien lassen den Schluss zu, dass es kein »insektenfreundliches« Licht gibt. Auch wenn es Präferenzen für kurzwelliges Licht gibt, wirkt selbst langwelliges Licht noch attraktiv. Weitere Forschung zu Helligkeitsverteilung und Abstrahlgeometrie sind notwendig für eine aussagekräftigere Einschätzung der verschiedenen Einflüsse. Bis dahin sollte eine situationsgerechte Kombination aus möglichst geringer Helligkeit, gezielter Abstrahlgeometrie und niedrigem kurzwelligem Anteil gewählt werden.

3.1.2 Veränderungen auf physiologischer Ebene

Der Staubsaugereffekt ist jedoch nicht die einzige Auswirkung von künstlicher Beleuchtung. Künstliches Licht hat diverse langfristige Einflüsse auf die Physiologie von Insekten, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen, zudem selbst flugfähige Insekten den Großteil ihres Lebens als nicht-flugfähige Larven verbringen.

Eine britische Studie verglich die Häufigkeit von Schmetterlingsraupen an Straßenrändern, die seit mindestens fünf Jahren mit LEDs beziehungsweise Natriumdampfhochdrucklampen beleuchtet wurden. Unter LED-Licht wurden 52 Prozent und unter Natriumdampfhochdruck-Licht 41 Prozent weniger Raupen gefunden als an unbeleuchteten Straßenrändern. Die Raupen unter LED- und zum Teil unter Natriumdampfhochdruck-Licht waren schwerer als in unbeleuchteten Bereichen, was die Autoren als Stressreaktion werten [49]. Eine Laborstudie fand geringere Gewichte bei männlichen Raupen unter weißem LED-Licht (7 lx) als unter rotem LED-Licht oder bei Dunkelheit. Dennoch entwickelten sich diese Raupen schneller, ebenso wie Raupen unter grünem Licht [74].

Eine weitere Laborstudie fand niedrigere Gewichte sowohl bei Raupen, die mit Natriumdampfhochdrucklampen bei üblicher Straßenbeleuchtungsstärke (7-12 lx) beleuchtet wurden als auch bei Raupen, die im Dunklen gehalten, aber mit Gräsern von Natriumdampfhochdruck-beleuchteten Straßenrändern gefüttert wurden. Die Blätter dieser Gräser waren härter als Gräser aus unbeleuchteten Bereichen [42]. Auch adulte Nachtfalter können beeinflusst werden. In einer Feldstudie mit LED-Licht (15 lx) war die Nahrungsaufnahme in Abhängigkeit von der Lichtfarbe reduziert: Grünes Licht wirkte am stärksten (82 Prozent), gefolgt von weißem (72 Prozent) und rotem (63 Prozent) [75]. Jungtiere der australischen Feldgrille brauchten bei 1 lx etwa 14 Prozent mehr Zeit für ihre Entwicklung, die Weibchen waren bei der Paarung größer, die Männchen aber ab 10 lx kleiner [76].

Bei verschiedenen Insektenarten zeigten sich Auswirkungen auf die Fortpflanzung. In zwei Studien unterdrückte künstliche Beleuchtung die Aktivität von Nachtfaltern und es fanden weniger Paarungen statt. Im Labor wurden bei 17 lx weniger Pheromone für die Partnerfindung produziert [77, 78]. Einige Glühwürmchenarten veränderten ihre Leuchtsignale zur Partnerfindung in Gegenwart von Licht. Dabei reagieren einige Arten auf kurzweiliges, andere auf langweiliges Licht [79, 80]. Bei Feldgrillen zeigte sich im Labor, dass das Tag-Nacht-Muster für Fortbewegung und Zirpen bereits bei 2 lx abgeschwächt wird [81].

Nächtliche Beleuchtung von 9 bis 11 lx reduzierte bei Tiger Moskitos (*Aedes albopictus*) die Anzahl der Eier, die in eine winterliche Entwicklungspause (Diapause) eintraten [82]. Bei Fruchtfliegen kam es ab einer Beleuchtungsstärke von 1 lx zu einer Reduktion der Schlupfrate [83] und bei 5 lx zu Verschiebungen des Schlupfzeitpunktes [84].

3.2 Auswirkungen auf Spinnen

Ein häufiges Phänomen sind Spinnennetze an oder in der Nähe von Lichtquellen, was zu einer sichtbaren Verschmutzung der Leuchten und Gebäude führt. Dabei waren in zwei Studien Glühlampen attraktiver als Halogenleuchtungen, möglicherweise wegen der höheren Attraktivität letzterer auf Insekten [60, 85].

Künstliche Beleuchtung erhöhte in der Tat die Anzahl der Beutetiere und die Fangrate in Spinnennetzen [36, 38]. Eine Studie an nordamerikanischen Streckerspinnen in Gewässernähe ergab eine Gewichtszunahme bei Tieren unter nächtlicher warmweißer Beleuchtung [36]. Australische Radnetzspinnen erreichten bei kaltweißem Licht mit 20 lx schneller das fortpflanzungsfähige Alter. Sie waren aber kleiner als ihre Artgenossen im Dunklen und hatten weniger Nachkommen, die zudem früher starben [38].

Künstliche Beleuchtung erlaubt tagaktiven Spinnenarten ihre Jagdzeiten in die Nachtstunden auszudehnen. Damit wachsen der Feinddruck auf nachtaktive Beutetiere sowie der Konkurrenzdruck auf nachtaktive Spinnen. Auch sind nicht alle Spinnenarten gleichermaßen tolerant in Bezug auf Licht. In einer Untersuchung aus Brandenburg verschwanden lichtempfindliche Spinnenarten aus dem Bereich unterhalb der Leuchten und wurden durch tagaktive Arten ersetzt [35].

3.3 Auswirkungen auf Fische und aquatische Mikroorganismen

Der Einsatz von Lichtquellen in der Fischerei hat lange Tradition, da viele Fische, insbesondere große Arten, vom Licht angezogen werden. Auch Straßen- und Uferbeleuchtung haben einen Einfluss. So sammeln sich junge Lachse regelmäßig in beleuchteten Uferzonen. Statt wie nachts üblich am Boden des Gewässers zu ruhen, kommen sie zum Fressen an die Oberfläche. Werden Insekten von der Beleuchtung angezogen, profitieren die Lachse davon. Gleichzeitig besteht für sie aber auch eine stärkere Gefahr, selbst gefressen zu werden. Einige fischfressende Fische jagen bevorzugt in beleuchteten Gebieten, es finden sich dort aber auch oft tagaktive Graureiher und Robben, die die Jungfische fressen [86, 87]. Jungtiere des Atlantischen Lachses, die unter einer Beleuchtungsstärke von 1 lx schlüpften (erzeugt von wassernaher Beleuchtung), verließen den Ort des Schlüpfens bis zu zwei Tage später als ihre Artgenossen, die bei 0,1 lx schlüpften, und waren leichter. Der verlängerte Aufenthalt am Schlupfort erhöht die Gefahr, gefressen zu werden [88].

Europäische Aale hingegen scheinen beleuchtete Bereiche zu vermeiden. So wurden in Irland weniger Aale gefangen, wenn an einem Flussbereich die Beleuchtung eingeschaltet war [89]. In einem Versuch mit Strömungskanälen reichten bereits wenige Millilux aus, um sie von der Nutzung eines sonst sehr vorteilhaften Versuchskanals abzuhalten [90]. Es besteht also Grund zu der Annahme, dass beleuchtete Ufer und Brücken zu Verzögerungen bei den lebenswichtigen Fischwanderungen führen.

Künstliche Beleuchtung beeinflusst bei Fischen auch die Bildung von Melatonin und verschiedenen Geschlechtshormonen. Dabei gibt es starke Unterschiede in der Hellempfindlichkeit verschiedener Arten. Bei einigen Arten wurde bereits bei 1 lx eine signifikante Reduktion der Melatoninkonzentration festgestellt [7, 91–93]. Beim Flussbarsch reichten bereits 0,1 lx, um die Melatoninproduktion signifikant zu reduzieren [94].

Unterschiede wurden auch in der spektralen Empfindlichkeit festgestellt. Während bei einigen Arten das kurzwellige blaue Licht das Melatonin am stärksten unterdrückt, wirkt bei anderen Arten grünes oder rotes Licht deutlich stärker. Zu berücksichtigen ist, dass sich die spektrale Zusammensetzung des Lichtes je nach Wassertiefe und Salzgehalt eines Gewässers ändert [10].

Künstliche Beleuchtung beschleunigte im Laborversuch zudem bei einigen Fischarten die Entwicklung der Eier, bei anderen wurde sie verlangsamt [95]. Bei Clownfischen schlüpfte unter nächtlicher Beleuchtung von 27 lx kein einziger Fisch. Wurde das Licht dann nachts abgeschaltet, schlüpften Jungtiere aus 80 Prozent der Eier. Der hemmende Einfluss des Lichts konnte also aufgehoben werden [96].

Die Grundlage aller Nahrungsnetze sind Mikroorganismen. In Gewässern produziert Phytoplankton (Algen) tagsüber durch Photosynthese Kohlenstoffe. Nachts steigt Zooplankton aus den tieferen Gewässerschichten auf, frisst das Phytoplankton und verteilt so die Biomasse im gesamten Gewässer. Skyglow³ von benachbarten Städten ist jedoch stark

3 »Himmelsleuchten«: Aufhellung des Nachthimmels durch natürliche oder, wie in diesem Falle, künstliche Lichtquellen.

genug, um diese Wanderungen zu unterdrücken. Die möglichen Folgen sind Störungen im Nahrungsnetz und erhöhte Algendichte [97].

Eine Reduktion des Wachstums bei sesshaften Algen wurde unter Straßenbeleuchtung beziehungsweise bei in Feuchtgebieten häufig anzutreffender Helligkeit von 15 lx festgestellt [40, 98]. Uferbeleuchtung kann zudem zu Veränderungen und Verarmungen der Bakterienfauna im Gewässerboden führen und damit zu Konsequenzen für die CO₂-Bilanz des Gewässers führen [99].

3.4 Auswirkungen auf Amphibien

Die Gruppe der Amphibien beinhaltet eine Vielzahl bedrohter Arten und eine Reihe von Faktoren führt zu einem weltweiten Amphibiensterben. Inzwischen gibt es auch Studien, die einen negativen Einfluss künstlicher Beleuchtung auf Amphibien fanden.

Autoren einer australischen Studie führen das Anziehen von Insekten durch nächtliche Lichtquellen als möglichen Grund für eine erhöhte Nahrungsaufnahme bei der dort – und inzwischen auch in Europa – invasiven Aga-Kröte an. Dies war allerdings nur bei vereinzelt Lichtquellen in sonst weitgehend natürlich dunklen Bereichen der Fall. Bei erhöhter Helligkeit der Umgebung reduzierten die Kröten ihre Nahrungsaufnahme [100].

Nächtliche Beleuchtung mit 5 lx und mit 20 lx über 20 Tage führten bei Erdkröten zu einer Reduktion der nächtlichen Aktivität, nicht aber zu einer Reduktion des Energieumsatzes. Stattdessen war der Ruheumsatz der Erdkröten erhöht, was ein Zeichen von Stress sein kann [101]. Auf Stress deutet auch die Veränderung der Leukozytenzusammensetzung bei Schwarzkrötchen in einer Laborstudie mit 30 lx hin [102]. Junge Amerikanische Kröten, die als Kaulquappen unter circa 15 lx, einer in ihrem Lebensraum häufigen Beleuchtungsstärke, herangewachsen waren, waren aktiver als ihre Artgenossen unter natürlichen Bedingungen und zeigten nicht das arttypische Tag-Nacht-Muster [98].

Auch das Paarungsverhalten kann verändert werden. Das Licht einer 25-Watt-Gühlampe an der Decke führte dazu, dass weibliche Lidblasenfrösche seltener einen Partner wählten und diesen nach anderen Kriterien auswählten als in Dunkelheit [103]. Einige Froschmännchen verändern ihre Paarungsrufe. In einer Feldstudie riefen einige tropische Arten in der Nähe von Lichtmasten früher im Jahr, einige später. Bei einigen Arten verkürzte sich die Rufsaison, bei anderen verlängerte sie sich. Zweiminütige Halogen-Lichtpulse von etwa 60 lx führten zu einer vorübergehenden Reduzierung der Rufe [104].

