

Gewässer unter künstlichem Licht – Auswirkungen von Licht verschiedener Wellenlängen auf die Phototaxis von Wasserinsekten

Waters under artificial light – Effects of light of different wavelengths on phototaxis of aquatic insects

Franz Hölker, Judith Kühne, Andreas Jechow, Marita Böttcher und Roy van Grunsven

Zusammenfassung

Es gibt zunehmend Hinweise darauf, dass künstliches Licht bei Nacht (artificial light at night – ALAN) zum Insektenrückgang beiträgt. Eine der auffälligsten Auswirkungen ist die Anziehung von Fluginsekten durch ALAN, wobei Lichtemissionen im kurzwelligen Bereich besonders anziehend wirken. Der Einfluss von ALAN auf Wasserinsekten, die entweder ihre Larvalphase oder ihren gesamten Lebenszyklus im Süßwasser verbringen, ist kaum erforscht. Hier fassen wir eine Studie zusammen, bei der wir die Reaktion aquatischer Insektenstadien auf verschiedene Lichtspektren und Leuchtdichten mit Unterwasserlichtfallen in einem Grabensystem untersuchten. Ähnlich wie bei fliegenden Insekten zeigte sich bei aquatischen Insektenstadien eine positive Phototaxis. Im Gegensatz zu fliegenden Stadien gibt es jedoch keine Präferenz für kurzwelliges Licht. Die Reaktion auf Wellenlängen im mittleren sichtbaren Bereich war für aquatische Lebensstadien aller untersuchten Ordnungen der Insekten signifikant. Dies ist offenbar eine Anpassung an die spektrale Lichtabschwächung in Binnengewässern, wobei diverse optische Komponenten kurzwelliges Licht abschwächen können. Insofern scheint eine Reduzierung der Emissionen im kurzwelligen Bereich, wie sie zum Schutz von Fluginsekten empfohlen wird, für aquatische Insektenstadien weniger zielführend. Hier dürften Schutzmaßnahmen wie eine Verbesserung der Abstrahlungsgeometrie oder die Verringerung von Lichtstrom und Beleuchtungsdauer wirksamer sein. Bei der Planung von Beleuchtungsanlagen in der Nähe von Binnengewässern müssen im Sinne des Naturschutzes die Reaktionen aller Organismen und Lebensstadien – aquatisch und terrestrisch – auf Licht verschiedener Wellenlängen berücksichtigt werden.

Lichtverschmutzung – Phototaxis – Invertebraten – Farbspektrum – künstliche Beleuchtung – aquatische Insektenstadien

Abstract

There is increasing evidence that artificial light at night (ALAN) contributes to insect decline. One of the most striking effects of this is the attraction of flying insects by ALAN, with light emissions at short wavelengths being particularly attractive. The impact of ALAN on aquatic insects that spend either their larval phase or their entire life cycle in freshwater is poorly understood. Here, we summarise a study in which we examined the response of aquatic insect stages to different light spectra and intensities using underwater light traps in a ditch system. Similar to flying insects, aquatic insect stages showed positive phototaxis. However, unlike flying stages, there is no clear preference for short wavelength light. The response to wavelengths in the mid-visible range was significant for the aquatic life stages of all insect orders studied. This is assumed to be an adaptation to spectral light attenuation in freshwater systems, with not only the water itself but also a variety of optical components jointly attenuating short wavelength light. Thus, reducing emissions in the short-wave range, as recommended for the protection of flying insects, appears to be less effective for aquatic insect stages. Protective measures such as better shielding or the reduction of luminous flux and illumination duration would be more promising. From a conservation perspective, the responses of all organisms and life stages – aquatic and terrestrial – to light of various wavelengths must be considered when planning lighting installations near inland waters.

Light pollution – Phototaxis – Invertebrates – Colour spectrum – Artificial light – Aquatic insect stages

Manuskripteinreichung: 5.3.2023, Annahme: 16.6.2023

DOI: 10.19217/NuL2023-09-03

1 Einleitung

In der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts nahm die weltweite künstliche Aufhellung des Nachthimmels jährlich um 3–6% zu (Hölker et al. 2010a). Zwischen 2011 und 2022 stieg die Zunahme der Aufhellung weltweit auf fast 10% pro Jahr (Kyba et al. 2023). Künstliches Licht tritt nun an Orten und zu Zeiten auf, an bzw. zu denen es unter natürlichen Bedingungen nicht vorkommen würde. Daher haben die Auswirkungen nächtlicher Beleuchtung auf Ökosysteme zunehmend an Aufmerksamkeit gewonnen (Longcore, Rich 2004; Hölker et al. 2010b, 2021; Gaston et al. 2015). Eine der auffälligsten ökologischen Auswirkungen künstlichen Lichts bei

Nacht (artificial light at night – ALAN) ist dessen Anziehungskraft auf nachtaktive Fluginsekten. In mehreren Studien wurde gezeigt, dass Lichtquellen mit hohen Emissionen bei kurzen Wellenlängen (ultraviolette Strahlung, blaues Licht) besonders viele Fluginsekten anziehen (Grubisic et al. 2018).

Adulte Wasserinsekten sind dabei möglicherweise anfälliger für die Auswirkungen der Lichtverschmutzung als terrestrisch lebende Insekten (Perkin et al. 2014; Manfrin et al. 2017). Bei den bisher untersuchten Wasserinsekten handelte es sich vorwiegend um flugfähige Entwicklungsstadien. Die Auswirkungen auf aquatische Insekten, die ihre Larvalphase (amphibiotische Insekten) oder ihren gesamten Lebenszyklus (voll aquatische Insekten) im Süßwasser



Abb. 1: Beispiel für eine mit einem roten Leuchtstab ausgestattete Falle: a) Schwimmfalle in einem der Gräben, b) aktivierte Falle bei Nacht. Die Folie um den oberen Teil des Leuchtstabs schützt Batterien und Schalter vor Feuchtigkeit. (Fotos: Andreas Jechow)

Fig. 1: Example of a trap equipped with a red light stick: a) floating trap in one of the ditches, b) activated trap at night. The plastic bags around the upper part of the light stick protect the batteries and the switch from moisture.

verbringen, sind allerdings unzureichend untersucht. Insbesondere bei amphibiologischen Insekten ändern sich die Lebensräume und damit auch die Lichtverhältnisse während ihrer Ontogenese weitgehend, was eine entsprechende Anpassung der Lichtwahrnehmung erfordert. Da die optischen Eigenschaften von Süßwasser (Beleuchtungsstärke, spektrale Verteilung) in Abhängigkeit von den Inhaltsstoffen stark variieren und sich von denen der Luft unterscheiden, haben sich aquatische und terrestrische Organismen und Lebensstadien in ihrer Farbwahrnehmung vermutlich evolutionär an die jeweilige Umgebung angepasst (Chou et al. 2020).

