

Lichtverschmutzung und die Vulnerabilität nachtaktiver Insekten

von Stefanie Suchy & Sebastian Stoll

Keywords: Lichtverschmutzung, Insektenschwund, nachtaktive Insekten, Phototaxis, Ökologie der Nacht, Nachtlandschaft, Sternepark, Schutzgut Dunkelgebiet, Raumplanungsfaktor Dunkelheit, Blendung, Gute Fachliche Praxis des Kunstlichteinsatzes, Lichtplanung, differenzierte Beleuchtungskonzepte, flexible Lichtintensitäts- und Leuchtzeitanpassung, bedarfsgerechte Beleuchtung

Natürliches Licht von Sonne, Mond, Sternen und Feuer war in der Geschichte des Lichts bis “vor kurzem” die einzige Lichtquelle der menschlichen Evolution. Lampen mit Flüssigbrennstoffen wie Öl und Tran, Fackeln oder Kerzen, hielten bis ins 19. Jahrhundert ihr Beleuchtungsmonopol. Ihr Geruch war unangenehm, die offene Flamme gefährlich, ihre in der Regel ungünstige Beleuchtung schlecht für die Augen. Vor rund 150 Jahren sind dann, zuerst in den europäischen Städten und später auch zunehmend in ländlichen Gegenden, die ersten lichtstarken Außenbeleuchtungsanlagen in Betrieb gegangen und man feierte dies zu Recht als große kulturelle und technologische Errungenschaft. Seither haben wir die Nacht etwas zu erfolgreich zum Tag gemacht. Licht dient heute längst nicht mehr nur den funktionalen Bedürfnissen des Menschen, sondern es wird mit einer großen und oft sehr unbedachten Selbstverständlichkeit eingesetzt – sei es für Werbezwecke, Verkehr, Beleuchtung von Arbeitsstätten oder Freizeiteinrichtungen. Durch immer mehr, aber nicht unbedingt immer bessere, künstliche Beleuchtungsinstallationen werden die Nächte sukzessive immer heller. Unter anderem zum Leidwesen vieler nachtaktiver Insekten.

Inhalt:

0.	Lichtverschmutzung: eine wachsende Problematik	204
Teil 1:	Das Insektensterben in der hellen Nacht	206
1.1	Stellenwert der Lichtverschmutzung für den Insektenschwund	206
1.2	Anlockwirkung, Vertreibung und Verlust der Orientierung	206
1.3	Beeinflussung des natürlichen Lebensrhythmus und von Lebensfunktionen	208
Teil 2:	Nachttaktive Insekten in (ehemals) dunklen Ökosystemen	208
2.1	Verschiebungen in Nahrungsnetzen und Lebensgemeinschaften	208
2.2	Nachtinsekten als Ökosystemdienstleister am Beispiel der Bestäubung	211
Teil 3:	Wandelstreiber und Ziele	212
3.1	Bedarf an besseren Beleuchtungslösungen in der Dynamik des technologischen Wandels	212

3.2	Eine Gute Fachliche Praxis für den Kunstlichteinsatz	213
3.3	Standortgerechte Beleuchtung	214
3.4	Lichtplanung	217
3.5	Betriebsweise	220
4.	Literatur	221

0. Lichtverschmutzung: eine wachsende Problematik

Unter Lichtverschmutzung versteht man heute eine aus verschiedenen Gründen als negativ zu wertende Überlagerung von natürlichem Licht durch Kunstlicht. Dabei werden die Lichtverhältnisse in den Dämmerungs- und Nachtstunden durch die bisher ungebremste Zunahme der künstlichen Aufhellung der Erde bei Nacht in einer Weise beeinflusst, die als ökologische Störung zu beschreiben ist. Insbesondere ist ein häufig vergleichsweise unaufgeklärter Einsatz künstlichen Lichts am falschen Ort innerhalb der falschen Zeiträume und mit ungünstigen lichttechnischen Eigenschaften zu konstatieren. Dabei kommt es in wachsendem Ausmaß zu einer Beeinträchtigung der Lebensfunktionen sowohl des Menschen, als auch einer Vielzahl anderer Lebewesen und Ökosysteme, deren Umweltanpassung im Laufe der Erdgeschichte von den elementaren Informationen des Tag-Nacht-Wechsels und der jahreszeitlichen Veränderung der Tageslängen geprägt wurde.