Selbst nach der Partnerfindung kann es zu Veränderungen kommen. Bei Erdkröten brachen Männchen, die bei 0,1 lx und 5 lx mit 6.000 bis 6.500 K-LED-Licht beleuchtet wurden, häufiger die Paarung ab als Männchen bei 0,01 lx. Männchen bei 0,5 lx konnten zudem weniger Eier erfolgreich befruchten [105].

Bei Amerikanischen Kröten unter circa 15 lx verkürzte sich die Dauer der Metamorphose der Kaulquappen um 30 Prozent. Die jungen Kröten waren aktiver und wuchsen langsamer als die Jungkröten, die als Kaulquappen in natürlicher Dunkelheit gehalten worden waren [98].

3.5 Auswirkungen auf Vögel

Ähnlich wie Insekten zeigen Vögel eine starke Attraktion zu Licht. Zugvögel ziehen vor allem nachts und nutzen dabei eine Kombination aus Landmarken, Himmelslichtern und dem Magnetfeld der Erde. In den USA und Kanada kollidieren jährlich schätzungsweise 6,8 Millionen Vögel mit beleuchteten Funktürmen [106]. Auch Gebäudebeleuchtung erhöht die Wahrscheinlichkeit von Vogelschlag [107, 108]. Eine Untersuchung am Post Tower in Bonn ergab, dass mehr als 1.000 Vögel innerhalb eines Jahres durch den Turm ihre Orientierung verloren und viele davon starben [109]. Massive Auswirkungen zeigen sich beim World Trade Center Tribute in Light, das jeden September in Manhattan durchgeführt wird. Eine Untersuchung über sieben Jahre ergab, dass in den jeweils sieben Tagen der Installation insgesamt etwa 1,1 Millionen Vögel beeinflusst wurden. Vögel in einem Umkreis von 1,5 Kilometern und einer Flughöhe von 4 Kilometern änderten ihr Flugverhalten [110]. In einer Untersuchung an Ölplattformen wurden Vögel in einem Umkreis von 5 Kilometern angezogen [111]. Zwei Analysen des Vogelzugs im gesamten US-Gebiet ergaben, dass sich Zugvögel während der Zugzeit vermehrt in hell beleuchteten Gebieten aufhalten, während sie diese zur Brutzeit meiden [112, 113].

Wenn Vögel durch einen Lichtkegel abgelenkt werden, kann das verschiedene Konsequenzen haben. Die geblendeten Vögel können mit anderen Vögeln oder dem Gebäude kollidieren. Selbst wenn die Vögel den Kegel verlassen, was nicht selten erst nach Stunden geschieht, sind sie geschwächt und bleiben länger in Rastgebieten. Diese Rastgebiete liegen inzwischen gehäuft in der Nähe beleuchteter Städte. Die dortigen Ressourcen werden übermäßig belastet, mit Folgen für die dort heimischen Lebewesen [112].

Die Anziehungskraft von künstlichem Licht ist stärker in Nächten mit schlechten Sichtbedingungen (zum Beispiel Nebel, Wolkendecke). Dies liegt möglicherweise daran, dass weitere Orientierungspunkte fehlen [114, 115]. Grundsätzlich variiert die Attraktivität von Licht auf Vögel mit der Farbe des Lichts. Die Studie von Poot et al. fand, dass weißes und rotes Licht die stärkste Anziehungskraft auf Zugvögel hatten. Blaues Licht hatte den geringsten Einfluss, gefolgt von grünem Licht [111]. Drei andere Studien kamen jedoch zu dem Ergebnis, dass rotes Licht die wenigsten Vögel anzog: Eine Studie fand keinen Unterschied zwischen Dunkelheit und rotem Licht, verzeichnete aber hohe Rufaktivitäten von Zugvögeln bei grünem, blauem und weißem Licht [116]. Auch die zweite Studie fand kaum Unterschiede zwischen rotem Licht und Dunkelheit, aber eine erhöhte Anzahl bei grünem, blauem und weißem Licht. Die Wirkung von gelbem Licht hing von den Sichtbedingungen ab, zog aber weniger Vögel an als Grün, Blau und Weiß [115]. Beide Studien fanden zudem, dass blinkendes Licht egal welcher Farbe⁴ weniger Vögel anzog als kontinuierliches Licht [115, 116]. Die dritte Studie fand als Reihenfolge in der Attraktivität Rot (am wenigsten attraktiv), Gelb, Grün, Blau [114]. Wird das Licht abgeschaltet, lösen sich die Vogelschwärme schnell wieder auf [110, 114, 116].

Zu den ständigen Bewohnern der Küstenbereiche gehören die Watvögel, die bei Tag auf Nahrungssuche gehen. Zwei Studien konnten bisher zeigen, dass sowohl Straßenbeleuch-

4 Die einzige Ausnahme war rotes Licht, da sich selbst kontinuierliches rotes Licht kaum oder nicht mehr Vögel anzog als Dunkelheit.

tung sowie die Beleuchtung eines Industriekomplexes dazu führten, dass die Vögel länger auf Nahrungssuche gingen [117, 118]. Auch der Kaninchenkauz *Athene cunicularia* scheint in Argentinien Vorteile in der nächtlichen Beleuchtung zu finden: Er hält sich bevorzugt in der Nähe von Straßenleuchten auf, wo er durch das Licht mehr wirbellose Beutetiere findet. Auch die Nester liegen bevorzugt in der Nähe von Straßenleuchten [119].

Deutliche Veränderungen im Aktivitätsmuster zeigen sich bei Singvögeln. Amseln, Meisen und Buchfinken singen in beleuchteten Regionen deutlich früher, teilweise bereits in der Nacht [120, 121]. Eine Studie an Amseln fand Hinweise darauf, dass Stadtamseln einen genetisch bedingten früheren Tagesbeginn ihrer Aktivität (»Chronotyp«) haben als Landamseln [122]. Untersuchungen an freilebenden Kohlmeisen zeigten vermehrte Aktivität, reduzierten Schlaf und erhöhte Konzentrationen an Stresshormonen [123–128]. Sowohl bei Erwachsenen wie auch bei Jungtieren veränderten sich bei weißem LED-Licht mit 8,2 lx, 3,0 lx beziehungsweise 1,6 lx verschiedene Parameter in der Immunabwehr [129]. Bei Zebrafinken unter Laborbedingungen löste das Licht einer LED mit 5.000 K, nicht aber mit 3.000 K, bei 0,3 lx nächtliche Aktivität und einen Anstieg der Stresshormone in Zebrafinken aus [130]. Feldsperlinge unter 8 lx Quecksilberdampf-Beleuchtung waren aktiver und zeigten eine Verschiebung der Tagesrhythmik von Aktivität und Melatoninproduktion sowie eine Veränderung der Darmflora, die sich negativ auf den Gesamtzustand des Vogels auswirken kann [131].

Verschiedene Studien untersuchten die Wirkung künstlicher Beleuchtung auf die Produktion von Melatonin. Dabei gibt es Unterschiede in den verwendeten Lichtquellen und Beleuchtungsstärken. Möglicherweise gibt es artspezifische Schwellenwerte. Bei Amseln reichten bereits 0,3 lx einer Glühlampe aus, um die Melatoninproduktion um mehr als 30 Prozent zu senken. Bei Bajawebervögeln reichten 2 lx für eine Senkung um mehr als 50 Prozent, bei Kohlmeisen 5 lx für eine Senkung um 50 Prozent (3 lx bei Jungtieren) und bei Feldsperlingen 8 lx für eine Senkung um 70 Prozent. Diese Werte entsprechen realen Beleuchtungsstärken in urbanen Lebensräumen dieser Tiere. [7, 129, 131–134].

Auswirkungen zeigen sich auch auf die Brutzeiten. Einige Vogelarten, darunter Blaumeisen und Amseln, beginnen früher im Jahr mit der Brut [135–137]. Während bei einigen Vogelarten der Bruterfolg in beleuchteten Gebieten steigt, sinkt er bei anderen Arten [137]. Diese unterschiedlichen Reaktionen können zu Veränderungen der Artenzusammensetzung führen.

Drei Studien zeigten zudem Einflüsse nächtlicher Beleuchtung auf das Immunsystem. Freilebende Kohlmeisen waren bei weißem LED-Licht häufiger mit Vogel malaria infiziert als ihre Artgenossen unter rotem Licht oder in unbeleuchteten Bereichen [123]. Hausspatzen unter Laborbedingungen im Herbst zeigten bei 1.800 K und 5 lx eine stärkere Resistenz gegen West-Nil-Viren als Individuen der Kontrollgruppe. Ihre Artgenossen mit 3.000 K beziehungsweise 5.000 K bei 5 lx starben bereits bei geringerer Virenlast und zeigten unter 8 lx eine für die Ansteckung ausreichende Virenlast [138, 139].

3.6 Auswirkungen auf Säugetiere mit Ausnahme von Fledermäusen

Viele Kleinsäuger nutzen die Dunkelheit als Schutz vor Fressfeinden. In Vollmondnächten ist ihre Futtersuche oft reduziert, was zu kurzzeitigen Gewichtsverlusten führen kann. Das Licht einer Straßenleuchte kann ausreichen, um den Beginn der Nahrungssuche deutlich zu verzögern. Ebenso konnte es das regelmäßige Absinken der Körpertemperatur bei Mausmakis verhindern und die Konzentration von Stresshormonen bei Rötelmäusen erhöhen [140,141]. Bei Waldmäusen wurde innerhalb von zwei Jahren nach Einführung von LED-Straßenbeleuchtung mit maximal 8,2 lx in einem Naturbereich eine Reduktion der Aktivität beobachtet. 142 Rötelmäuse und Brandmäuse reduzierten in einer Studie unter 3.000 K bei 0,1 lx bis 36,8 lx ihre Aktivität am Tag und zeigten bei Nacht eine geringere Überlappung der Streifgebiete und der Aktivitätsphasen zwischen Individuen [143]. Kalifornische Kängururatten reduzierten die Nutzung von Futterstellen in einem Umkreis von 40 Metern um eine gelbe Quecksilberdampfampe mit 300 lm [144].

Vermeidungsverhalten zeigt sich auch bei Hirschen. Amerikanische Maultierhirsche reduzierten die Nutzung einer Straßenunterführung für Wildtiere bereits bei einer Beleuchtung von unter 1 lx [145]. In einer anderen Studie stieg die Nutzung beleuchteter urbaner Bereiche durch Maultierhirsche und allgemein deren Aktivität in der Nacht, solange die Umgebung nur geringfügig erhellt war, möglicherweise als Schutz vor Raubtieren wie Pumas. In hell erleuchteten Gebieten mieden die Hirsche jedoch stärker beleuchtete Bereiche [146]. Rehe im Stadtgebiet von Krakau, Polen, bevorzugten Gebiete mit wenig künstlicher Beleuchtung. Licht hatte einen stärkeren Einfluss als Lärm, Häuserdichte oder die Anzahl von Hunden [147].

Auch die Fortpflanzung ist betroffen. Bei Tammar Wallabys, einer Känguruart, verlängerte sich die Zeit der Geburten um mehrere Wochen, wobei der Zeitpunkt des besten Nahrungsangebots überschritten wird [148].

3.7 Auswirkungen auf Fledermäuse

Die Attraktivität von Lichtquellen auf Fledermäuse wird oft mit der Anwesenheit von Insekten begründet. In der Tat jagen schnell fliegende Arten wie Zwergfledermäuse und Abendsegler in unmittelbarer Nähe von Lichtquellen, langsam fliegende Arten wie die Teichfledermäuse und die Kleine Hufeisennase jedoch finden sich seltener in beleuchteten Bereichen, selbst wenn dort vermehrt Insekten zu finden sind [149–154].