Künstliche Beleuchtung tritt überall dort auf, wo es Menschen gibt. Rund die Hälfte der menschlichen Bevölkerung lebt in einem Umkreis von 3 km um Binnengewässer (Kummu et al. 2011), so dass Letztere in besonderem Maße künstlichem Licht ausgesetzt sind. Die Auswirkungen sind bisher kaum erforscht (Jechow, Hölker 2019). Um jedoch Umweltauswirkungen auf Süßwasserökosysteme verringern zu können, müssen diese vorab verstanden werden. Optionen zur Minderung sind die Verbesserung der Abstrahlungsgeometrie (Lichtausrichtung, Abschirmung), die Reduzierung von Lichtstrom (bzw. Leuchtdichte) und Beleuchtungsdauer sowie die Anpassung der spektralen Verteilung (Lichtfarbe). Ein Schlüsselfaktor ist dabei die wellenlängenabhängige Reaktion der betroffenen Organismen. Untersucht wurde in dieser Studie daher die positive Phototaxis (Bewegung eines Organismus zu einer Lichtquelle) von Wasserinsekten auf ALAN bei verschiedenen Wellenlängen und Leuchtdichten. Hierfür wurden schwimmende Unterwasserlichtfallen eingesetzt. Verglichen wurden vier nahezu monochromatische Leuchtmittel (blau, grün, gelb und rot) bei zwei verschiedenen Leuchtdichten in einem Grabensystem in einer der dunkelsten Regionen Deutschlands. Dieser Beitrag basiert auf der Originalveröffentlichung Kühne et al. (2021) in „Integrative and Comparative Biology“ in gekürzter und veränderter Form.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Die Experimente wurden in zwei Entwässerungsgräben durchgeführt, die entlang von Grasland in der Nähe des Dorfs Lochow im Naturpark Westhavelland in Brandenburg, Deutschland, liegen (siehe auch Holzhauer et al. 2015). Das Gebiet gehört zu den dunkelsten Regionen Deutschlands und wurde von der International Dark-Sky Association als Dark Sky Reserve ausgewiesen (<http://www.darksky.org/idsp/reserves/westhavelland>).

2.2 Fallen und Lichtquellen

Die für die Versuche verwendeten Fallen, Lichtquellen, radio- und photometrischen Messmethoden sowie die Methode zur Messung und Berechnung der Wassertransparenz sind bei Kühne et al. (2021) detailliert beschrieben.

Die Fallen sind aus Acrylglas gefertigt und bestehen aus vier Zylindern, die in einem Quadrat angeordnet sind und oben und unten durch Platten zusammengehalten werden (siehe Abb. 1). Vier 5-mm-Eingangsschlitze ermöglichen Wasserorganismen, in die inneren Kammern zu gelangen. Sobald sie durch die engen Schlitze gelangt sind, ist es für sie schwierig, wieder zu entkommen. Vier Schaumstoff-Schwimmer sind an den Ecken der Fallen befestigt. Untersucht wurde Leuchtdioden(LED)-Licht in vier Farben (blau, grün, gelb und rot) mit Wellenlängen zwischen 450 nm und 650 nm. Zusammen decken diese einen großen Teil des für Wasserorganismen sichtbaren Spektrums ab (Abb. 2, S. 438). Die niedrigen Leuchtdichten betragen an der Lichtquelle $5,3 \pm 1,7 \text{ cd/m}^2$ ($\text{cd} = \text{Candela}$), die hohen Leuchtdichten $87 \pm 12 \text{ cd/m}^2$.

Ziel des Versuchsplans war es, einen annähernd gleichen (photopischen) Lichtstrom (bzw. eine annähernd gleiche Leuchtdichte) zu erzeugen. Dieser auf den Menschen ausgerichtete Ansatz wurde gewählt, weil ALAN primär der Verbesserung der menschlichen Sehleistung dient. Ein anderer Ansatz wäre, einen gleichen Photonfluss (in radiometrischen Einheiten) für aquatische Arten zu erzeugen. Da jedoch die Lichtabschwächung für jede Wellenlänge im Wasser unterschiedlich ist, würde dieser Ansatz nur zu einem gleichen Photonfluss direkt an der Quelle und entsprechend zu heterogenen Photonflüssen bei zunehmender Entfernung von der Quelle führen. Dies erschien weniger sinnvoll, da es Ziel sein sollte, mit dem auf den Menschen ausgerichteten Ansatz herauszufinden, welche Wellenlänge des Lichts bei gleicher Sichtbarkeit für den Menschen die geringste Auswirkung auf Wasserinsekten hat. Photometrische und radiometrische Angaben sind in Tab. 1, S. 438 aufgeführt.

2.3 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden in zwei Nächten im Mai 2017 (16./17. und 17./18.) und zwei Nächten im Juni 2017 (19./20. und 27./28.) durchgeführt. Wir verwendeten ein randomisiertes Blockdesign mit vier Blöcken (zwei pro Graben) sowie vier Farben (blau, grün, gelb, rot) und einer Kontrolle (unbeleuchtet) pro Block, was insgesamt 20 Fallen pro Nacht ergab. Die Fallen wurden in einem Abstand von 15 m aufgestellt, um Wechselwirkungen zwischen Fallen und

Lichtquellen zu vermeiden. Jede Nacht wurden die Fallen in den Gräben aufgestellt und die Lichtquellen eine halbe Stunde vor Sonnenuntergang eingeschaltet. Die Fallen wurden mit Seilen an den Ufern befestigt, um ein Abdriften zu verhindern. Sie wurden am nächsten Tag (innerhalb von ca. 3 h) geleert, beginnend bei Sonnenaufgang zwischen 5:00 Uhr und 5:30 Uhr, so dass die Fallen durchschnittlich ca. 10 h (9–12 h) im Wasser blieben. Beim Einsammeln der Fallen wurde ein Netz unter die Fallen gelegt, um zu verhindern, dass Organismen herausgespült werden. Alle Organismen, mit Ausnahme der Fische, wurden in 70 % Ethanol aufbewahrt und im Labor identifiziert und gezählt. Die Fische wurden identifiziert, gezählt und sofort freigelassen.