Kunstlicht wurde auch zu einem sehr eindrücklichen visuellen Indikator der vielfältigen Vor- und Nachteile eines globalisierten Strukturwandels und ist ein selbstverständlich zu erwartendes Phänomen des Anthropozäns. Selbst aus dem All gesehen sind besiedelte oder industriell genutzte Räume und Verkehrswege sehr deutlich anhand ihrer Lichtmarken zu erkennen. Studien zeigen global eine rapide Zunahme in Helligkeit und Ausdehnung beleuchteter Flächen. Abhängig vom Ort steigt der Einsatz von Kunstlicht in der Nacht jährlich um zwei bis sechs Prozent (Hölker et al. 2010a, Kyba et al. 2017).



Abb. 1: Der Alpenbogen – die besiedelten Täler und Ballungsräume sind gut erkennbar, ebenso wie einige vom Kunstlicht noch wenig beeinflusste Bereiche. (c) 2016 VIIRS data, NASA Earth Observatory.

Beeinträchtigung des Menschen

Für den Menschen betreffen wichtige Aspekte einer zu großen Präsenz von Kunstlicht in seinem eigenen Lebensraum v.a. Verschiebungen im Tag-Nacht-Rhythmus, Veränderungen des Hormonhaushalts, Stress und bedeutende Ruhe- und Regenerationseinbußen. Dazu kommen auf einer rein pragmatischen Ebene auch neue Gefahren durch den falschen Gebrauch von Kunstlicht, durch Blendung oder durch ein übersteigertes subjektives Sicherheitsempfinden. Ein schlecht regulierter Einsatz von Kunstlicht bedeutet eine erhebliche Einbuße eben jenes Plus an Lebensqualität, welches man ursprünglich mit Hilfe des Lichts zu erlangen versuchte. Nicht zuletzt entsteht im Schatten der künstlichen Beleuchtung auch eine neue Form der Blindheit. Das allmähliche Verschwinden unberührter Nachtlandschaften und eines tiefen, reichen Sternenhimmels hinterlassen auf einer kulturellen, identitätsstiftenden und spirituellen Ebene wüste Narben. Genau zu einer Zeit in der sich der Mensch eigentlich an der Schwelle eines glänzenden Weltraumzeitalters wahrzunehmen versucht.

Beeinträchtigung von Tieren, Pflanzen und Ökosystemen

Eine weitere Rolle spielt Lichtverschmutzung im Zusammenhang mit dem weltweit voranschreitenden Verlust der Biodiversität. Hier hat sie das Potential, eine zusätzliche Störung auf bereits von verschiedenen Seiten geschwächte Ökosysteme auszuüben (Longcore & Rich 2004, Rich & Longcore 2006). Insbesondere geht man von signifikanten Einflüssen auf Insekten, aber auch auf Vögel, Fledermäuse, Fische, Amphibien und eine Vielzahl anderer Tiere sowie Pflanzen aus (Huemer et al. 2011a, Haupt 2009, Da Silva et al. 2015, Stone et al. 2009, Buchanan 2006, Briggs 2006).

Beeinträchtigung von Insekten im engeren Sinne

Über 60 Prozent der Wirbellosen sind nachtaktiv und werden somit durch Veränderungen der natürlichen Lichtregime in der Nacht potentiell beeinträchtigt (Hölker et al. 2010b). Unter den Wirbellosen sind die Insekten die Klasse mit der größten Artenvielfalt. Sie tragen bedeutende Funktionen in Nahrungsnetzen und sie sind die wichtigsten Bestäuber. Eine besonders artenreiche Insektenordnung sind wiederum die Schmetterlinge. So wurden alleine in Tirol bisher ca. 2700 Arten nachgewiesen – von denen etwa 85 Prozent ausschließlich oder überwiegend nachtaktiv sind (Huemer 2009). Betrachtet man die negativen Auswirkungen, welche Lichtverschmutzung auf verschiedene Insekten hat, so sind diese dem Menschen zunächst einmal erstaunlich ähnlich: Neben einer Beeinträchtigung physiologischer Prozesse verändert die Präsenz künstlichen Lichts in einem Habitat auch das Verhalten von Organismen. Für die Insekten äußert sich das insbesondere in Anlockung, Vertreibung, einem Verlust der Orientierungsfähigkeit und in der Verschiebung der natürlichen Lebenszyklen. Aktionsradien, Kommunikation, Entwicklung, Fortpflanzung, Nahrungssuche, Räuber-Beute-Beziehungen und ganze Nahrungsnetze werden in der Folge mehr oder weniger direkt beeinträchtigt. Damit können die Auswirkungen von Lichtverschmutzung letztlich von Populationseinbrüchen, über Artenverschiebungen innerhalb von Lebensgemeinschaften, über das Aussterben von isolierten Populationen – insbesondere von standorttreuen, spezialisierten und gefährdeten Arten – bis hin zu einem quantitativ problematischen systemaren Verlust bestimmter Ökosystemleistungen reichen (Longcore & Rich 2004, Davies et al. 2012).