Sollte die Anwesenheit von Insekten der Grund für die Attraktivität der Leuchten sein, wären Unterschiede zwischen den Lichtquellen zu erwarten, die mit deren Attraktivität für Insekten korrelieren. In der Tat fand eine britische Studie eine geringere Aktivität lichttoleranter Fledermausarten bei Natriumniederdruck-Straßenlampen im Vergleich zu Metallhalogenlampen [155]. Andere Studien fanden eine reduzierte Aktivität an LED-Straßenleuchten im Vergleich zu UV-emittierenden Leuchten [156–158]. In einem Feldversuch zeigte sich in weißem und grünem Licht erhöhte Jagdaktivität lichttoleranter Fledermäuse, während lichtscheue Arten dieses Licht mieden [150].

Auch der Lichtstrom und die Lichtstärkeverteilung spielen eine Rolle. Eine britische Untersuchung zeigte, dass lichttolerante Arten umso aktiver sind, umso heller die Natriumdampfhochdrucklampen (höherer Lichtstrom) waren. In derselben Studie zeigte sich, dass eine Umstellung auf LED-Straßenbeleuchtung die Aktivität dieser Arten bei geringeren Lichtströmen erhöhte, bei hohen Lichtströmen jedoch abnahm. Lichtscheue Arten fehlten im Untersuchungsgebiet selbst unter Natriumdampfhochdruck-Licht [159, 160]. Im Vergleich zu anderen Lichtfarben scheint rotes Licht jedoch von lichtempfindlichen Arten am besten toleriert zu werden [34, 150, 161].

Licht könnte für einige Arten auch unabhängig vom Jagdverhalten attraktiv sein. In einer Studie an ziehenden Fledermäusen in der Ostsee wurden grüne und rote Lichtquellen gleichermaßen oft angefliegen, ohne dass die Tiere dort jagten [162, 163]. Weißes Licht hatte keine Auswirkungen auf das Flugverhalten [163]. Möglicherweise reagieren Fledermäuse während des Zuges anders auf Licht, da sie auf ihrer Reise kaum Nahrung aufnehmen [162, 163]. Andererseits fliegen Wasserfledermäuse über beleuchtete Gewässer, jagen aber nicht im Licht [154, 164].

Keine der bisherigen Studien konnte einen Vorteil von künstlicher Beleuchtung für lichttolerante Fledermausarten nachweisen. Der »Vorteil« der Beleuchtung würde sich zudem auf die Jagd beschränken. Verschiedene Arten, selbst solche, die als lichttolerant bezeichnet werden, bevorzugen außerhalb der Jagdflüge dunkle Bereiche [149, 165, 166]. Licht, insbesondere wenn es größere oder langgestreckte Bereiche wie zum Beispiel eine Straße erhellt, kann zu einer Unterbrechung von Lebensräumen und zur Trennung von Populationen führen [152, 153]. Als Ursache wird oft Gefahr durch Feinde angenommen, es konnte jedoch gezeigt werden, dass helles Licht das Risiko von Kollisionen mit Gebäuden etcetera erhöht [21, 22].

Der Einfluss von Lichtquellen sinkt mit der Lichtstärke. Dabei können Leuchten das Verhalten von Fledermäusen in einem Umkreis von mehreren hundert Metern beeinflussen [157]. Schwellenwerte für die Anlockwirkung des Lichts sind sicher artspezifisch und abhängig von Faktoren wie Lichtspektrum, Tätigkeit (Jagd, Fortbewegung, saisonale Wanderungen) oder Baumbewuchs. Die Aktivität lichttoleranter Arten war in einem vorstädtischen Bereich bei 16,8 lx LED-Straßenlicht erhöht, während die Aktivität lichtsensitiver Arten reduziert war [167]. Andere Studien fanden bereits Auswirkungen bei 3,6 lx und bei weniger als 1 lx [152, 153]. Der direkte Einfluss von Straßenbeleuchtung wurde in bis zu 50 Meter Entfernung festgestellt. Lichtsensitive Arten finden sich aber grundsätzlich seltener in Gebieten mit Beleuchtung [153]. Während Lichtquellen mit hohem UV- und Blauanteil aufgrund ihrer Attraktivität für Insekten für einige Arten einen Jagdvorteil bieten, könnte damit bei Lichtquellen ohne UV-Emission der negative Einfluss des Lichts für alle Fledermausarten überwiegen.

Besonders problematisch ist die Beleuchtung von Gebäuden, die sich als Fledermausquartier eignen, da Fledermäuse beleuchtete Ausflughöhlen vermeiden [166, 168, 169]. Zwischen den 1980er Jahren und 2016 wurden in Schweden 14 von 24 Fledermauskolonien in Kirchen aufgegeben, nachdem die Kirchen beleuchtet wurden. Quartiere in unbeleuchteten Kirchen blieben bestehen [169]. Aufgrund des hohen Stoffwechsels müssen Fledermäuse jede Nacht jagen. Bereits eine Nacht mit Innenbeleuchtung kann zu tausenden

toten Fledermäusen führen [166]. In einem extremen Fall wurde die größte bekannte Wimpernfledermaus-Kolonie mit mehr als 1.000 Tieren aufgegeben [168]. Auch wenn die Quartiere bewohnt bleiben, kann es zu Beeinträchtigungen im Wachstum der Jungtiere kommen [168].

Inbetriebnahmen von neuen Beleuchtungsanlagen sollten daher ausschließlich im Winter oder zu Beginn des Frühjahrs geschehen, bevor sich Quartiere etablieren [166]. Wird ein Quartier aufgrund der Beleuchtung aufgegeben, liegt ein Verstoß gegen das Bundesnaturschutzgesetz vor. Im Sinne des Artenschutzes sollten als Fledermausquartiere geeignete Gebäude während der Flugperiode (Ende Februar bis Mitte Oktober) der Fledermäuse jedoch nur beleuchtet werden, wenn ausreichend unbeleuchtete Quartiere zur Verfügung stehen. Rotes Licht hat die geringste Hemmwirkung auf Flugbewegungen, unbeleuchtete Flugkorridore und Bäume können die negativen Auswirkungen künstlicher Beleuchtung mildern [34, 157]. Eine Reduktion der Beleuchtungsstärke ist nach heutigem Wissen nicht ausreichend, da negative Auswirkungen bereits bei sehr geringen Beleuchtungsstärken von wenigen Lux nachgewiesen wurden [34, 153]. Zu einem gewissen Grad können Bäume sowie partielle Aussparungen durch einen nicht beleuchteten Bereich Schutz vor Lichtemissionen bieten [157].

3.8 Auswirkungen auf Pflanzen

Licht ist für Pflanzen von enormer Wichtigkeit, da es nicht nur Entwicklung, Wachstum, Bewegung und Stoffwechsel steuert, sondern auch eine direkte Energiequelle ist. Obwohl der Einfluss von künstlichem Licht in der Pflanzenzucht große Bedeutung hat, erhielten die Auswirkungen von Außenbeleuchtung bisher nur wenig Aufmerksamkeit.

Mehrfach dokumentiert ist das Phänomen, dass Bäume in beleuchteten Regionen früher Knospen bilden und später ihre Blätter abwerfen. Der Unterschied kann bis zu drei Wochen betragen und bereits Beleuchtungsstärken von 10 lx reichen für diesen Effekt aus [170, 171]. Im Herbst ist das mitunter innerhalb eines Baumes sichtbar: Während fast alle Blätter abgeworfen sind, bleiben die Blätter neben der Straßenleuchte noch grün. Solches Verhalten erhöht das Risiko, bei Herbststürmen oder Frost Schäden zu erleiden.

Licht ist die Grundlage der Photosynthese, bei der blaues Licht von 400–500 Nanometer und rotes Licht von 600–700 Nanometer genutzt wird. Daher ist zu erwarten, dass eine Beleuchtung mit Natriumdampflampen sowie mit LEDs sowohl mit kurzwelliger wie auch langwelliger Emission (»Amber LED«) positiv für die Pflanze ist. In der Tat wuchs Mais unter Beleuchtung mit Natriumdampflampen schneller und bildete mehr Kolben aus [10]. Das Wachstum von Sojabohnen wurde durch Straßenbeleuchtung (Natriumdampflampen) grundsätzlich verzögert und die Ernte war geringer und von schlechterer Qualität [33]. Die zugrunde liegenden Prozesse sind noch nicht ausreichend erforscht. Vermutet wird jedoch ein verstärktes Wachstum durch zusätzliche Photosynthese in der Nacht, aber eine Störung des saisonalen Entwicklungsprozesses durch fehlende Änderung der Tageslänge.



Abbildung 3

Herbstbaum mit unterschiedlich fortgeschrittener Blattfärbung abhängig von der Position zur Quecksilberdampfleuchte. (Foto: Annette Krop-Benesch)

Nächtliche Dunkelheit wird auch zur Regeneration benötigt. So konnten Kleepflanzen bei einer nächtlichen Beleuchtung mit $0,6\text{--}1,1 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ⁵ die am Tage erlittenen Ozonschäden schlechter abbauen als Kleepflanzen ohne nächtliche Beleuchtung [172]. Bei koreanischen Straßenbäumen konnte Natriumdampfbeleuchtung bereits bei $1 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ zu einer Schädigung des Photosyntheseapparates und zum Absterben der Blätter führen [173].

Eine künstliche Beleuchtung stellt also eine messbare Belastung für Bäume dar und ist aus ökologischen Gründen als problematisch einzustufen.

⁵ Bestrahlungsstärke (irradiance), oft auch angegeben in W/m^2 . Die Übertragung in Lux ist abhängig vom Lichtspektrum. $1 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ Tageslicht entspricht 54 lx, $1 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ aus einer Natriumdampfhochdrucklampe entsprechen in etwa 82 lx.

4. Möglichkeiten zur Gestaltung

Neben den technischen Gegebenheiten müssen beim Betreiben von Außenbeleuchtung auch verschiedene rechtliche Bedingungen eingehalten werden. Licht wird im Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) § 3 Abs. 2 als Immission aufgeführt. Bereits jetzt gilt laut Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), dass schädliche Umweltauswirkungen einer Lichtanlage nach dem Stand der Technik auf ein Minimum zu begrenzen oder gänzlich zu vermeiden sind. In dessen Änderung vom 24.06.2021 wird eine Rechtsverordnung angekündigt, die konkrete Einschränkungen in der Gestaltung der Außenbeleuchtung beinhalten soll.

Oft werden bei einer Beleuchtungsplanung ausschließlich die lichttechnischen Gütekriterien für die zu beleuchtenden Flächen betrachtet und optimiert. Dadurch lässt sich die Umgebungswirkung jedoch nur indirekt und nicht umfassend beeinflussen. Für eine Minimierung der Störwirkung in die Umgebung müssen daher auch Kriterien für die Beleuchtung der angrenzenden Flächen und die Lichtabgabe in den umgebenden Raum formuliert werden. Eine erste unumgängliche Voraussetzung dafür ist die Berücksichtigung von Umweltwirkungen für Außenbeleuchtungsanlagen.

Für die Begrenzung der Störwirkungen künstlicher Beleuchtung in Umwelt und Naturräumen stehen prinzipiell verschiedene Gestaltungsansätze und Gestaltungsmittel zur Verfügung. Wie weit sie geeignet sind, muss in der Regel im Einzelfall entschieden werden. Es sind dies:

- Notwendigkeitsprüfung nicht sicherheitsrelevanter Außenbeleuchtung (zum Beispiel dekorative und gewerbliche Beleuchtung)
- Notwendigkeitsprüfung von Straßen- und Sicherheitsbeleuchtung und wenn nötig Einführung lichtunabhängiger verkehrssichernder Maßnahmen
- Adaptive Beleuchtung entsprechend der Nutzungsanforderung
- Zeitliche Begrenzung der nächtlichen Außenbeleuchtung unter Aufrechterhaltung von dunklen Kernstunden
- Räumliche Begrenzung der nächtlichen Außenbeleuchtung auf Nutzflächen (zum Beispiel Fahrbahn, Rad- und Fußweg)
- spektrale Gestaltung der nächtlichen Außenbeleuchtung (Optimierung hinsichtlich bedrohter lokaler Arten bei Vorliegen entsprechender Kenntnislagen).