2.4 Statistische Analyse

Die Daten wurden mit R (Version 3.4.2; R Core Team 2017) unter Verwendung des Pakets lme4 (Bates et al. 2015) ausgewertet. Die Analyse wurde für die Effekte von Farbe, Leuchtdichte und/oder deren Interaktion schrittweise durchgeführt. Die Interaktion wurde nur getestet, wenn es einen Gesamteffekt von Licht gab. Zusätzlich zum vollständigen Datensatz wurden weitere Untergruppen von Organismen analysiert, wenn mehr als 250 Individuen erfasst wurden.

Generalisierte lineare gemischte Modelle (generalized linear mixed models, GLMM) mit negativer Binomialverteilung wurden folgenderweise modelliert: die Anzahl der Individuen als abhängige Variable, die Lichtverhältnisse (eine Kombination aus Farbe und Leuchtdichte, mit sieben Stufen) als fester Faktor sowie Block (mit vier Stufen) und Nacht (mit vier Stufen) als Zufallsfaktoren. Die Zufallsfaktoren Block und Nacht wurden entfernt, wenn sie nicht signifikant waren. Wenn die Behandlung einen signifikanten Effekt hatte ($p < 0,05$), wurde dieser mit Hilfe des Pakets lsmeans (Lenth 2016) mit der Kontrolle verglichen.

Die Auswirkungen von Farbe, Leuchtdichte und deren Interaktion wurden mit ähnlichen GLMM getestet, wobei Daten aus Kontrollfallen ausgeschlossen wurden. Wenn einer der festen Faktoren oder die Interaktion signifikant war, wurden paarweise Vergleiche mit lsmeans (Lenth 2016) unter Tukey-Korrektur für Mehrfachvergleiche durchgeführt.

Da Filterfolie (für gleichmäßige Lichtverhältnisse; bei Grün und Blau) nur für die Hälfte der Experimente zur Verfügung stand (Lieferprobleme), wurde eine Teilmenge, die nur Daten von Fallen mit Licht niedriger Leuchtdichte enthielt, allein auf die Wirkung der Farbe untersucht. Außerdem wurden die Daten von Fallen mit grünem oder blauem Licht separat analysiert, um die Wirkungen hoher und niedriger Leuchtdichte miteinander zu vergleichen.

3 Ergebnisse

3.1 Lichtabschwächung

Auf Grund der hohen Konzentration an farbigen gelösten organischen Stoffen (coloured dissolved organic matter, cDOM) im Wasser der Gräben war die Abschwächung von blauem Licht stärker als die anderer Wellenlängen. Rotes Licht wurde am wenigsten abgeschwächt, was typisch für cDOM-reiche Gewässer ist (Thrane et al. 2014). In 1 m Entfernung wurden z. B. noch 27 % des roten Lichts, aber nur 0,3 % des blauen Lichts durch die Wassersäule übertragen. Bei 2 m wurde fast das gesamte blaue Licht gedämpft, während etwa 7 % des roten Lichts noch übertragen wurden. In klarem Wasser, wie dies z. B. aus ozeanischen Gewässern beschrieben wird, wäre das genaue Gegenteil bei der Lichtabsorption in Abhängigkeit von der Wellenlänge zu beobachten. Bei Süßwassersystemen variieren die optischen Eigenschaften jedoch stark je nach Inhaltsstoffen (cDOM, Algen, ungelöste Partikel etc.; Thrane et al. 2014).

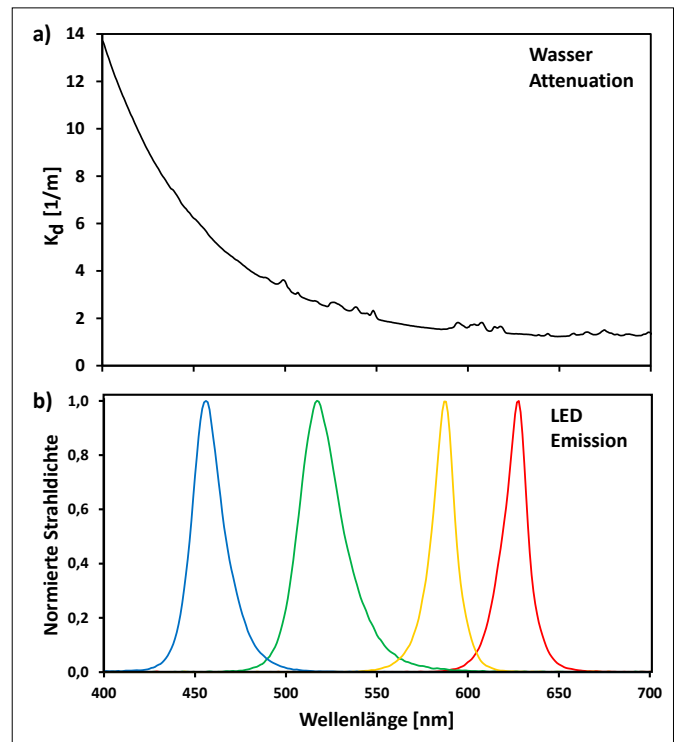


Abb. 2: a) Diffuser Attenuationskoeffizient K_d in Abhängigkeit von der Wellenlänge, gemessen mit einem Spektralphotometer im Labor in Wasserproben aus den Gräben. Der Attenuationskoeffizient misst die Abschwächung des Lichts, hat die Dimension einer inversen Strecke und wird in der Einheit 1/m angegeben. b) Normierte Spektren der Lichtquellen, von links nach rechts: blau, grün, gelb, rot. Quelle: verändert nach Kühne et al. (2021).

Fig. 2: a) Diffuse attenuation coefficient K_d as a function of wavelength measured with a spectrophotometer in the laboratory in water samples obtained at the ditches. The attenuation coefficient measures the attenuation of light, has the dimension of an inverse distance and is given in the unit 1/m. b) Normalised spectra of the light sources, from left to right: blue, green, yellow, red. Source: modified after Kühne et al. (2021).

Tab. 1: Peak-Wellenlängen, Halbwertsbreite (FWHM), Leuchtdichte und Strahlidichte der für die Experimente verwendeten Lichtquellen.