Teil I: Das Insektensterben in der hellen Nacht

I.1 Stellenwert der Lichtverschmutzung für den Insektenschwund

Sinkende Populationszahlen und ein Rückgang des Artenreichtums und der Verbreitung von Nachtfaltern sind eindeutig zu verzeichnen. Nach aktuellem Forschungsstand liegen verschiedene maßgebliche Faktoren des Insektenrückgangs v.a. in Verlust, Fragmentierung und qualitativer Verschlechterung von Lebensräumen, der fortschreitenden Ausbringung von Pestiziden, Düngemitteln und Schadstoffen sowie in der Lichtverschmutzung (Potts et al. 2010, Fox 2013, van Langevelde et al. 2018, BMU 2018). Ein sehr hoher Stellenwert kommt, im engeren Zusammenhang mit der Lichtverschmutzung, dem Faktor der **Anlockwirkung** zu. In ihr besteht einerseits die größte und eindeutigste Störung von Insektengemeinschaften durch Kunstlicht, ebenso aber auch eine prinzipiell relativ gut durch bessere Lichttechnologie zu regulierende Eigenschaft anthropogener Lichtemission (siehe Teil 3: Wandelstreiber und Ziele). Aufgrund dieser Anlockwirkung von Kunstlicht ist zudem davon auszugehen, dass der nächtliche Kunstlicheinsatz den in fast allen europäischen Kulturlandschaften bereits vorhandenen Faktor der **Lebensraumfragmentierung** für Insekten deutlich verschärft und damit die Zersplitterung von Insektenpopulationen begünstigt. Dies erschwert den genetischen Austausch, wodurch die Widerstandsfähigkeit reduziert wird und eine Bildung von Inselpopulationen begünstigt werden kann, was damit schließlich die bestehende Gefahr des Aussterbens isolierter Arten zusätzlich erhöht (Bruce-White & Shardlow 2011). Besonders hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang der Einfluss einer sensiblen Steuerung der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung. Beleuchtete Straßen formen ein feines Netz aus Lichtbarrieren. Die Lichtemission verschärft dabei letztlich einfach den landschaftsökologisch ohnehin gegebenen, fragmentierenden Charakter von Verkehrsnetzen. Entweder wenn lichtscheue Arten diese helleren Bereiche meiden, oder wenn anlockungsempfindliche Arten in ihnen festhängen, schränken diese linear orientierten Strukturen den Bewegungsradius der Individuen ein und stellen zusätzliche Hürden für Verbreitungs- und Migrationsbewegungen einer Population dar (Hahn & Brühl 2016). Straßenbeleuchtung kann so z.B. den Populationsaustausch von Nachtfaltern zwischen Habitaten beeinflussen (Degen et al. 2016). Gerade die Straßenbeleuchtung an Hecken, Sträuchern oder Feldrändern mindert potenziell den Wert dieser biotopverbindenden, wertvollen Lebensräume. In ihrer aktuellen Auseinandersetzung mit der breiteren Thematik des sogenannten Insektensterbens bezeichnen Grubisic et al. (2018) den Stellenwert des nächtlichen Kunstlicheinsatz für den aktuellen Insektenschwund als einen nicht zu unterschätzenden **zusätzlichen Stressfaktor**. Dies insbesondere im Zusammenhang mit Lebensgemeinschaften auf typischen agrarwirtschaftlich geprägten Standorten, wo Insekten einerseits wichtige Ökosystemleistungen tragen (wie Schädlingsregulation, Bestäubung oder Erhalt der Bodenqualität und von Nährstoffkreisläufen) und andererseits bereits ohne den Faktor Lichtverschmutzung unter einem erheblichen Umweltdruck stehen. Weltweit kompromittieren nächtliche Kunstlichtemissionen jedenfalls die Lebensräume unzähliger Insekten, darunter auch jene vieler bereits vom Aussterben bedrohter Arten. Ihr Verlust geht mit potentiell erheblichen Verlusten in Nahrungsnetzen und Ökosystemprozessen einher, da diese Insektenpopulationen dann als Prädatoren, Nahrungsquellen und Bestäuber fehlen.