Selbstverständlich sind Kombinationen der benannten Gestaltungen und darauf fußende zeitlich-räumlich variable Lösungen (adaptive Außenbeleuchtung) nicht nur möglich, sondern werden oft notwendig sein, um den vielfältigen Ansprüchen hinsichtlich Nutz- und Störwirkung der Beleuchtung gerecht werden zu können.

Besondere Beachtung sollte die Beleuchtung in ökologisch verwundbaren Bereichen wie in Gewässernähe oder in Naturschutzgebieten bekommen. Hier sollte nur beleuchtet werden, wenn es aus Sicherheitsgründen notwendig ist. Wasserflächen, Uferzonen und Vegetation sollten unbeleuchtet bleiben. Dies gilt auch für private Wasserflächen wie zum Beispiel Gartenteiche. Gebäudebeleuchtung wie beispielsweise Biergartenbeleuchtung sollte nur bei Bedarf eingeschaltet sein. Wo nötig, kann eine adaptive Beleuchtung zur Anwendung kommen. Dekorative und kommerzielle Beleuchtung sollten in diesen Gebieten grundsätzlich unterbleiben und werden nach dem neuen Bundesnaturschutzgesetz stark reguliert beziehungsweise ihre Neuerrichtung verboten.

Ziel sollte es darüber hinaus sein, die Beleuchtung der zu beleuchtenden Flächen unter Optimierung der visuellen Wahrnehmbarkeit für alle relevanten Nutzer zu minimieren. Dieses ist beispielsweise durch minimierte Blendung möglich. Oft wird damit auch die Störwirkung außerhalb der Nutzfläche reduziert. Diese Anlageneigenschaften können am stärksten durch eine diese Aspekte einschließende Beleuchtungsplanung beeinflusst werden. Die Einflussfaktoren müssen jedoch einer genaueren Betrachtung unterzogen werden. Daher bedarf jede Außenbeleuchtung einer professionellen, der Situation angepassten lichttechnischen und betrieblichen Planung.

Gestalterische Beleuchtung wie beispielsweise Anstrahlungen einschließlich der Beleuchtung von Privathäusern und -gärten sollte sinnvollerweise uhrzeitlich begrenzt betrieben werden. Eine Illuminierung mit vielen Strahlern und geringer Leistung direkt am Gebäude ist meistens nicht nur deutlich ansprechender als eine Anstrahlung mit einigen wenigen leistungsstarken Strahlern aus einer gewissen Distanz, sondern auch ökologisch verträglicher. Dabei ist eine Beleuchtung von oben oder aus der Waagerechten zu bevorzugen, in jedem Fall sollte sie auf die Gebäudeflächen begrenzt sein. In Zeiten der Vogelzüge und innerhalb der Zugrouten sollte möglichst ganz darauf verzichtet werden. Informationen über den aktuellen Vogelzug können die lokalen Vogelwarten geben. Gleiches gilt für Fledermausquartiere, da Fledermäuse nicht durch beleuchtete Bereiche fliegen.

Auch bei Funktionsflächen (Parkplätze, Industrieflächen, Sportanlagen und so weiter) sollte außerhalb der Nutzungszeiten ein Abschalten oder die Steuerung über Bewegungsmelder angestrebt werden.

Die konsequente Minimierung der Lichtabstrahlung in alle nicht die Verkehrsflächen betreffenden Richtungen hat den stärksten Einfluss auf alle Arten der Störwirkung. Wo kein Licht hin gelangt, muss auch kein Licht-Spektrum angepasst werden. Eine Anpassung des Spektrums ist immer nur für einzelne Tierarten oder Gruppen von Tierarten wirksam. Eine »Allgemeingültigkeit« gibt es dabei nicht. Dennoch ist eine Anpassung sinnvoll, um die am meisten vorkommenden Tierarten – die nachaktiven Insekten – hierbei besonders zu berücksichtigen.

Für die meisten Außenbeleuchtungsanlagen besteht aus Erwägungen der Nutzwirkung (Beleuchtungsziel) kein Anlass, das Lichtspektrum hinsichtlich der Farbwiedergabe zu optimieren. Hinsichtlich der Lichtfarbe bestehen dagegen oft Präferenzen. Für eine Gestaltung der spektralen Eigenschaften von Außenbeleuchtung unter Gesichtspunkten

des ökologischen Einflusses bestehen daher genügend Freiheiten. Eine umfassende Berücksichtigung aller oder auch nur vieler Einflüsse erscheint aufgrund der enormen Vielfalt der nächtlichen Tierwelt problematisch. In der Regel werden daher Schwerpunkte gesetzt werden müssen (zum Beispiel bestimmte Arten).

Bezüglich der Umweltwirkung spektraler Beleuchtungsmerkmale ist vieles heute noch unbekannt. Doch bisher zeigt sich, dass der ökologische Einfluss einer Lichtquelle, beispielsweise die Störwirkung, für die meisten Organismen mit Blauanteil und Farbtemperatur steigt [71]. Der Blauanteil im Spektrum wird bislang nicht gesondert dokumentiert. Als Indiz hierfür wird deshalb die Farbtemperatur herangezogen. Blauanteil und Farbtemperatur und damit beispielweise die Attraktivität für Insekten können jedoch merklich voneinander abweichen [58]. Dennoch gilt zurzeit: kaltweißes Licht mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von $T_a > 5.000$ K hat einen höheren Blauanteil als warmweißes Licht mit 3.000 K oder weniger. Soll Licht mit höherem Blauanteil verwendet werden, kann der absolute Blauanteil durch eine Reduktion des Lichtstroms reduziert werden.

5. Ausblick

Zuweilen wird »Nachhaltigkeit« gleichgesetzt mit Energieeffizienz. In dieser Schrift werden weitere Aspekte zur Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit aufgezeigt. Dabei müssen die Optimierung von Nutzwirkung und Effizienz sowie die Minimierung der Störwirkung bei nächtlicher Außenbeleuchtung keinesfalls einander entgegenstehen. Das Gegenteil kann der Fall sein. Dabei führt die alleinige Berücksichtigung einzelner Anlagenmerkmale jedoch zumeist nicht zum Ziel. So kann beispielsweise eine Beleuchtungsanlage mit den am stärksten abgeschirmten Leuchten weniger »energieeffizient« sein als eine Anlage mit weniger abgeschirmten, aber räumlich günstiger angeordneten Leuchten. Nur in einer Gesamtbetrachtung kann eine wirkliche »Nachhaltigkeit« ermittelt werden, die zudem vor allem als Entwicklungsrichtung aussagekräftig ist.

Obwohl bezüglich der vielfältigen Wirkungen von Außenbeleuchtung auf Lebewesen und Ökosysteme noch viele Fragen offen sind, existiert bereits ein fundiertes Grundwissen. Die Erkenntnisse können und sollten daher bei der Gestaltung von Außenbeleuchtungsanlagen berücksichtigt werden.

In der Praxis kann viel bewirkt werden, wenn Gestaltungs- und Betriebsansprüche an Außenbeleuchtungsanlagen zusätzlich zu den etablierten beleuchtungstechnischen Kriterien auch Anforderungen an die Umweltwirkung beinhalten. Anregungen und technische Mittel zur Planung, Umsetzung und Bewertung stehen jedenfalls zur Verfügung. Daher sind letztlich die Prioritäten entscheidend, die hier gesetzt werden.

Diese Schrift kann nicht vollständig sein. Das Wissen im angesprochenen Themenfeld wird wachsen. Die Möglichkeiten zur Minimierung von Umweltwirkungen werden umso stärker wachsen, desto stärker und klarer die Forderungen danach sind. Um diese Forderungen definieren zu können, ist Wissen über Umweltwirkungen von Licht im Außenraum erforderlich. Mit dieser Schrift leistet die LiTG einen Beitrag für eine qualifizierte Lichtplanung nach heutigem Stand des Wissens.

6. Weiterführende Literatur

- **Bundesimmissionsschutzgesetz** (BImSchG)
- **Bundesnaturschutzgesetz** (BNatSchG)
- **LiTG 12.3:** Empfehlungen für die Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen (2011)
- **Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag:** Lichtverschmutzung – Ausmaß, gesellschaftliche und ökologische Auswirkungen sowie Handlungsansätze (2020), <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab186.pdf>
- **Leitfaden zur Neugestaltung und Umrüstung von Außenbeleuchtungsanlagen**, herausgegeben vom Bundesamt für Naturschutz [174]
- **Österreichischer Leitfaden Außenbeleuchtung**, herausgegeben von den Landesumweltreferenten aller Bundesländer [175]
- **Empfehlungen zur Vermeidungen von Lichtemissionen**, Bundesamt für Umwelt BAFU, Schweiz
- **Richtlijn Lichthinder**, Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde [176]
- **Leitfaden »Gutes Licht« im Außenraum für das Großherzogtum Luxemburg**, herausgegeben vom Ministère du Développement durable et des Infrastructures [177]
- **National Light Pollution Guidelines for Wildlife Including Marine Turtles, Seabirds and Migratory Shorebirds**, herausgegeben vom Australian Department of the Environment and Energy [25]
- **DIN EN 13032-5:** Licht und Beleuchtung – Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten – Teil 5: Darstellung von Daten von Leuchten für den Einsatz in der Straßenbeleuchtung.

Literaturverzeichnis

- [1] Hölker, F.; Moss, T.; Griefahn, B.; Kloas, W., Voigt, C. C. (2010): The Dark Side of Light: A Transdisciplinary Research Agenda for Light. *Ecol. Soc.*, Vol. 15, Nr. 4, S. 13.
- [2] Kyba, C.C.M.; Hölker, F. (2013): Do artificially illuminated skies affect biodiversity in nocturnal landscapes? *Ecol. Soc.*, Vol. 28, Nr. 9, S. 1637–1640.
- [3] Gaston, K.J.; Davies, T. W.; Nedelec, S. L.; Holt, L. A. (2017): Impacts of Artificial Light at Night on Biological Timings. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, Vol. 48, Nr. 1, S. 49–68.
- [4] Sanders, D.; Frago, E.; Kehoe, R.; Patterson, C.; Gaston, K. J. (2021): A meta-analysis of biological impacts of artificial light at night. *Nat. Ecol. Evol.*, Vol. 5, S. 74–81.
- [5] Gaston, K.J., Duffy, J. P.; Gaston, S.; Bennie, J.; Davies, T. W. (2014): Human alteration of natural light cycles: causes and ecological consequences. *Oecologia*, Nr. 176, S. 917–931.
- [6] Gaston, K.J.; Bennie, J.; Davies, T. W.; Hopkins, J. (2013): The ecological impacts of nighttime light pollution: A mechanistic appraisal. *Biol. Rev.*, Vol. 88, Nr. 4, S. 912–927.
- [7] Grubisic, M.; Haim, A.; Bhusal, P.; Dominoni, D. M.; Gabriel, K. M. A.; Jechow, A.; Kupprat, F.; Lerner, A.; Marchant, P.; Riley, W.; Stebelova, K.; van Grunsven, R. H. A.; Zeman, M.; Zubidat, A. E.; Hölker, F. et al. (2019): Light Pollution, Circadian Photoreception, and Melatonin in Vertebrates. *Sustainability*, Vol. 11, Nr. 6400, S. 1–51.
- [8] Koen, E.L.; Minnaar, C.; Roever, C. L.; Boyles, J. G. (2018): Emerging threat of the 21st century lightscape to global biodiversity. *Glob. Chang. Biol.*, Vol. 24, Nr. 6, S. 1–10.
- [9] Ouyang, J.Q.; Davies, S.; Dominoni, D. (2018): Hormonally mediated effects of artificial light at night on behavior and fitness: Linking endocrine mechanisms with function. *J. Exp. Biol.*, Vol. 221, Nr. 6, S. 1–11.
- [10] Schroer, S.; Hölker, F. (2016): Impact of lighting on flora and fauna. In: *Handbook of Advanced Lighting Technology* (eds. Karlicek, R. et al.), S. 1–33, Springer Verlag. ISBN 978-3-319-00177-7.
- [11] Pérez Vega, C., Zielinska-Dabkowska, K. M.; Hölker, F. (2021): Urban Lighting Research Transdisciplinary Framework — A Collaborative Process with Lighting Professionals. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol. 18, Nr. 624, S. 1–18.
- [12] Kronfeld-Schor, N.; Dominoni, D.; de la Iglesia, H.; Levy, O.; Herzog, E. D.; Dayan, T.; Helfrich-Forster, C. (2013): Chronobiology by moonlight. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, Vol. 280, Nr. 1765, S. 1–11.
- [13] Kyba C. C. M.; Hänel, A.; Hölker, F. (2014): Redefining efficiency for outdoor lighting. *Energy Environ Sci.*, Vol. 7, Nr. 6, S. 1806–1809.
- [14] Kyba, C. C. M.; Ruhtz, T.; Fischer, J.; Hölker, F. (2011): Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems. *PLoS One*, Vol. 6, Nr. 3.
- [15] Bennie J.; Davies, T. W.; Cruse, D.; Gaston, K. J. (2016): Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *J Ecol.*, Vol. 104, Nr. 3, S. 611–620.
- [16] Falcón J.; Torriglia, A.; Attia, D.; Viénot, F.; Gronfier, C.; Behar-Cohen, F.; Martinsons, C.; Hicks, D. (2020): Exposure to Artificial Light at Night and the Consequences for Flora, Fauna, and Ecosystems. *Front Neurosci.*, Vol. 14, November, S. 1–39.
- [17] Grubisic, M.; van Grunsven, R. H. A.; Kyba, C. C. M. M.; Manfrin, A., Hölker, F. (2018): Insect declines and agroecosystems: does light pollution matter? *Ann. Appl. Biol.*, Vol. 173, Nr. 2, S. 180–189.