Table 1: Peak wavelengths, full width at half maximum (FWHM), luminance, and radiance of the light sources used for the experiments.

| Farbe | Peak-Wellenlänge; FWHM [nm] | Leuchtdichte [cd/m ²] | Strahlidichte [W/m ² ·sr] |
|-------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Blau | 455; 20 | 80 ± 5 (5,0 ± 0,5)* | 2,30 (0,15)* |
| Grün | 517; 26 | 95 ± 5 (6,5 ± 0,5)* | 0,220 (0,014)* |
| Gelb | 588; 14 | 6,5 ± 0,5 | 0,012 |
| Rot | 628; 14 | 4,0 ± 0,4 | 0,020 |

* Werte in Klammern gelten für Lichtstäbe mit zusätzlicher Graufilterfolie (6,6 % Transparenz).

FWHM = full width at half maximum (Halbwertsbreite), cd = Candela, sr = Steradian. Für weitere Erläuterungen zu den physikalischen Größen und Einheiten siehe Jechow, Hölker (2023) in dieser Ausgabe, S. 453 ff.

3.2 Auswirkungen auf aquatische Insekten

Insgesamt wurden 3.101 Organismen gefangen, von denen 64 % Insekten waren. Bei den übrigen Organismen handelte es sich v. a. um Fische (16 %), Wassermilben (8,5 %), Schnecken (5,5 %) und Krebstiere (5,2 %, hauptsächlich Cladocera). Die am häufigsten

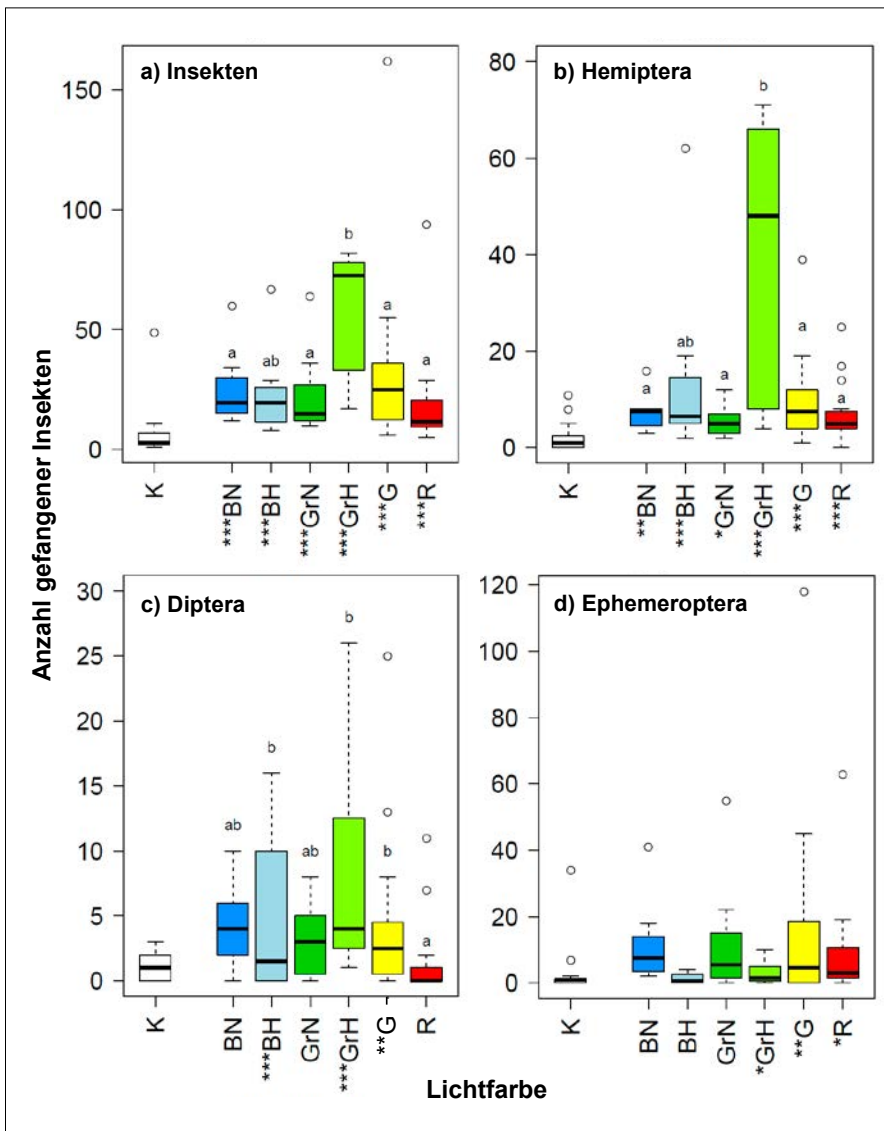


Abb. 3: Boxplots der Gesamtzahl der pro Behandlung gefangenen Individuen a) der Insekten, b) der Hemiptera (Schnabelkerfe), c) der Diptera (Zweiflügler) und d) der Ephemeroptera (Eintagsfliegen). Abkürzungen: K = Kontrolle, BN = blaues Licht niedriger Intensität, BH = blaues Licht hoher Intensität, GrN = grünes Licht niedriger Intensität, GrH = grünes Licht hoher Intensität, G = gelbes Licht, R = rotes Licht. Kleinbuchstaben bezeichnen die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche zwischen den Behandlungen (unter Verwendung der Funktion „pairs“ aus dem R-Paket lsmeans, Behandlungen mit denselben Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander) und Sternchen die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche jeder einzelnen Behandlung mit der Kontrolle (unter Verwendung der Funktion „contrast“ aus dem R-Paket lsmeans; statistische Signifikanzwerte: * = $p < 0,05$, ** = $p < 0,01$, *** = $p < 0,001$). Quelle: verändert nach Kühne et al. (2021).

Fig. 3: Boxplots of the total numbers of individuals of a) insects, b) Hemiptera, c) Diptera, and d) Ephemeroptera caught per treatment. Abbreviations: K = control, BN = blue light of low intensity, BH = blue light of high intensity, GrN = green light of low intensity, GrH = green light of high intensity, G = yellow light, R = red light. Lower case letters indicate results of the pairwise comparisons between treatments (using the “pairs” function from the R-package lsmeans, treatments with the same letters do not differ significantly) and asterisks indicate the results of the pairwise comparisons of each individual treatment versus control (using the “contrast” function from the R-package lsmeans; p-values for statistical significance: * = $p < 0,05$, ** = $p < 0,01$, *** = $p < 0,001$). Source: modified after Kühne et al. (2021).

vorkommenden Insektenordnungen waren Hemiptera (Schnabelkerfe; Nymphen und adulte Tiere), Ephemeroptera (Eintagsfliegen; nur Nymphen) und Diptera (Zweiflügler; nur Larven) (siehe Abb.3).

eine positive Phototaxis zeigen, was mit typischen Befunden für fliegende Lebensstadien aquatischer Insekten (Perkin et al. 2014; Manfrin et al. 2017) und terrestrisch lebender Insekten (Longcore et al. 2015) übereinstimmt.