I.2 Anlockwirkung, Vertreibung und Verlust der Orientierung

Segen und Fluch: Sehkraft und Orientierungsvermögen nachtaktiver Insekten

Eine Besonderheit der visuellen Wahrnehmung von Insekten ist die Fähigkeit des hohen zeitlichen Auflösungsvermögens. Die Komplexaugen besitzen drei bis fünf unterschiedliche Arten von

Rezeptorzellen. Diese sind empfindlich für Ultraviolett-Strahlung (350 nm), Blau (440 nm) und Grün (540 nm) (Briscoe & Chittka 2001, Kelber et al. 2003). Die maximale Empfindlichkeit von Nachtfaltern wurde von Cleve (1967) bei 420 nm angenommen. Nachtinsekten sind prinzipiell in der Lage sowohl nachts Farben zu sehen, als auch anhand der Himmelskörper zu navigieren (Sotthibandhu & Baker 1979, Kelber et al. 2002, Johnsen et al. 2006, Warrant & Dacke 2011, Dacke et al. 2013). Bereits Beleuchtungsstärken in etwa in der Größenordnung der Vollmondhelligkeit (0,3 lx) reichen für die Störung vieler Gliederfüßer aus. Das sind Lichtstärken, die bereits durch urbane Lichtglocken naturnahe Bereiche erreichen (Kyba et al. 2015). Damit sind Nachtinsekten tatsächlich auf Dunkelheit und natürliches Licht von Mond und Sternen angewiesen, um sich erfolgreich zu orientieren, fortzubewegen, Räubern auszuweichen, Futter zu suchen und sich fortzupflanzen (Warrant 2017).

Die magische Anziehungskraft des Lichts

Warum viele Nachtfalter und andere Insektenarten in der Nacht so stark vom Kunstlicht angezogen werden, ist derzeit noch nicht genau bekannt, aber ein Zusammenhang mit den hochlichtempfindlichen Orientierungssystemen der Insekten scheint nahezuliegen. Insekten werden jedenfalls in erster Linie durch die Lichtquelle selbst (Eisenbeis & Eick 2011, Huemer et al. 2011a, Soneira 2013) oder durch reflektierende Oberflächen (Rich & Longcore 2004, Aubé 2015, Szaz et al. 2015) angelockt. Den stärksten Effekt auf die meisten Insekten haben Emissionen im ultravioletten und kurzwelligeren Strahlungsbereich (Briscoe & Chittka 2001, Kelber et al. 2003), wobei die Anlockkraft der Leuchtmittel im Einzelnen derzeit noch Gegenstand laufender Untersuchungen ist (siehe Teil 3: Wandelstreiber und Ziele). Als Tatsache gilt, dass sich der nächtliche Kunstlichteinsatz mit einem sogenannten „Staubsaugereffekt“ auswirkt (Eisenbeis 2006) und Insekten aus bis zu mehreren 100 Metern aus ihren natürlichen Lebensräumen „abzieht“. Einmal im Lichtkegel der Beleuchtungsanlagen angekommen, werden sie entweder inaktiv oder schwirren so lange herum bis sie aus Erschöpfung umkommen, im Beleuchtungskörper verbrennen oder in den aufgehellten Bereichen als leichte Beute enden. So fanden beispielsweise van Langevelde et al. (2018) ungleich stärkere Populationseinbrüche bei Nachtfaltern mit einer hohen Empfindlichkeit gegenüber nächtlichem Kunstlicht. Und es ist v.a. aus diesem Grund der Anlockwirkung, wenn die Autoren den Faktor Lichtverschmutzung als wesentlich im Zusammenhang mit den beobachteten Populationsverlusten beschreiben. Unter einem etwas anderen Blickwinkel auf die Thematik der Lichtverschmutzung werden auch bereits erste Hinweise auf Anpassungsstrategien von Insekten, in diesem Fall bestimmter urbaner Nachtfalterpopulationen, an künstliche Lichtregimes diskutiert (Altermatt & Ebert 2016).