- [18] Walker W.H.; Meléndez-Fernández, O. H.; Nelson, R. J.; Reiter, R. J. (2019): Global climate change and invariable photoperiods: A mismatch that jeopardizes animal fitness. *Ecol.Evol.*, Vol. 9, Nr. 17, S. 10044–10054.
- [19] Owens A.C.S.; Cochard, P.; Durrant, J.; Perkin, E.; Seymoure, B. (2020): Light pollution is a driver of insect declines. *Biol.Conserv.*, Vol. 241, January, 108259.
- [20] Grubisic M.; Van Grunsven R.H.A. (2021): Artificial light at night disrupts species interactions and changes insect communities. *Curr.Opin. Insect Sci.*, Vol. 47, S.136–141.
- [21] McGuire L.P.; Fenton M.B. (2010): Hitting the Wall: Light Affects the Obstacle Avoidance Ability of Free-Flying Little Brown Bats (*Myotis lucifugus*). *Acta Chiropterologica*, Vol. 12, Nr. 1, S. 247–250.
- [22] Orbach D.N.; Fenton B. (2010): Vision impairs the abilities of bats to avoid colliding with stationary obstacles. *PLoS One*, Vol. 5, Nr. 11.
- [23] Buchanan B.W. (2006): Observed and potential effects of artificial night lighting on anuran amphibians. In: *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* (eds. Rich C.; Longcore T.), S. 185–211. Island Press. ISBN: 1559631287.
- [24] Perkin, E.; Hölker, F.; Richardson, J. S.; Sadler, J. P.; Wolter, C.; Tockner, K. (2011): The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems: questions, challenges, and perspectives. *Ecosphere*, Vol. 2, Nr. 11, art122.
- [25] Pendoley K.; Bell, C.E; Surman, C.; Choi, J.; Rodriguez, A.; Chiaradia, A.; Bridger, G.; Carey, A.; Mitchell, A.; Wilson, P. (2020): National Light Pollution Guidelines for Wildlife Including Marine Turtles, Seabirds and Migratory Shorebirds. Australian Government – Department of the Environment and Energy. 107 S. <https://www.environment.gov.au/biodiversity/publications/national-light-pollution-guidelines-wildlife>.
- [26] Aschoff J. (1960): Exogenous and Endogenous Components in Circadian Rhythms. *Cold Spring Harb.Symp. Quant. Biol.*, 1960, S.11–21.
- [27] Navara, K. J.; Nelson, R. J. (2007): The dark side of light at night: Physiological, epidemiological, and ecological consequences. *J. Pineal Res.*, Vol. 43, Nr. 3, S. 215–224.
- [28] Sinz, R. (1978): Zeitstrukturen und organismische Regulation: chronophysiologische und psychophysiologische Untersuchungen zur dynamischen multioszillatorischen Funktionsordnung des Organismus. Akademie-Verlag.
- [29] Dawson, A., King, V. M., Bentley, G. E. & Ball, G. F. (2001): Photoperiodic control of seasonality in birds. *J. Biol. Rhythms*, Vol. 16, Nr. 4, S. 365–380.
- [30] Pévet P. (2003): Melatonin: From seasonal to circadian signal. *J.Neuroendocrinol.*, Vol. 15, Nr. 4, S. 422–426.
- [31] Hazlerigg, D. G.; Wagner, G. C. (2006): Seasonal photoperiodism in vertebrates: from coincidence to amplitude. *Trends Endocrinol. Metab.*, Vol. 17, Nr. 3, S. 83–91.
- [32] Schultz, T. F.; Kay, S. A. (2003): Circadian clocks in daily and seasonal control of development. *Science*, Vol. 301, Nr. 5631, S. 326–328.
- [33] Palmer, M.; Gibbons, R.; Bhagavathula, R.; Holshouser, D.; Davidson, D. (2017): Roadway Lighting’s impact on altering soybean growth: Volume 1. Civil Engineering Studies. Illinois Center for Transportation Series No. 17–014. 106 S. ISSN 0197-9191.
- [34] Voigt, C. C.; Azam, C.; Dekker, J.; Ferguson, J.; Fritze, M.; Gazaryan, S.; Hölker, F.; Jones, G.; Leader, N.; Lewanzik, D.; Limpens, H. J. G. A.; Mathews, F.; Rydell, J.; Schofield, H., Spoelstra, K.; Zgarnajster, M. (2019): Leitfaden für die Berücksichtigung von Fledermäusen bei Beleuchtungsprojekten. EUROBATS Publication Series 8, 67 S.

- [35] Manfrin, A.; Singer, G.; Larsen, S.; Weiß, N.; van Grunsven, 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. *Front. Environ. Sci.*, Vol. 5, S. 61.
- [36] Parkinson E.; Lawson, J.; Tiegs, S. D. (2020): Artificial light at night at the terrestrial-aquatic interface: Effects on predators and fluxes of insect prey. *PLoS One*, Vol. 15, Nr. 10 (October), S. 1–14.
- [37] Sullivan S.M.P.; Hossler, K.; Meyer, L. A. (2019): Artificial lighting at night alters aquatic-riparian invertebrate food webs. *Ecol. Appl.*, Vol. 29, Nr. 1.
- [38] Willmott, N. J.; Henneken, J.; Elgar, M. A.; Jones, T. M. (2019): Guiding lights: Foraging responses of juvenile nocturnal orb-web spiders to the presence of artificial light at night. *Ethology*, Vol. 125, Nr. 5, S. 289–297.
- [39] Davies, T. W.; Bennie, J.; Gaston, K. J. (2012): Street lighting changes the composition of invertebrate communities. *Biol. Lett.*, Vol. 8, Nr. 5, S. 764–767.
- [40] Grubisic M., van Grunsven, R. H. A.; Manfrin, A.; Monaghan, M. T.; Franz, H. (2018): A transition to white LED increases ecological impacts of nocturnal illumination on aquatic primary producers in a lowland agricultural drainage ditch. *Environmental Pollution*, Vol. 240, S. 630–638.
- [41] 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. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.*, Vol. 370, Nr. 1667, 20140131.
- [42] Grenis K.; Murphy S.M. (2019): Direct and indirect effects of light pollution on the performance of an herbivorous insect. *Insect Sci.*, Vol. 26, Nr. 4, S. 770–776.
- [43] 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. *Gobal Chang. Biol.*, Vol. 23 S. 697–707.
- [44] Knop, E.; Zoller, L.; Ryser, R.; Gerpe, C.; Hörler, M.; Fontaine, C. (2017): Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature*, Vol. 548, S. 206–209.
- [45] Schröter-Schlaack, C.; Schulte-Römer, N., Revermann, C. (2020): Lichtverschmutzung – Ausmaß, Gesellschaftliche Und Ökologische Auswirkungen Sowie Handlungsansätze. Bericht des Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. 200 S.
- [46] 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. *Ecol.Entomol.*, Vol. 40, Nr. 3, S. 187–198.
- [47] Wilson J.F.; Baker, D.; Cheney, J.; Cook, M.; Ellis, M.; Freestone, R.; Gardner, D.; Geen, G.; Hemming, R.; Hodggers, D.; Howarth, S.; Jupp, A.; Lowe, N.; Orridge, S.; Shaw, M.; Smith, B.; Turner, A.; Young, H. (2018): A role for artificial night-time lighting in long-term changes in populations of 100 widespread macro-moths in UK and Ireland: a citizen-science study. *J. Insect Conserv.*, Vol. 22, S. 189–196.
- [48] Van Langevelde F.; Braamburg-Annegarn, M.; Huigens, M. E.; Groendijk, R.; Poitevin, O.; van Jurrien Deijk, R.; Ellis, W. N.; van Grunsven, R. H. A.; de Vos, R.; Vos, R. A.; Franzén, M.; WallisDeVries, M. F. (2017): Declines in moth populations stress the need for conserving dark nights. *Glob. Chang. Biol.*, Vol. 24, August, S. 925–932.
- [49] Boyes D.H.; Evans, D. M.; Fox, R.; Parsons, M. S.; Pocock, M. J. O. (2021): Street lighting has detrimental impacts on local insect populations. *Sci. Adv.*, Vol. 7, eabi8322.

- [50] van Grunsven R.H.A.; van Deijk, J. R.; Donners, M.; Berendse, F.; Visser, M. E.; Veenendaal, E.; Spoelstra, Kamiel (2020): Experimental light at night has a negative long-term impact on macro-moth populations. *Curr. Biol.*, Vol. 30, Nr. 12, S. R694–R695.
- [51] Boyes D.H.; Evans, D. M.; Fox, R.; Parsons, M. S.; Pocock, M. J. O. (2020): Is light pollution driving moth population declines? A review of causal mechanisms across the life cycle. *Insect Conserv. Divers.*, Vol. 14, Nr. 2.
- [52] Desouhant, E.; Gomes, E.; Mondy, N.; Amat, I. (2019): Mechanistic, ecological, and evolutionary consequences of artificial light at night for insects: review and prospective. *Entomol. Exp. Appl.*, Vol. 167, Nr. 1, S. 37–58.
- [53] Degen, T., Mitesser, O.; Perkin, E. K.; Weiß, N. S.; Oehlert, M.; Mattig, E.; Hölker, F. (2016): Street lighting: sex-independent impacts on moth movement. *J. Anim. Ecol.*, Vol. 85, Nr. 5, S. 1352–1360.
- [54] Eisenbeis, G.; Eick, K. (2011): Studie zur Anziehung nachtaktiver Insekten an die Straßenbeleuchtung unter Einbeziehung von LEDs. *Natur und Landschaft*, Vol. 86, Nr. 7, S. 298–306.
- [55] Somers-Yeates, R.; Hodgson, D.; McGregor, P. K.; Spalding, A.; Ffrench-Constant, R. H. (2013): Shedding light on moths: Shorter wavelengths attract noctuids more than geometrids. *Biol. Lett.*, Vol. 9, Nr. 4, 20130376.
- [56] Huemer, P.; Kühnreiter, H.; Tarmann, G. (2010): Anlockwirkung moderner Leuchtmittel auf nachtaktive Insekten: Ergebnisse einer Feldstudie in Tirol. *Tiroler Landesumweltanwaltschaft & Tiroler Landesmuseen Betriebsgesellschaft m.b.H.* 33 S.
- [57] Wakefield, A.; Broyles, M.; Stone, E. L.; Harris, S.; Jones, G. (2017) Quantifying the attractiveness of broad-spectrum street lights to aerial nocturnal insects. *J. Appl. Ecol.*, Vol. 55, Nr. 2, S. 714–722.
- [58] Longcore, T., Aldern, H. L.; Eggers, J. F.; Flores, S.; Franco, L.; Hirshfield-Yamanishi, E.; Petrinc, L. N.; Yan, W. A.; Barroso, A. M. (2015): Tuning the white light spectrum of light emitting diode lamps to reduce attraction of nocturnal arthropods. *Philos. Trans. R. Soc. B-Biological Sci.*, Vol. 370, Nr. 1667, 20140125.
- [59] Wakefield, A., Broyles, M.; Stone, E. L.; Jones, G.; Harris, S. (2016): Experimentally comparing the attractiveness of domestic lights to insects: Do LEDs attract fewer insects than conventional light types? *Ecol. Evol.*, Vol. 6, Nr. 22, S. 8028–8036.
- [60] 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. *Entomol. News*, Vol. 125, Nr. 5, S. 315–326.
- [61] Martín B.; Pérez, H., Ferrer, M. (2021): Emitting Diodes (LED): A Promising Street Light System to Reduce the Attraction to Light of Insects. *Diversity*, Vol. 13, Nr. 89
- [62] Soneira, M. (2013): Auswirkungen auf die Insekten-Fauna durch die Umrüstung von Kugelleuchten auf LED-Beleuchtungen. *Auftragsstudie der Stadt Wien.* 60 S.
- [63] van Grunsven R.H.A.; Donners, M.; Boekee, K.; Tichelaar, I.; van Geffen, K. G.; Groenendijk, D., Berendse, F.; Veenendaal, E. M. (2014): Spectral composition of light sources and insect phototaxis, with an evaluation of existing spectral response models. *J. Insect. Conserv.*, Vol. 18, Nr. 2, S. 225–231.
- [64] Wakefield, A.; Stone, E. L.; Jones, G.; Harris, S. (2015): Light-emitting diode street lights reduce last-ditch evasive manoeuvres by moths to bat echolocation calls. *R. Soc. Open Sci.*, Vol. 2, Nr. 8, 150291.
- [65] Pawson, S. M.; Bader, M. K. F. (2014): LED lighting increases the ecological impact of