Beleuchtung

Die Ergebnisse des GLMM zeigten einen hochsignifikanten Effekt der Behandlung auf die Anzahl der Insekten ($p < 0,0001$), was auch für die drei am häufigsten gefangenen Ordnungen Hemiptera ($p < 0,0001$), Diptera ($p < 0,0001$) und Ephemeroptera ($p = 0,02$) zu erkennen war. Um festzustellen, welche Behandlung sich von der Kontrolle unterschied, wurden paarweise Vergleiche zwischen jeder einzelnen Behandlung und der Kontrolle durchgeführt. Bei Insekten im Allgemeinen unterschieden sich alle Behandlungen signifikant von der Kontrolle (p -Werte $< 0,001$). Ähnliche Ergebnisse wurden für Hemiptera gefunden. Für Diptera wichen die Behandlungen bei hochintensivem blauem Licht, hochintensivem grünem Licht und gelbem Licht signifikant von der Kontrolle ab. Für Ephemeroptera galt dies bei hochintensivem grünem Licht, rotem und gelbem Licht (siehe Abb.3). Bemerkenswert ist, dass die Behandlungen mit hochintensivem grünem und mit gelbem Licht die einzigen waren, die sich bei allen Ordnungen signifikant von der Kontrolle unterschieden.

Farbe, Leuchtdichte und deren Wechselwirkungen

Mit Ausnahme der Ephemeroptera zeigte die Varianzanalyse einen signifikanten Effekt von Farbe, Leuchtdichte und deren Interaktion auf die Anzahl der gefangenen Insekten. Die anschließenden paarweisen Vergleiche zeigten signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Farben und Leuchtdichten (siehe Abb.3). Beim Vergleich aller Farben bei niedrigen Leuchtdichten wurde ein signifikanter Effekt der Farbe festgestellt ($p = 0,04$). Die folgenden paarweisen Vergleiche zeigten jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Farben, sondern nur einige mögliche Trends (rot vs. gelb; blau vs. gelb; grün vs. gelb). Ein Vergleich nur von grünem und blauem Licht in beiden Leuchtdichten ergab signifikante Effekte der Farbe ($p = 0,04$), der Leuchtdichte ($p = 0,03$) und der Interaktion zwischen beiden Faktoren ($p = 0,01$). Die anschließenden paarweisen Vergleiche der verschiedenen Kombinationen ($p < 0,05$) ergaben signifikante Unterschiede zwischen der grünen Lichtbehandlung mit hoher Leuchtdichte und allen anderen drei Lichtbehandlungen.

4 Diskussion

Unsere Ergebnisse bestätigen die Hypothese, dass auch aquatische Insektenstadien eine positive Phototaxis zeigen, was mit typischen Befunden für fliegende Lebensstadien aquatischer Insekten (Perkin et al. 2014; Manfrin et al. 2017) und terrestrisch lebender Insekten (Longcore et al. 2015) übereinstimmt.

Kasten 1: Lichtverschmutzung durch beleuchtete Brücken kann Wanderungsbarrieren in aquatischen Systemen schaffen.

Box 1: Light pollution from illuminated bridges can create migration barriers in aquatic systems.

Beleuchtete Brücken, die Gewässer überspannen, verfügen über integrierte Beleuchtungssysteme mit dem Zweck, den Verkehr über das Gewässer zu sichern und die Durchfahrt von Booten zu ermöglichen (Abb. K1-1). Bei nicht gut ausgerichteter Brückenbeleuchtung besteht allerdings die Gefahr, dass das Licht auf die Wasseroberfläche strahlt, in die Wassersäule eindringt und dort als Lichtverschmutzung auftritt.

Studien zur nächtlichen Ökologie haben gezeigt, dass nicht optimierte Brückenbeleuchtung, bei der das Licht über den vorgesehenen Bereich hinausstrahlt, das Flugverhalten von Insekten und Fledermäusen negativ beeinflussen kann. Außerdem kann künstliches Licht die Verteilung von Arten und somit die Zusammensetzung von Lebensgemeinschaften beeinträchtigen. Bei Fischen wurde festgestellt, dass sich künstliches Licht in der Nacht auf das Wanderverhalten auswirken kann, entweder weil die Fische die Lichtbarriere eher meiden (z. B. Aale – *Anguilla anguilla*) und deshalb beleuchtete Strecken ungern durchschwimmen oder weil sie umgekehrt von der Beleuchtung angezogen werden (z. B. Junglachse) und länger in diesen Bereichen verweilen. Dadurch kann die Wanderung zeit- und energieaufwändiger werden, was insbesondere bei über weite Strecken wandernden Arten die natürliche synchronisierte Fortpflanzung gefährden könnte (Hölker et al. 2018).

Um den Einfluss beleuchteter Brücken auf Flüsse darzustellen, haben wir das künstliche Licht an sieben beleuchteten Brücken entlang der Spree in Berlin bei Nacht lichttechnisch vermessen und anschließend die möglichen Auswirkungen des künstlichen Lichts auf das Verhalten der Fische eingeschätzt. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass künstliches Licht, das ungewollt auf die Wasseroberfläche trifft, unnatürlich abrupte Lichtkontraste verursachen kann, die sich als Lichtbarrieren negativ auf Fische während ihrer Wanderung auswirken könnten. An allen Brücken, mit Ausnahme einer Brücke direkt im Zentrum, wurden unterhalb der Brücke niedrigere Beleuchtungsstärken gemessen als vor und hinter der Brücke. Auf Grundlage einer Literaturrecherche und eines konzeptionellen Modells der Auswirkungen solcher abrupten Lichtkontraste gehen wir davon aus, dass Lichtbarrieren die nächtliche Landschaft eines Flusses wahrscheinlich derart strukturieren können, dass Fische während ihrer

Wanderung auf Grund veränderter Umweltinformationen (hier Licht) irrtümlich Lebensräume bevorzugen, in denen ihre Fitness niedriger ausfallen könnte (geringerer Überlebens- oder Reproduktionserfolg) als in anderen verfügbaren Lebensräumen.