Abb. 2: Wie Motten in das Licht.
© Peter Suchy.

1.3 Beeinflussung des natürlichen Lebensrhythmus und von Lebensfunktionen

Die natürlichen Lichtverhältnisse sind eine entscheidende Voraussetzung für das Funktionieren der biologischen Uhr verschiedener Lebewesen. Insbesondere kleine, unscheinbare, graduelle Veränderungen natürlicher Lichtintensitäten und Spektren während der Dämmerungs- und Nachtzeiten und über den Wechsel der Jahreszeiten liefern die Basisinformation für die biologischen Tag/Nacht-, Mond- und Jahresrhythmen. Diese biologischen Rhythmen sind sowohl Grundlagen der Regulation einer Vielzahl physiologischer Prozesse, als auch der zeitlichen Abstimmung von Lebensabläufen und generell des Verhaltens nachtaktiver Insekten (Kronfeld-Schor et al. 2013, Seymore 2018). So ist beispielsweise das Licht des Mondes von zentraler Bedeutung für die Futtersuche (welche in diesem Fall auch Bestäubung bedeutet) der nacht- und dämmerungsaktiven sowie einiger tagaktiver Bienen (Kerfoot 1967, Oehmke 1973). Auch Eintagsfliegen stimmen ihre Lebensabläufe so ab, dass sie bei hellem Mond schlüpfen, um sich fortzupflanzen (Corbet et al. 1974). Verkürzt sich die Tageslänge im Winter, treten einige Insekten in die Diapause ein (Ruhezustand während der Entwicklung – beispielsweise verpuppen sich Nachtfalter-Raupen). Manipuliert der Mensch die Tageslänge nun künstlich durch Lichtemissionen, so kann das Insekten daran hindern, rechtzeitig in die Diapause zu wechseln, wodurch die Überlebenschancen für den Winter drastisch sinken. Konkrete Untersuchungen zu Auswirkungen von nächtlichem Kunstlicheinsatz auf Insekten konnten ein Sinken der Faktoren Leistungsfähigkeit, Bewegungsradius, Reproduktion und Überlebensfähigkeit aufzeigen.

So fanden van Langevelde et al. (2017), dass nächtlicher Kunstlicheinsatz die **Futtersuche** von Nachtfaltern hemmt. Van Geffen et al. (2014, 2015a, 2015b) fanden in verschiedenen Arbeiten, dass bereits geringe Intensitäten nächtlicher Kunstlichtemission den Übergang in die **Diapause** verhindern können, dass der nächtliche Kunstlicheinsatz unabhängig vom Spektralbereich zu einer Reduktion der Pheromonproduktion sowie zu Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung der Pheromone einer Eulenfalter-Art führt (wodurch der Fortpflanzungserfolg sinkt), und dass eine weibliche Spinner-Art beleuchtete Bereiche entweder meidet, oder ein stark eingeschränktes Paarungsverhalten aufweist: 53 Prozent der auf dunklen Stämmen gefangenen Weibchen waren befruchtet, im Gegensatz zu nur 13, 16 und 28 Prozent der Weibchen auf Stämmen mit Lichtbelastungen respektive im grünen, weißen und roten Spektralbereich. Weiters zeigen McLay et al. (2017, 2018) negative Einflüsse auf den **Fortpflanzungserfolg** anhand von Fruchtbarkeitseinbußen, verlängerten Paarungsflügen, verändertem Eiablageverhalten, sowie **Senkungen der Überlebensraten** erwachsener Fruchtfliegen.