- light pollution irrespective of color temperature. *Ecol. Appl.*, Vol. 24, Nr. 7, S. 1561–1568.
- [66] Bolliger J.; Hennes, T.; Wermelinger, B.; Blum, S.; Haller, J.; Obrist, M. K. (2020): Low impact of two LED colors on nocturnal insect abundance and bat activity in a peri-urban environment. *J. Insect Conserv.*, Vol. 24, Nr. 4, S. 625–635.
- [67] Haller J., Obrist, M.; Wermelinger, B.; Blum, S.; Bolliger, J. (2021): Einflüsse von Lichtfarben und Leuchtenformen auf nachtaktive Insekten und Fledermäuse. In: LICHT2021 – Konferenzband. S. 172–181. Deutsche Lichttechnische Gesellschaft.
- [68] van Langevelde F. F.; Ettema, J. A.; Donners, M.; Wallisdevries, M. F.; Groenendijk, D. (2011): Effect of spectral composition of artificial light on the attraction of moths. *Biol. Conserv.*, Vol. 144, Nr. 9, S. 2274–2281.
- [69] Brehm G.; Niermann, J.; Maria, L.; Nino, J.; Enseling, D.; Jüstel, T.; Axmacher, J. A. N. C.; Warrant, E.; Fiedler, K. (2021): Moths are strongly attracted to ultraviolet and blue radiation. *Insect Conserv. Divers.*, Vol. 14, Nr. 2, S. 188–198.
- [70] Mészáros Á., Kriska, G.; Egri, Á. (2021): Spectral optimization of beacon lights for the protection of night-swarming mayflies. *Insect Conserv. Divers.*, Vol. 14, Nr. 2, S. 225–234.
- [71] Longcore, T.; Rodríguez, A.; Witherington, B.; Penniman, J. F.; Herf, L.; Herf, M. (2018): Rapid assessment of lamp spectrum to quantify ecological effects of light at night. *J. Exp. Zool. Part A Ecol. Integr. Physiol.*, Vol. 329, Nr. 8–9, S. 511–521.
- [72] de Medeiros B.A.S.; Barghini, A.; Vanin, S. A. (2017): Streetlights attract a broad array of beetle species. *Rev. Bras. Entomol.*, Vol. 61, Nr. 1, S. 74–79.
- [73] Bolliger J.; Hennes, T.; Wermelinger, B.; Bösch, R.; Pazur, R.; Blum, S.; Haller, J.; Obrist, M. K. (2020): Effects of traffic-regulated street lighting on nocturnal insect abundance and bat activity. *Basic Appl. Ecol.*, Vol. 47, July, S. 44–56.
- [74] Van Geffen K.G.; van Grunsven, R. H. A.; van Ruijven, J.; Berendse, F.; Veenendaal, E. M. (2014): Artificial light at night causes diapause inhibition and sex-specific life history changes in a moth. *Ecol. Evol.*, Vol. 4, Nr. 11, S. 2082–2089. doi:10.1002/ece3.1090
- [75] van Langevelde F.; van Grunsven R.H.A.; Veenendaal E.M.; Fijen T.P.M. (2017): Artificial night lighting inhibits feeding in moths. *Biol. Lett.*, Vol. 13, Nr. 3, 20160874.
- [76] Durrant, J.; Botha, L. M.; Green, M. P.; Jones, T. M. (2018): Artificial light at night prolongs juvenile development time in the black field cricket, *Teleogryllus commodus*. *J. Exp. Zool. (Mol. Dev. Evol.)*, Vol. 330, Nr. 4, S. 225–233.
- [77] Van Geffen K.G.; Groot, A. T.; van Grunsven, R. H. A.; Donners, M.; Berendse, F.; Veenendaal, E. M. (2015): Artificial night lighting disrupts sex pheromone in a noctuid moth. *Ecol. Entomol.*, Vol. 40, Nr. 4, S. 401–408.
- [78] van Geffen, K. G.; van Eck, E.; de Boer, R. A.; van Grunsven, R. H. A.; Salis, L., Berendse, F.; Veenendaal, E. M. (2015): Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth. *Insect Conserv. Divers.*, Vol. 8, Nr. 3, S. 282–287.
- [79] Owens, A. C. S.; Meyer-Rochow, V. B.; Yang, E. (2018): Short- and mid-wavelength artificial light influences the flash signals of *Aquatica ficta* fireflies (Coleoptera: Lampyridae). *PlosOne*, Vol. 13, Nr. 2, S. 1–14.
- [80] Owens A.C.S.; Lewis S.M. (2021): Narrow-spectrum artificial light silences female fireflies (Coleoptera: Lampyridae). *Insect Conserv. Divers.*, Vol. 14, Nr. 2, S. 199–210.
- [81] Levy K.; Wegryzn, Y.; Efronny, R., Barnea, A.; Ayali, A. (2021): Lifelong exposure to artificial light at night impacts stridulation and locomotion activity patterns in the

- cricket *Gryllus bimaculatus*. Proc. R. Soc. B., Vol. 288, 20211626.
- [82] Westby K.M.; Medley K.A. (2020): Cold nights, city lights: Artificial light at night reduces photoperiodically induced diapause in urban and rural populations of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae). J. Med. Entomol., Vol. 57, Nr. 6, S. 1694–1699.
- [83] McLay L.K.; Green, M. P.; Jones, T. M. (2017): Chronic exposure to dim artificial light at night decreases fecundity and adult survival in *Drosophila melanogaster*. J. Insect Physiol., Vol. 100, S. 15–20
- [84] Thakurdas P.; Sharma, S.; Vanlalhriatpuia, K.; Sinam, B.; Chib, M.; Shivagaje, A.; Joshi, D. (2009): Light at night alters the parameters of the eclosion rhythm in a tropical fruit fly, *Drosophila jambulina*. Chronobiol Int. Vol. 26, Nr. 8, S.1575–1586.
- [85] Mammola, S.; Isaia, M.; Demonte, D.; Triolo, P.; Nervo, M. (2018): Artificial lighting triggers the presence of urban spiders and their webs on historical buildings. Landsc. Urban Plan., Vol. 180, September, S. 187–194.
- [86] Tabor, R. A.; Bell, A. T.C.; Lantz, D. W.; Gregersen, C. N.; Berge, H. B.; Hawkins, D. K. (2017): Phototactic behavior of subyearling salmonids in the nearshore area of two urban lakes in Western Washington state. Trans. Am. Fish. Soc., Vol. 146, Nr. 4, S. 753–761.
- [87] Yurk, H.; Trites, A. W. (2000): Experimental Attempts to Reduce Predation by Harbor Seals on Out-Migrating Juvenile Salmonids. Trans. Am. Fish. Soc., Vol. 129, S. 1360–1366.
- [88] 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. Freshw. Biol., Vol. 60, Nr. 5, S. 1016–1028.
- [89] Cullen P.; McCarthy T.K. (2000): The effects of artificial light on the distribution of catches of silver eel, *Anguilla anguilla* (L.), Across the Killaloe eel weir in the Lower River Shannon. Biol. Environ., Vol. 100, Nr. 3, S. 165–169.
- [90] Hadderingh, R. H.; van Aerssen, G.H.F.M.; De Beijer, R.F.L.J.; Van Der Velde, G. (1999): Reaction of silver eels to artificial light sources and water currents: An experimental deflection study. Regul. Rivers Res. Manag., Vol. 15, Nr. 4, S. 365–371.
- [91] Brüning, A. et al. (2016): Impact of different colours of artificial light at night on melatonin rhythm and gene expression of gonadotropins in European perch. Sci. Total Environ., Vol. 543, S. 214–222.
- [92] Brüning, A.; Hölker, F.; Franke, S.; Kleiner, W.; Kloas, W. (2018): Influence of artificially induced light pollution on the hormone system of two common fish species, perch and roach, in a rural habitat. Conserv. Physiol., Vol. 6, April, S. 1–12.
- [93] 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. Sci. Total Environ., Vol. 511, S. 516–522.
- [94] Kupprat F.; Hölker, F.; Kloas, W. (2020): Can skyglow reduce nocturnal melatonin concentrations in Eurasian perch? Environ Pollut., Vol. 262, 114324.
- [95] Brüning, A.; Hölker, F.; Wolter, C. (2011): Artificial light at night: Implications for early life stages development in four temperate freshwater fish species. Aquat. Sci., Vol. 73, S. 143–152.
- [96] Fobert, E. K.; Burke, K.; Swearer, S. E. (2019): Artificial light at night causes reproductive failure in clownfish. Biol. Lett., Vol. 15, 20190272.
- [97] Moore, M. V.; Pierce, S. M.; Walsh, H. M.; Kvalvik, S. K. Lim, J. D. et al. (2000): Urban light pollution alters the diel vertical migration of *Daphnia*. Int. Vereinigung für