Trotz der Bestrebungen, die städtische Vernetzung durch beleuchtete Brücken für den Straßenverkehr zu verbessern, sollte die Beleuchtungspraxis keine Lichtimmissionen auf Wasseroberflächen zulassen. Eine genaue Charakterisierung der städtischen Lichtumgebung im Bereich von Brücken kann dazu beitragen, die Notwendigkeit umweltschonender Beleuchtung zu verdeutlichen. Um die Fragmentierung von Flusssystemen, d. h. die Beeinträchtigung aquatischer Wanderrouen, sowie das Risiko der Störung oder Verzögerung der Migration von Wanderfischarten zu vermeiden, sollte künstliche Beleuchtung in der Nähe von Gewässern sorgfältig gesteuert werden, um sie ausschließlich auf die von Personen genutzten funktionalen Verkehrswege zu beschränken oder besser ganz zu vermeiden. Die Beleuchtungspraxis ist gefordert, evidenzbasierte Entscheidungen zu treffen, die einen umweltschonenden Einsatz von Beleuchtung beinhalten, um die natürliche Lichtumgebung von Flüssen bei Nacht zu erhalten bzw. wiederherzustellen. Weitere Untersuchungen sind jedoch notwendig, um die Auswirkungen von Brückenbeleuchtung auf Flussökosysteme besser abschätzen zu können.

Literatur

Hölker F., Jechow A. et al. (2018): Nächtliches Licht und Lichtverschmutzung in und um Gewässer. Handbuch Angewandte Limnologie 34(1/18): 1 – 26. DOI: 10.1002/9783527678488.hbla2018003

Autorin/Autoren

Catherine Pérez Vega, Andreas Jechow, Franz Hölker
Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)
Müggelseedamm 310
12587 Berlin
E-Mail: catherine.perez@igb-berlin.de, andreas.jechow@igb-berlin.de, franz.hoelker@igb-berlin.de



Abb. K1-1: a) Moltkebrücke (Berlin) mit ober- und unterhalb der Brücke angebrachter Beleuchtung und sichtbarem urbanem Skyglow. b) Jannowitzbrücke (Berlin) mit nur oberhalb angebrachter Beleuchtung und sichtbarem urbanem Skyglow. (Fotos: Catherine Pérez Vega)

Fig. K1-1: a) Moltke bridge (Berlin) with lighting mounted above and below the bridge and visible urban skyglow. b) Jannowitz bridge (Berlin) with lighting only mounted on top and visible urban skyglow.

Die Studie konnte zeigen, dass die phototaktische Anziehung von Wasserinsekten sowohl von der Farbe als auch von der Leuchtdichte des Lichts abhing. Die aquatischen Insektenlebensstadien wiesen eine positive phototaktische Reaktion auf alle verwendeten Lichtquellen auf. Allerdings reagierten die einzelnen Insektenordnungen nicht in gleicher Weise: Hemipteren wurden von allen Lichtquellen angezogen, die Nymphen der Ephemeropteren nur von hochintensivem grünem Licht, gelbem und rotem Licht, und

Dipterenlarven nur von hochintensivem grünem, hochintensivem blauem und von gelbem Licht. Dies könnte auf Unterschiede in der Lichtwahrnehmung zwischen den Insektenordnungen und/oder auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass es sich bei den Dipteren und Ephemeropteren um Larvenstadien handelte, während viele der Hemipteren adult waren. Trotz Unterschieden reagierten alle Ordnungen stark sowohl auf grünes als auch auf gelbes Licht hoher Leuchtdichte. Bei grünem Licht zeigte sich die erwartete

Zunahme der Anziehung mit höherer Leuchtdichte (Donners et al. 2018), bei blauem Licht gab es aber keinen Unterschied zwischen den beiden Leuchtdichten. Im Ergebnis wurde gezeigt, dass die phototaktischen Reaktionen aquatischer Insekten sowohl von der Wellenlänge als auch von der Leuchtdichte des Lichts beeinflusst wurden und dass diese Effekte nicht additiv waren.

Die Ergebnisse stehen im Gegensatz zu der üblicherweise beobachteten stärkeren Anziehung fliegender Insekten durch kurzwelliges (blaues) Licht und zu additiven Effekten von Spektren und Intensität (van Langevelde et al. 2011; Longcore et al. 2015; Donners et al. 2018). Alle untersuchten Insektengruppen reagierten auf Wellenlängenbereiche in der Mitte des sichtbaren Spektrums (500 – 600 nm) und die Nymphen der Ephemeropteren zeigten keine signifikante Reaktion auf blaues Licht. Radwell, Camp (2009) beschrieben zwar ebenfalls für Wasserinsekten eine höhere Attraktivität von gelb-grünem Licht im Vergleich zu blauem und rotem Licht. Allerdings wurden die verwendeten Lichtquellen dabei nicht weiter radiometrisch charakterisiert.

Grundsätzlich kann es zu unterschiedlichen spektralen Reaktionen von Larven und erwachsenen Insekten kommen. Während viele adulte fliegende Chironomiden (Zuckmücken) – die individuenreichste Gruppe aquatischer Dipteren am Untersuchungsstandort (siehe auch Manfrin et al. 2018) – ebenfalls keine ausgeprägte Reaktion auf blaues Licht zeigen (z. B. Hirabayashi et al. 2017; Kamei et al. 2021), ist für fliegende Ephemeropterenstadien die Anziehungskraft, wie bei vielen anderen fliegenden Insekten, bei den kürzeren Wellenlängen am größten (Mészáros et al. 2021). Ein Grund für die unterschiedlichen Reaktionen von Larven und erwachsenen Insekten könnten unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten während der Ontogenese (Individualentwicklung) sein. So sind beispielsweise die Komplexaugen von Nymphen der Eintagsfliege *Ephoron virgo* in erster Linie grünempfindlich, während die erwachsenen Tiere primär UV-empfindlich sind (Egri et al. 2022). Bei einigen Ephemeroptera verändert sich zudem die Opsinexpression (Opsine = Sehpigmente) im Laufe der Entwicklung (Chou et al. 2020).