Teil 2: Nachtaktive Insekten in (ehemals) dunklen Ökosystemen

2.1 Verschiebungen in Nahrungsnetzen und Lebensgemeinschaften

Ein Rückgang der Populationszahlen, insbesondere von Nachtfaltern, durch den nächtlichen Einsatz von Kunstlicht kann einen zusätzlichen Verlust an Artenvielfalt bedeuten und weitreichende ökologische Auswirkungen haben (Eisenbeis 2006, van Langevelde et al. 2011). Nachtfalter sind eine bedeutende Nahrungsquelle für Amphibien, Vögel, Fledermäuse und weitere nachtaktive Säuger. Ändert sich der systemare Stellenwert von Insekten in deren Rollen als **Bestäuber, Nah-**

rungsgrundlage oder **Prädatoren** durch erhebliche Schwankungen in Populationsgrößen oder durch Artenverschiebungen, dann hat dies potenziell weitreichende synökologische Auswirkungen. Auf die Thematik von Populationseinbrüche als Folge der Anlockwirkung von Kunstlicht wurde bereits hingewiesen. Ebenfalls ist anzunehmen, dass der stetig wachsende Bestand an künstlichen Beleuchtungsanlagen vielerorts zu einer Verschiebung innerhalb der Artenzusammensetzung der trophischen Netze der Insekten führen wird (Scheibe 2000). Eine etwas neuere Studie zeigt derartige Veränderungen an einem durch Kunstlicht (Straßenleuchten) aufgehellten Lebensraum (begrüntem Seitenstreifen), in dem deutlich mehr räuberische und aassessende Wirbellose gezählt wurden als auf dunklen Vergleichsstandorten. In Folge der Anlockwirkung war also eine höhere Dichte an Prädatoren (Laufkäfer und bestimmte Spinnenarten) festzustellen, wobei diese dann auch vermehrt tagsüber auftraten (Davies et al. 2012).

Kaskadeneffekte an der synökologischen **Tier-Pflanze Schnittstelle** beschreiben beispielsweise Bennie et al. (2015). Sie fanden, dass amberfarbenes Licht, und zu einem geringeren Anteil auch weißes Licht, das Blühen des Sumpf-Hornklee unterdrückt. Als Erbsenblattläuse im August vom Saugen der Pflanzensäfte aus den Trieben zu den Blütenköpfen wechselten, sank die Anzahl der Tiere in den Amber-Lichtboxen des Feldversuches deutlich aufgrund der Tatsache, dass weniger Blütenstände vorhanden waren.

Ein weiteres Beispiel sind synökologische Effekte zwischen Insekten und anderen Wirbellosen in **aquatischen Lebensräumen**. Aquatische Insekten können auf ihrer Suche nach Wasseroberflächen von beleuchteten Flächen, wie beispielsweise Asphalt, getäuscht werden, was zur nutzlosen Eiablage und generell hohen Sterberaten führen kann (Szaz et al. 2015). Durch verschiedene



Abb. 3: Nachtaktive Insekten haben essentielle Funktionen in Ökosystemen, Kunstlicht ist ein Störfaktor. (c) Illustration: Vandasye 2017.

Einflüsse auf aquatische Insektenlarven kann sich nächtlicher Kunstlichteinsatz insbesondere auf Emergenz und Abundanz von aquatischen Insekten auswirken, einhergehend mit einer Abnahme in der Artenvielfalt und Körpergröße der schlüpfenden Individuen. Dies kann Störungen von aquatisch-terrestrischen Prozessen über Ökosystemgrenzen hinweg nach sich ziehen (Meyer & Sullivan 2013, Manfrin et al. 2017). Generell führten derartige Veränderungen zu saisonalen und artenspezifischen Verschiebungen im Nahrungsangebot von trophisch verknüpften Prädatoren und Aasfressern in den umgebenden Uferbereichen, mit entsprechenden weiteren Auswirkungen auf deren Konkurrenzgefüge, Abundanz und Jagdverhalten (Manfrin et al. 2018). Somit war hier ein gewisser Kaskadeneffekt durch die Nahrungsnetze von Ufern und Böschungsbereichen im Einzugsgebiet von Beleuchtungsanlagen zu verzeichnen (Manfrin et al. 2017). Für die Zusammensetzung

von Lebensgemeinschaften subalpiner Fließgewässer fand schließlich Grubisic (2017) eine kunstlichtinduzierte Abnahme in der Biomassenproduktion und Veränderungen in den Gemeinschaften benthischer Primärerzeuger.