- Theor. und Angew. Limnol. Verhandlungen, Vol. 27, Nr. 1–4, S. 779–782.
- [98] Dananay K.L.; Benard M.F. (2018): Artificial light at night decreases metamorphic duration and juvenile growth in a widespread amphibian. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, Vol. 285, Nr. 1882, S.1–7.
- [99] Hölker F.; Wurzbacher, C.; Weißenborn, C.; Monaghan, M. T.; Holzhauer, S. I. J.; Premke, Katrin (2015): Microbial diversity and community respiration in freshwater sediments influenced by artificial light at night. *Philos. Trans. R Soc. BBiol. Sci.*, Vol. 370, Nr. 1667, 20140130.
- [100] Komine H.; Koike, S.; Schwarzkopf, L. (2020): Impacts of artificial light on food intake in invasive toads. *Sci. Rep.*, Vol. 10, Nr. 1, S. 3–5.
- [101] Touzot M.; Teulier, L.; Lengagne, T.; Secondi, J.; Théry, M., Libourel, P. A.; Guillard, L.; Mondy, N. (2019): Artificial light at night disturbs the activity and energy allocation of the common toad during the breeding period. *Conserv. Physiol.*, Vol. 7, Nr. 1
- [102] Gastón M.S.; Pereyra, L. C.; Vaira, M. (2019): Artificial light at night and captivity induces differential effects on leukocyte profile, body condition, and erythrocyte size of a diurnal toad. *J. Exp. Zool. Part A Ecol. Integr. Physiol.*, Vol. 331, Nr. 2, S. 93–102.
- [103] Rand A. S. Bridarolli; M. E.; Dries L.; Ryan M. J.; (1997): Light levels influence female choice in Tungara frogs: Predation risk assessment? *Copeia*, Vol. 1997, Nr. 2, S. 447–450.
- [104] Dias, K. S.; Dosso, E. S.; Hall, A. S.; Schuch, A. P.; Tozetti, A. M. (2019): Ecological light pollution affects anuran calling season, daily calling period, and sensitivity to light in natural Brazilian wetlands. *Sci. Nat.*, Vol. 106, Nr. 7–8.
- [105] Touzot, M.; Lengagne, T.; Secondi, J.; Desouhant, E.; Théry, M.; Dumet, A.; Duchamp; C., Mondy, N. (2020): Artificial light at night alters the sexual behaviour and fertilisation success of the common toad. *Environ. Pollut.*, Vol. 259, 113883.
- [106] 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. *PLoS One*. Vol. 7, Nr. 4, e34025.
- [107] Loss, S.R.; Lao, S.; Eckles, J.W.; Anderson, A.W.; Blair, R.B.; Turner, R.J. (2019): Factors influencing bird-building collisions in the downtown area of a major North American city. *PLoS One*. Vol. 14, Nr. 11, S. 1–24.
- [108] Lao, S.; Loss, S.R.; Lao, S.; Eckles, J.W.; Anderson, A.W.; Blair, R.B.; Turner, R.J (2019): The influence of artificial night at night and polarized light on bird-building collisions. *Biol. Conserv.*, Vol. 241, July 2019, 108358.
- [109] Haupt, H. (2009): Der Letzte macht das Licht an! – Zu den Auswirkungen leuchtender Hochhäuser auf den nächtlichen Vogelzug am Beispiel des »Post-Towers« in Bonn. *Charadrius*, Vol. 45, Nr. 1, S. 1–19.
- [110] 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. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, Vol. 114, Nr. 42, S. 11175–11180.
- [111] Poot, H.; Ens, B. J.; Vries, H. De; Donners, M.; Wernand, M. R.; Marquenie, J. M. (2009): Green Light for Nocturnally Migrating Birds. *Ecol. Soc.*, Vol. 13, Nr. 2, S. 47.
- [112] McLaren, J. D.; Buler, J. J.; Schreckengost, T.; Smolinsky, J. A.; Boone, M.; van Loon, E.; Dawson, D.K.; Walters, E.L. (2018): Artificial light at night confounds broad-scale habitat use by migrating birds. *Ecol. Lett.*, Vol. 21, Nr. 3, S. 356–364.
- [113] La Sorte F. A.; Fink, D.; Buler, J. J.; Farnsworth, A.; Cabrera-Cruz, S. A. (2017): Seasonal

- associations with urban light pollution for nocturnally migrating bird populations. *Glob. Chang. Biol.*, Vol. 2017, Nr February, S. 1–11.
- [114] Zhao, X.; Zhang, M.; Che, X.; Zou, F. (2020): Blue light attracts nocturnally migrating birds. *Condor*, Vol. 122, Nr. 2008, S. 1–12.
- [115] Rebke, M.; Dierschke, V.; Weiner, C. N.; Aumüller, R.; Hill, K.; Hill, R. (2019): Attraction of nocturnally migrating birds to artificial light: The influence of colour, intensity and blinking mode under different cloud cover conditions. *Biol. Conserv.*, Vol. 233, June, S. 220–227.
- [116] Evans, W. R.; Akashi, Y.; Altman, N.S.; Manville, A.M. (2007): Response of night-migrating songbirds in cloud to colored and flashing light. *North Am. Birds*, Vol. 60, Nr. 4, S. 476–488.
- [117] 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. *Acta Oecologica*, Vol. 36, Nr. 2, S. 166–172.
- [118] 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. *J. Anim. Ecol.*, Vol. 82, Nr. 2, S. 478–485.
- [119] Rodríguez A et al. (2021): Artificial light at night as a driver of urban colonization by an avian predator. *Landsc. Ecol.*, Vol. 36, Nr. 1, S. 17–27.
- [120] Da Silva, A. (2015): Light pollution alters the phenology of dawn and dusk singing in common European songbirds. *Philos. Trans. R. Soc. London B Biol. Sci.*, Vol. 370, Nr. 1667, S. 1–9.
- [121] Russ, A.; Reitemeier, S.; Weissmann, A.; Gottschalk, J.; Einspanier, A.; Klenke, R. (2015): Seasonal and urban effects on the endocrinology of a wild passerine. *Ecol. Evol.*, Vol. 5, Nr. 23, S. 5698–5710.
- [122] Dominoni, D.; Helm, B.; Lehmann, M.; Dowse, H.B.; Partecke, J. (2017): Clocks for the city: Circadian differences between forest and city songbirds. *Proc. R. Soc. B. Biol. Sci.*, Vol. 280, Nr. 1763, S. 1–7.
- [123] Ouyang, J. Q.; de Jong, M.; van Grunsven, R. H. A.; Matson, K. D.; Hausmann, M. F.; Meerlo, P.; Visser, M. E.; Spoelstra, K. (2017): Restless roosts: Light pollution affects behavior, sleep, and physiology in a free-living songbird. *Glob. Chang. Biol.*, Vol. 23, Nr. 11, S. 4987–4994.
- [124] Ouyang, J.Q.; De Jong, M.; Hau, M.; Visser, M.E.; Van Grunsven, R.H.A.; Spoelstra, K. (2015): Stressful colours: Corticosterone concentrations in a free-living songbird vary with the spectral composition of experimental illumination. *Biol. Lett.*, Vol. 11, Nr. 8.
- [125] Raap T.; Pinxten, R.; Eens, M. (2018): Artificial light at night causes an unexpected increase in oxalate in developing male songbirds. *Conserv. Physiol.*, Vol. 6, February, S. 1–7.
- [126] Raap T.; Pinxten, R.; Eens, M. (2016): Artificial light at night disrupts sleep in female great tits (*Parus major*) during the nestling period, and is followed by a sleep rebound. *Environ.Pollut.*, Vol. 215, May, S.125–134.
- [127] Grunst M. L.; Raap, T.; Grunst, A. S.; Pinxten, R.; Parenteau, C.; Angelier, F.; Eens, M. (2020): Early-life exposure to artificial light at night elevates physiological stress in free-living songbirds. *Environ.Pollut.*, Vol. 259, Nr. 113895.
- [128] Raap T.; Casasole, G.; Pinxten, R.; Eens, M. (2016): Early life exposure to artificial light at night affects the physiological condition: An experimental study on the

- ecophysiology of free-living nestling songbirds. *Environ.Pollut.*, Vol. 218, August 2016, S. 909–914.
- [129] Ziegler A.K.; Watson, H.; Hegemann, A.; Meitern, R.; Canoine, V.; Nilsson, J.Å.; Isaksson, C. (2021): Exposure to artificial light at night alters innate immune response in wild great tit nestlings. *J. Exp. Biol.*, Vol. 224, Nr. 10.
- [130] Alaasam, V. J.; Sidher, A.; Ouyang, J.Q.; Duncan, R.; Seymoure, B.; Casagrande, S.; Zhang, Y.; Davies, S.; Shen, Y.; Sidher, A.; Seymoure, B.; Shen, Y.; Zhang, Y.; Ouyang, J.Q. (2018): Light at night disrupts nocturnal rest and elevates glucocorticoids at cool color temperatures. *J. Exp. Zool. Part A Ecol. Integr. Physiol.*, Vol. 329, Nr. 8–9, S. 465–472.
- [131] Jiang, J.; He, Y.; Kou, H.; Ju, Z.; Gao, X.; Zhao, H. (2020): The effects of artificial light at night on Eurasian tree sparrow (*Passer montanus*): Behavioral rhythm disruption, melatonin suppression and intestinal microbiota alterations. *Ecol. Indic.*, Vol. 108, January, 105702.
- [132] de Jong, M.; Jeninga, L.; Ouyang, J.Q.; van Oers, K.; Spoelstra, K.; Visser, M. E. (2016): Dose-dependent responses of avian daily rhythms to artificial light at night. *Physiol. Behav.*, Vol. 155, S. 172–179.
- [133] Dominoni D.M.; Goymann, W.; Helm, B.; Partecke, J. (2013): Urban-like night illumination reduces melatonin release in European blackbirds (*Turdus merula*): Implications of city life for biological time-keeping of songbirds. *Front Zool.*, Vol. 10, Nr. 60.
- [134] Kumar J.; Malik, S.; Bhardwaj, S. K.; Rani, S. (2018): Bright light at night alters the perception of daylength in Indian weaver bird (*Ploceus philippinus*). *J. Exp. Zool. Part A Ecol.Integr. Physiol.*, Vol. 329, Nr. 8–9, S. 488–496.
- [135] Dominoni D.; Goymann, W.; Helm, B.; Partecke, J. (2013): Artificial light at night advances avian reproductive physiology. *J. Exp. Zool. Part B Biol. Sci.*, Vol. 280, Nr. 1756, 20123017.
- [136] Kempnaers B.; Borgström, P.; Loës, P.; Schlicht, E.; Valcu, M.; Loe, P.; Kempnaers, B.; Borgstro, P.; Schlicht, E.; Valcu, M.; Borgström, P.; Loës, P.; Schlicht, E.; Valcu, M.; Loe, P.; Kempnaers, B.; Borgstro, P.; Schlicht, E.; Valcu, M.; Borgström, P.; Loës, P.; Schlicht, E.; Valcu, M. (2010): Artificial night lighting affects dawn song, extra-pair siring success, and lay date in songbirds. *Curr. Biol.*, Vol. 20, Nr. 19, S. 1735–1739.
- [137] Senzaki M.; Barber, J. R.; Phillips, J. N.; Carter, N. H.; Cooper, C. B.; Ditmer, M. A.; Fristrup, K. M.; McClure, C. J. W.; Mennitt, D. J.; Tyrrell, L. P.; Vukomanovic, J.; Wilson, A. A.; Francis, C. D. (2020): Sensory pollutants alter bird phenology and fitness across a continent. *Nature*, Vol. 587, Nr. 7835, S. 605–609.
- [138] Kernbach M. E.; Cassone, V. M.; Unnasch, T. R.; Martin, L. B. (2020): Broad-spectrum light pollution suppresses melatonin and increases West Nile virus-induced mortality in House Sparrows (*Passer domesticus*). *Condor*, Vol. 122, S. 1–13.
- [139] Kernbach M. E.; Newhouse, D. J.; Miller, J. M.; Hall, R. J.; Gibbons, J.; Oberstaller, J.; Selechnik, D.; Jiang, R. H. Y.; Unnasch, T. R.; Balakrishnan, C. N.; Martin, L. B. (2019): Light pollution increases West Nile virus competence of a ubiquitous passerine reservoir species. *Proc. R. Soc B Biol. Sci.*, Vol. 286, Nr. 1907, 20191051.
- [140] Le Tallec, T.; Perret, M.; Théry, M. (2013): Light pollution modifies the expression of daily rhythms and behavior patterns in a nocturnal primate. *PLoS One*, Vol. 8, Nr. 11, e79250.
- [141] Hoffmann, J.; Palme, R.; Eccard, J.A. (2018): A. Long-term dim light during nighttime