Die Tatsache, dass Insekten in einer aquatischen Umgebung eine andere spektrale Verhaltensreaktion als fliegende Insekten zeigen, ist wahrscheinlich eine Anpassung an die spektrale Umgebung, in der sie leben. Der hohe Anteil optisch aktiver Bestandteile wie Phytoplankton und Partikel, v. a. aber cDOM in Binnengewässern führt zu einer stärkeren Absorption von Licht kurzer und langer Wellenlängen im Vergleich zu Licht mit Wellenlängen um 500 – 600 nm (Grubisic et al. 2019; Chou et al. 2020). Das bedeutet, dass sich Licht mit Wellenlängen zwischen 500 nm und 600 nm in solchen Süßwasserkörpern weiter ausbreiten kann als Licht kürzerer (blau) oder längerer (rot) Wellenlängen. In unserer Studie war der cDOM-Gehalt so hoch, dass rotes Licht sogar am wenigsten abgeschwächt wurde. Außerdem wird kurzwelliges Licht in Wasser stärker gestreut als langwelliges. Diese optischen Eigenschaften könnten auf zweierlei Weise zu einer höheren Attraktivität grüner oder gelber Beleuchtung führen. Erstens: Da grünes oder gelbes Licht weniger stark absorbiert wird als blaues Licht, sind diese Lichtbehandlungen im Vergleich zu den kürzeren Wellenlängen für Insekten anziehender. Dies wird durch die Messungen der Wassertransparenz und Berechnungen bestätigt, die z. B. zeigen, dass in 2 m Entfernung von den Fallen etwa 50-mal mehr grünes Licht als blaues Licht einfällt. Im Nahbereich hat jedoch das blaue Licht auch bei den Behandlungen mit niedriger Leuchtdichte den höchsten Photonfluss. Zweitens leben Insekten, die in Süßwasserkörpern wie den untersuchten Gräben leben, in einer grün dominierten Umgebung und reagieren daher evtl. besonders empfindlich auf grünes Licht und werden von grünem Licht besonders stark angezogen.

Die Reaktion auf Wellenlängen im mittleren Bereich des sichtbaren Spektrums deckt sich mit anderen Studien. So wurde die nächtliche Driftbereitschaft aquatischer Insektenlarven in Fließgewässern durch Wellenlängen um 500 – 600 nm am stärksten reduziert (Chaston 1969). Auch bei Süßwasserfischen (z. B. Flussbarsch – *Perca fluviatilis*, Plötze – *Rutilus rutilus*) war die spektrale physiologische Reaktion (hier die Unterdrückung der Melatoninproduktion) im

Gegensatz zu marinen Fischarten (Grubisic et al. 2019) stärker zu längeren Wellenlängen hin verschoben (Brüning et al. 2016, 2018). Ferner änderte künstliches Licht mit unterschiedlichen Spektren nichts an der schädlichen Anziehungskraft auf junge Lachse (*Oncorhynchus tshawytscha*; *O. nerka*) entlang von Seeufern (Tabor et al. 2021).

5 Schlussfolgerungen

In zukünftigen Studien sollte grundsätzlich eine vollständige Charakterisierung der spektralen Eigenschaften der in den Experimenten verwendeten Lichtquellen und des Wassers erfolgen. Darüber hinaus sollte auch das umgebende Lichtfeld charakterisiert werden. Zudem sind weitere Studien über die spektrale Empfindlichkeit und Auswirkungen von Wasserinsekten erforderlich.

Bei der Planung von Beleuchtungsanlagen in der Nähe von Binnengewässern müssen die unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten und Reaktionen aller Organismen und Lebensstadien – aquatisch und terrestrisch – berücksichtigt werden (siehe auch Kasten 1). Eine Eindämmung durch spektrale Anpassung wie bei Landinsekten, d. h. die Reduzierung der Emissionen kurzer Wellenlängen, ist bei aquatischen Organismen insbesondere in cDOM-reichen („trüben“) Gewässern wahrscheinlich nicht wirksam, da Wellenlängen im mittleren Bereich des sichtbaren Spektrums die stärksten Auswirkungen zu haben scheinen. Folglich sind Schutzmaßnahmen wie die Verbesserung der Abstrahlungsgeometrie oder die Verringerung der Lichtintensität und der Beleuchtungsdauer viel besser geeignet, um negative Auswirkungen auf Insekten in der Nähe von Binnengewässern zu minimieren.

6 Literatur

- Bates D., Mächler M. et al. (2015): Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software* 67(1): 1 – 48. DOI: 10.18637/jss.v067.i01
- Brüning A., Hölker F. et al. (2016): Impact of different colours of artificial light at night on melatonin rhythm and gene expression of gonadotropins in European perch. *Science of the Total Environment* 543: 214 – 222. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.11.023
- Brüning A., Hölker F. et al. (2018): Influence of light intensity and spectral composition of artificial light at night on melatonin rhythm and mRNA expression of gonadotropins in roach *Rutilus rutilus*. *Fish Physiology and Biochemistry* 44: 1 – 12. DOI: 10.1007/s10695-017-0408-6
- Chaston I. (1969): The light threshold controlling the periodicity of invertebrate drift. *Journal of Animal Ecology* 38: 171 – 180.
- Chou A., Lin C., Cronin T.W. (2020): Visual metamorphoses in insects and malacostracans: Transitions between an aquatic and terrestrial life. *Arthropod Structure & Development* 59: e100974. DOI: 10.1016/j.asd.2020.100974
- Donners M., van Grunsven R.H. et al. (2018): Colors of attraction: Modeling insect flight to light behavior. *Journal of Experimental Zoology A* 329(8/9): 434 – 440. DOI: 10.1002/jez.2188
- Egri Á., Mészáros Á. et al. (2022): Spectral sensitivity transition in the compound eyes of a twilight-swarming mayfly and its visual ecological implications. *Proceedings of the Royal Society B* 289: e20220318. DOI: 10.1098/rspb.2022.0318
- Gaston K.J., Visser M.E., Hölker F. (2015): The biological impacts of artificial light at night: The research challenge. *Philosophical Transactions Royal Society B* 370: e20140133. DOI: 10.1098/rstb.2014.0133
- Grubisic M., van Grunsven R.H. et al. (2018): Insect declines and agroecosystems: Does light pollution matter? *Annals of Applied Biology* 173: 180 – 189. DOI: 10.1111/aab.12440
- Grubisic M., Haim A. et al. (2019): Light pollution, circadian photoreception and melatonin in vertebrates. *Sustainability* 11(22): e6400. DOI: 10.3390/su11226400