Abb. 4 und 5: Ein Bestäuber der Zweiblättrigen Waldhyazinthe (*Platanthera bifolia*) ist beispielsweise der Veränderliche Gebirgs-Blattspanner (*Entephria caesiata*). (c) Stefanie Suchy bzw. Peter Buchner.

2.2 Nachtinsekten als Ökosystemdienstleister am Beispiel der Bestäubung

Viele Insekten brauchen im Erwachsenenstadium die von Blütenpflanzen in Form von Nektar und Pollen zur Verfügung gestellte Nahrung für Eigenenergie und Fortpflanzungserfolg. Gelangen Insekten von Blüte zu Blüte, so wird Pollen übertragen. Landet der Pollen auf dem Fruchtblatt einer Samenpflanze derselben Art, so kann eine erfolgreiche Befruchtung stattfinden, wobei für die Pflanze nicht nur die reine Vermehrung im Vordergrund steht, sondern insbesondere die Neuordnung von genetischem Material. Bestäubung ist eine der bedeutendsten Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und Tieren und damit auch eine der wichtigsten Ökosystemleistungen nachtaktiver Insekten. Bleibt diese aus, so kann dies langfristig zu einer Veränderung in der Vegetationszusammensetzung und bis hin zu Pflanzenartenschwund führen, insbesondere jener Pflanzen, die sich auf eine Bestäubung durch einzelne Tierarten spezialisiert haben. Zwar sind nachtaktive Insekten in den agrarisch geprägten Gebieten der gemäßigten Zone höchstwahrscheinlich nicht maßgeblich für die Bestäubung der eigentlichen Feldfrüchte verantwortlich, sie leisten aber wesentliche Beiträge zur Aufrechterhaltung der Biodiversität (Hahn & Brühl 2016, Macgregor et al. 2015), der Schädlingsregulation und der Bodenqualität (Grubisic et al. 2018).

Um Blüten lokalisieren zu können, benötigen Nachtinsekten häufig olfaktorische oder visuelle Reize (Raguso & Willis 2005). Beobachtungen zeigen, dass Nachtfalter eher von hellen Blüten angelockt werden (White et al. 1994), wobei sie häufig ein mehr oder weniger artenspezifisches Bestäubungsverhalten aufweisen. Wenn nächtliche Kunstlichtemissionen nachtaktive Insekten von Feldern, Wiesen oder Hecken in die beleuchteten Bereiche ziehen, wird ihre Rolle als Bestäuber damit unterbrochen. Dies macht sich schließlich mit sinkenden Bestäubungsraten von Nachtfalter-Pflanzen bemerkbar (Johnsen et al. 2006). So beeinflusst nächtliche Beleuchtung nach einer Studie von Knop et al. (2017) die generative Vermehrung der Kohldistel. Der Verlust der Bestäubungsleistung durch die nachtaktiven Insekten kann in diesem Beispiel auch nicht durch tagaktive Bestäuber kompensiert werden und die reduzierte Zahl nächtlicher Bestäuber resultierte letztlich in einer um 13 Prozent geringeren Anzahl an Früchten pro Pflanze. Auch aus einer Untersuchung von Macgregor et al. (2017) geht hervor, dass derartige Effekte im Zusammenhang mit nächtlichem Kunstlichteinsatz einen wichtigen Stellenwert haben. In Bereichen mit Straßenbeleuchtung war die Aktivität von Nachtfaltern in Bodenhöhe nur halb so groß wie an dunklen Vergleichsstandorten, bei einer um 70 Prozent höheren Flugaktivität auf Straßenlampen-Niveau. Ebenso war ein Gesamttrückgang der pollentragenden Nachtfalter an beleuchteten Standorten zu beobachten. Sowohl die verringerte Nachtfalter-Aktivität in Bodennähe, als auch eine verringerte Artenvielfalt in beleuchteten Gebieten hatte eine negative Auswirkung auf die Bestäubung. In einer neuen Studie zeigen Macgregor et al. (2019) den insbesondere für eine Emissionsregulation sehr wichtigen Fakt, dass derartige Negativeffekte ausbleiben können, wenn eine Lichtabschaltung ab Mitternacht eingeführt wird. Interessanterweise handelt es sich hier nicht nur um ein graduell besseres Resultat, sondern vielmehr um eine vollständige Effektkompensation während der zweiten Hälfte der Nacht. Dies legt einfache Regulationskonzepte insbesondere auf der Gemeindeebene nahe, mit denen durch zeitlich begrenzte Abschaltungen sowohl Kostenersparnisse als auch eine Besserung des Zustands lokaler Ökosysteme erzielt werden könnten (siehe Teil 3: Wandelstreiber und Ziele).