- changes activity patterns and space use in experimental small mammal populations. *Environ. Pollut.*, Vol. 238, S. 844–851.
- [142] 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. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, Vol. 370, Nr. 1667, 20140129.
- [143] Hoffmann J.; Schirmer, A.; Eccard, J. A. (2019): Light pollution affects space use and interaction of two small mammal species irrespective of personality. *BMC Ecol.*, Vol. 19, Nr. 1.
- [144] Zhang, F.S.; Wang, Y.; Wu, K.; Xu, W.Y.; Wu, J.; Liu, J.Y.; Wang, X.Y.; Shuai, L.Y. (2020): Effects of artificial light at night on foraging behavior and vigilance in a nocturnal rodent. *Sci. Total Environ.* Vol. 724, Nr. 114566.
- [145] Bliss-Ketchum, L.L.; de Rivera, C.E.; Turner, B.C.; Weisbaum, D.M. (2016): The effect of artificial light on wildlife use of a passage structure. *Biol.Conserv.*, Vol. 199, S. 25–28.
- [146] Ditmer, M. A.; Stoner, D. C.; Francis, C. D.; Barber, J. R.; Forester, J. D.; Choate, D.- M.; Ironside, K. E.; Longshore, K. M.; Hersey, K. R.; Larsen, R. T.; McMillan, B. R.; Olson, D. D.; Andreasen, A. M.; Beckmann, J. P.; Holton, P. B.; Messmer, T. A.; Carter, N. H. (2020): Artificial nightlight alters the predator–prey dynamics of an apex carnivore. *Ecography (Cop)*, Vol. 2020, S. 1–13.
- [147] Ciach M.; Fröhlich A. (2019): Ungulates in the city: light pollution and open habitats predict the probability of roe deer occurring in an urban environment. *Urban Ecosyst.*, Vol. 22, Nr. 3.
- [148] Robert, K. A.; Lesku, J. A.; Partecke, J.; Chambers, B. (2015): Artificial light at night desynchronizes strictly seasonal reproduction in a wild mammal. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, Vol. 282, Nr. 1816, 20151745.
- [149] 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. *Philos. Trans. R. Soc. B*, Vol. 370, 20140124.
- [150] 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. *Proc. R. Soc. London B Biol. Sci.*, Vol. 284, Nr. 1855, S. 11–15.
- [151] Kuijper, D. P. J.; Schut, J.; van Dullemen, D.; 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*). *Lutra*, Vo. 51, Nr. 1, S. 37–49.
- [152] Stone, E. L.; Jones, G.; Harris, S. (2012): Conserving energy at a cost to biodiversity? Impacts of LED lighting on bats. *Glob. Chang. Biol.*, Vol. 18, Nr. 8, S. 2458–2465.
- [153] Azam C.; Le Viol, I.; Bas, Y.; Zisis, G.; Vernet, A.; Julien, J.-F.; Kerbiriou, C. (2018): Evidence for distance and illuminance thresholds in the effects of artificial lighting on bat activity. *Landsc. Urban Plan.*, Vol. 175, February, 123–135.
- [154] Russo D.; Cosentino, F.; Festa, F.; De Benedetta, F.; Pejic, B.; Cerretti, P.; Ancillotto, L. (2019): Artificial illumination near rivers may alter bat-insect trophic interactions. *Environ.Pollut.*, Vol. 252, S. 1671–1677.
- [155] Stone, E. L.; Wakefield, A.; Harris, S.; Jones, G.; Stone, E. L. (2015): The impacts of new street light technologies : experimentally testing the effects on bats of changing

- from low-pressure sodium to white metal halide. *Philos. Trans. R. Soc. B*, Vol. 370, August, 20140127.
- [156] Lewanzik D.; Voigt C.C. (2017): Transition from conventional to light-emitting diode street lighting changes activity of urban bats. *Journal Appl Ecol.*, Vol. 54, S. 264–271.
- [157] Straka T. M.; Wolf, M.; Gras, P.; Buchholz, S.; Voigt, C. C. (2019): Tree cover mediates the effect of artificial light on urban bats. *Front Ecol.Evol.*, Vol. 7, March.
- [158] Haddock, J. K. (2019): Responses of insectivorous bats and nocturnal insects to local changes in street light technology. *Austral. Ecol.*, Vol. 44, Nr. 6, S. 1052–1064.
- [159] Kerbiriou C.; Barré, K.; Mariton, L.; Pauwels, J.; Zissis, G.; Robert, A.; Le Viol, I. (2020): Switching LPS to LED streetlight may dramatically reduce activity and foraging of bats. *Diversity*, Vol. 12, Nr. 4,
- [160] Rowse, E. G.; Harris, S.; Jones, G. (2016): The switch from low-pressure sodium to light emitting diodes does not affect bat activity at street lights. *PLoS One*. Vol. 11, Nr. 3.
- [161] Zeale M. R. K.; Stone, E. L.; Zeale, E.; Browne, W. J.; Harris, S.; Jones, G. (2018): Experimentally manipulating light spectra reveals the importance of dark corridors for commuting bats. *Glob. Chang. Biol.*, Vol. 24, Nr. 12, S. :5909–5918.
- [162] Voigt C. C.; Roeleke, M.; Marggraf, L.; Petersons, G.; Voigt-Heucke, S. L. (2017): Migratory bats respond to artificial green light with positive phototaxis. *PLoS One*. Vol. 12, Nr. 5, S. 1–11.
- [163] Voigt C. C.; Rehnig, K.; Lindecke, O.; Petersons, G. (2018): Migratory bats are attracted by red light but not by warm-white light: Implications for the protection of nocturnal migrants. *Ecol.Evol.*, Vol. 8, Nr. 18, S. 9353–9361.
- [164] Spoelstra, K.; Ramakers, J. J. C.; van Dis, N. E.; Visser, M. E. (2018): No effect of artificial light of different colors on commuting Daubenton's bats (*Myotis daubentonii*) in a choice experiment. *J. Exp. Zool. Part A Ecol.Integr. Physiol.*, Vol. 329, Nr. 8–9, S. 506–510.
- [165] 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. *Glob. Chang. Biol.*, Vol. 21, Nr. 7, S. 2467–2478.
- [166] Zeale, M. R. K.; Bennitt, E.; Newson, S. E.; Packman, C.; Browne, W. J.; Harris, S.; Jones, G.; Stone, E. (2016): Mitigating the impact of Bats in historic churches: The response of Natterer's Bats *Myotis nattereri* to artificial roosts and deterrence. *PLoS One*, Vol. 11, Nr. 1, S. 1–23.
- [167] Rowse, E. G.; Harris, S.; Jones, G. (2018): Effects of dimming light-emitting diode street lights on light-opportunistic and light-averse bats in suburban habitats. *R. Soc. Open Sci.*, Vol. 5, Nr. 6, 180205.
- [168] Boldogh, S.; Dobrosi, D.; Samu, P.; Oldogh, S. Á. B.; Obrosi, D. É. D.; Amu, P. É. S. (2007): The effects of the illumination of buildings on house-dwelling bats and its conservation consequences. *Acta Chiropterologica*, Vol. 9, Nr. 2, S. 527–534.
- [169] Rydell, J., Eklöf, J.; Sánchez-Navarro, S. (2017): Age of enlightenment: long-term effects of outdoor aesthetic lights on bats in churches. *R. Soc. Open Sci.*, Vol. 4, Nr. 8, 161077.
- [170] Matzke, E. B. (1936): The Effect of Street Lights in Delaying Leaf-Fall in Certain Trees. *Am. J. Bot.*, Vol. 23, Nr. 6, S. 446–452.
- [171] Massetti, L. (2018): Assessing the impact of street lighting on *Platanus x acerifolia* phenology. *Urban For. Urban Green.*, Vol. 34, S. 71–77.

- [172] Vollsnes, A. V.; Eriksen, A. B.; Otterholt, E.; Kvaal, K.; Oxaal, U.; Futsaether, C. M. (2009): Visible foliar injury and infrared imaging show that daylength affects short-term recovery after ozone stress in *Trifolium subterraneum*. *J. Exp. Bot.*, Vol. 60, Nr. 13, S. 3677–3686.
- [173] Kwak, M.; Je, S.; Cheng, H.; Seo, S.; Park, J.; Baek, S.; Khaine, I.; Lee, T.; Jang, J.; Li, Y.; Kim, H.; Lee, J.; Kim, J.; Woo, S. (2018): Night Light-Adaptation Strategies for Photosynthetic Apparatus in Yellow-Poplar (*Liriodendron tulipifera* L.) Exposed to Artificial Night Lighting. *Forests*, Vol. 9, Nr. 2, 74.
- [174] Schroer, S.; Huggins, B.; Böttcher, M.; Hölker, F. (2019): Leitfaden zur Neugestaltung und Umrüstung von Außenbeleuchtungsanlagen. Bundesamt für Naturschutz, BfN-Skripten Nr. 543. 97 S.
- [175] Landesumweltreferenten aller Bundesländer (2018): Österreichischer Leitfaden Außenbeleuchtung. 83 S.
- [176] Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde (2020): Richtlijn Lichthinder, 122 S.
- [177] Ministère du Développement durable et des Infrastructures Luxembourg (2018): Leitfaden »Gutes Licht« im Außenraum für das Großherzogtum Luxemburg, 92 S.

Impressum und Kontakt

Diese Publikation ist eine Veröffentlichung der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft e. V.

Autorin:

Dr. Dipl.-Biol. Annette Krop-Benesch, Berlin

Projektausschuss:

Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker, Berlin

Prof. Dipl.-Ing. Axel Stockmar, Celle

Dr.-Ing. Christoph Schulze, Dresden

Titelfoto: susden/Pixabay

Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (LiTG)

Danneckerstraße 16

10245 Berlin

Telefon +49 30 / 26 36 95 24

E-Mail info@litg.de

www.litg.de

1. Auflage, Januar 2023

ISBN 978-3-927787-71-1

Nachdruck, elektronische Vervielfältigung oder Weitergabe, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung der LiTG und mit Quellenangabe gestattet.

Die **Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (LiTG)** ist Deutschlands größte Community für Licht und Beleuchtung. Als dynamisches Netzwerk und Wissensplattform für alle Licht-Interessierten befasst sie sich mit »Licht und Beleuchtung« in den Bereichen Technik, Gestaltung, Planung und Anwendung in Theorie, Praxis und Forschung auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene.

Die **LiTG** geht zurück auf die 1912 gegründete Deutsche Beleuchtungstechnische Gesellschaft. Als eingetragener, gemeinnütziger und unabhängiger Verein mit Sitz in Berlin hat sie heute rund 2.100 Mitglieder. Sie verbindet u. a. Fachleute aus Wissenschaft, Forschung und Lehre, Ingenieurinnen und Techniker aus Entwicklung, Fertigung, Projektierung und Vertrieb, Angehörige aus Bundes- und Landesministerien sowie Kommunalverwaltungen, Licht-Affine aus Architektur und Innenarchitektur, Licht- und Elektroplanung, Handwerk, Produktdesign, Medizin und Kunst sowie Studierende aus diesen Bereichen. Zu ihren korporativen Mitgliedern zählen wissenschaftliche Institutionen, Fachverbände und Organisationen, Unternehmen aus allen Bereichen der Lichtindustrie, Stadtverwaltungen, Energieversorger, Architektur-, Ingenieur- und Lichtplanungsbüros.

Die **LiTG** steht interessierten Kreisen beratend zur Seite und bietet dazu ein lokal orientiertes, breitgefächertes Veranstaltungsprogramm aus Tagungen, Vorträgen, Diskussionen, Exkursionen und Besichtigungen, das über innovative lichttechnische Anwendungen, Entwicklungen, Produkte, Dienstleistungen und Forschungsvorhaben informiert und über gültige lichttechnische Vorschriften, Normen und Gesetze aufklärt.

Die **LiTG** beteiligt sich an der Erarbeitung nationaler und internationaler Normen und kooperiert dazu mit den maßgeblichen Fachorganisationen wie DIN, CEN, ISO, CIE sowie den internationalen lichttechnischen Gesellschaften. Seit 2015 unterhält sie ein eigenes Weiterbildungsprogramm auf der Basis des europäischen Bildungsstandards »European Lighting Expert (ELE)«.

Die **LiTG** erstellt allgemein verständliche Publikationen mit neuesten wissenschaftlichen und anwendungsbezogenen Erkenntnissen. Die fachliche Betreuung liegt beim TWA, der sich momentan in folgende elf Fachgebiete gliedert:

- Außenbeleuchtung
- Melanopische Lichtwirkungen
- Lichtplanung
- Fahrzeugbeleuchtung
- Farbe
- Innenbeleuchtung
- Licht – Gestaltung und Architektur
- Licht und Digitalisierung
- Messen, Bewerten und Berechnen
- Physiologie und Wahrnehmung
- Tageslicht