- Hirabayashi K., Nagai Y. et al. (2017): Phototaxis of *Prosilocerus akamusi* (Diptera: Chironomidae) from a shallow eutrophic lake in response to LED lamps. *Journal of the American Mosquito Control Association* 33: 128 – 133. DOI: 10.2987/16-6600.1
- Hölker F., Bolliger J. et al. (2021): 11 pressing research questions on how light pollution affects biodiversity. *Frontiers in Ecology and Evolution* 9: e767177. DOI: 10.3389/fevo.2021.767177
- Hölker F., Moss T. et al. (2010a): The dark side of light: A transdisciplinary research agenda for light pollution policy. *Ecology and Society* 15(4): e13. DOI: 10.5751/ES-03685-150413
- Hölker F., Wolter C. et al. (2010b): Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology and Evolution* 25(12): 681 – 682. DOI: 10.1016/j.tree.2010.09.007
- Holzhauser S.I., Franke S. et al. (2015): Out of the dark: Establishing a large-scale field experiment to assess the effects of artificial light at night on species and food webs. *Sustainability* 7(11): 15.593 – 15.616. DOI: 10.3390/su71115593
- Jechow A., Hölker F. (2019): How dark is a river? Artificial light at night in aquatic systems and the need for comprehensive night-time light measurements. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 6(6): e1388. DOI: 10.1002/wat2.1388
- Jechow A., Hölker F. (2023): Messung und Bewertung der ökologischen Lichtverschmutzung – Anforderungen an die interdisziplinäre Lichtmessung. *Natur und Landschaft* 98(9/10): 453 – 460. DOI: 10.19217/NuL.2023-09-06
- Kamei M., Jikumaru S. et al. (2021): Effects of replacing outdoor lighting with white LEDs with different correlated color temperatures on the attraction of nocturnal insects. *Applied Entomology and Zoology* 56: 225 – 233. DOI: 10.1007/s13355-021-00729-7
- Kühne J.L., van Grunsven R.H. et al. (2021): Impact of different wavelengths of artificial light at night on phototaxis in aquatic insects. *Integrative and Comparative Biology* 61(3): 1.182 – 1.190. DOI: 10.1093/icb/icab149
- Kummu M., de Moel H. et al. (2011): How close do we live to water? A global analysis of population distance to freshwater bodies. *PLOS ONE* 6(6): e20578. DOI: 10.1371/journal.pone.0020578
- Kyba C.C., Altıntaş Y.Ö. et al. (2023): Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022. *Science* 379(6.629): 265 – 268. DOI: 10.1126/science.abq7781
- Lenth R.V. (2016): Least-squares means: The R package lsmeans. *Journal of Statistical Software* 69(1): 1 – 33. DOI: 10.18637/jss.v069.i01
- Longcore T., Aldern H.L. et al. (2015): Tuning the white light spectrum of light emitting diode lamps to reduce attraction of nocturnal arthropods. *Philosophical Transactions Royal Society London B* 370(1.667): e20140125. DOI: 10.1098/rstb.2014.0125
- Longcore T., Rich C. (2004): Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2(4): 191 – 198. DOI: 10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2
- Manfrin A., Lehmann D. et al. (2018): Dietary changes in predators and scavengers in a nocturnally illuminated riparian ecosystem. *Oikos* 127(7): 960 – 969. DOI: 10.1111/oik.04696
- Manfrin A., Singer G. et al. (2017): Artificial light at night affects organism flux across ecosystem boundaries and drives community structure in the recipient ecosystem. *Frontiers in Environmental Science* 5: e61. DOI: 10.3389/fenvs.2017.00061
- Mészáros Á., Kriska G., Egri Á. (2021): Spectral optimization of beacon lights for the protection of night-swarming mayflies. *Insect Conservation and Diversity* 14(2): 225 – 234. DOI: 10.1111/icad.12446
- Perkin E.K., Hölker F., Tockner K. (2014): The effects of artificial lighting on adult aquatic and terrestrial insects. *Freshwater Biology* 59(2): 368 – 377. DOI: 10.1111/fwb.12270
- R Core Team (2017): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Wien. <https://www.R-project.org/> (aufgerufen am 30.3.2021).
- Radwell A.J., Camp N.B. (2009): Comparing chemiluminescent and LED light for trapping water mites and aquatic insects. *Southeastern Naturalist* 8(4): 733 – 738.
- Tabor R.A., Perkin E.K. et al. (2021): Artificial lights with different spectra do not alter detrimental attraction of young Chinook salmon and sockeye salmon along lake shorelines. *Lake and Reservoir Management* 37(3): 313 – 322. DOI: 10.1080/10402381.2021.1906364
- Thrane J.-E., Hessen D.O., Andersen T. (2014): The absorption of light in lakes: Negative impact of dissolved organic carbon on primary productivity. *Ecosystems* 17(6): 1.040 – 1.052. DOI: 10.1007/s10021-014-9776-2
- Van Langevelde F., Ettema J.A. et al. (2011): Effect of spectral composition of artificial light on the attraction of moths. *Biological Conservation* 144(9): 2.274 – 2.281. DOI: 10.1016/j.biocon.2011.06.004

PD Dr. Franz Hölker
Korrespondierender Autor
Leibniz-Institut für
Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)
Müggelseedamm 310
12587 Berlin
E-Mail: franz.hoelker@igb-berlin.de



Foto: Manu Theobald

PD Dr. Franz Hölker ist Leiter der Arbeitsgruppe Lichtverschmutzung und Ökophysiologie am Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) und Privatdozent für Zoologie an der Freien Universität Berlin. Er beschäftigt sich seit 2009 mit den Auswirkungen von künstlichem Licht in der Nacht auf ein breites Spektrum biologischer Prozesse, von der Genexpression über Land-Wasser-Interaktionen bis hin zu Ökosystemfunktionen. Der Autor war Leiter der Forschungsplattform „Verlust der Nacht“ und Vorsitzender der European Cooperation in Science and Technology (COST) Action „Loss of Night Network“ (LoNNe).

Judith Kühne
Leibniz-Institut für
Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)
Müggelseedamm 310
12587 Berlin
E-Mail: judith.kuehne@igb-berlin.de

Dr. Andreas Jechow
Leibniz-Institut für
Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB)
Müggelseedamm 310
12587 Berlin
E-Mail: andreas.jechow@igb-berlin.de

Dipl.-Ing. Agr. Marita Böttcher
Bundesamt für Naturschutz
Fachgebiet II 4.2
„Eingriffsregelung, Verkehrswegeplanung“
Alte Messe 6
04103 Leipzig
E-Mail: marita.boettcher@bfn.de

Dr. Roy van Grunsven
De Vlinderstichting
Mennoietenweg 10
Postbus 506
6700 AM Wageningen
NIEDERLANDE
E-Mail: roy.vangrunsvan@vlinderstichting.nl