Teil 3: Wandelstreiber und Ziele

3.1 Bedarf an besseren Beleuchtungslösungen in der Dynamik des technologischen Wandels

Gesundheit

Der Mensch verbringt heute mehr als die Hälfte seines Lebens im Inneren von Gebäuden, Tendenz steigend. Er bekommt immer weniger Sonnenlicht ab und ist gleichzeitig v.a. in den Abend- und Nachtstunden immer mehr Kunstlicht ausgesetzt, welches noch dazu in aller Regel physiologisch ungünstige Lichteigenschaften aufweist. Durch dieses Ungleichgewicht kommt es zu einem negativen Einfluss auf die Gesundheit. Auch der Mensch hat eine biologische Uhr, für die der Tag-Nacht-Rhythmus, mit dessen Kopplungen unter anderem an das Hormon Melatonin eine wichtige Rolle spielt. Melatonin ist bedeutend für ein ausgeglichenes Immunsystem, einen gesunden Schlaf und aufgrund seiner antioxidativen Wirkung. Das Hormon wird in den dunklen Abend- und Nachtstunden ausgeschüttet, während Tageslicht – und nächtliches Kunstlicht im kurzwelligen Bereich – die Melatonin-Synthese hemmen. Und auch für den Menschen gilt, dass schon sehr geringe Lichtintensitäten, wie beispielsweise Displays von Smartphones, ausreichend sind, um über die Senkung des Melatoninspiegels verschiedene Körperfunktionen zu beeinträchtigen. Weitere Faktoren für die Gesundheit bestehen beispielsweise in der Gefahr von Netzhautschäden aufgrund von Phototoxizität, Kurzsichtigkeit durch zu wenig natürliches Licht, Kopfschmerzen durch Flackerlicht, oder Blendung (Heilig 2018, Wu et al. 2006, Inger 2014, Mani & Schwartz 2017). Darüber hinaus könnte der Faktor Kunstlicht das Risiko von Brust- und Prostatakrebs, Übergewicht, Diabetes und Depressionen erhöhen (Kloog et al. 2010, Haim et al. 2010, Fonken et al. 2010, Spiegel et al. 2005, Bedrosian et al. 2011).

Sicherheit und Lebensqualität

Während ein maßvoller Einsatz von Kunstlicht dazu beitragen kann, das Wohlbefinden und zumindest ein subjektives Sicherheitsempfinden vieler Menschen zu erhöhen, bedeutet aber ein Mehr an Licht beileibe nicht immer einen Vorteil. Prominente Alltagsbeispiele hierfür sind Beleuchtungsanlagen im öffentlichen Raum im Zusammenhang mit Kriminalität oder Straßenverkehr. So können sich etwa Bürger auf einem beleuchteten Radweg außerhalb einer Ortschaft gut fortbewegen, sie sind jedoch auch für etwaige Beobachter sehr gut sichtbar. Letztere sind im Dunkelbereich so gut wie unsichtbar, während man als Benutzer des Radweges visuell im Lichtkegel gefangen ist. Ein noch deutlicheres Beispiel sind Blendungen insbesondere im Straßenverkehr. Prinzipiell müssten hier Ablenkung und Blendung zwar vermieden werden, doch wir alle kennen die stetige Zunahme des Lichtstresses, welchem man als Fahrzeuglenker nachts ausgesetzt ist. Weitere Beispiele für den gesellschaftlichen Bedarf eines besseren Beleuchtungsregimes richten sich in erster Linie an die systematische Vermeidung störender Lichtemissionen im Freiland, aber auch in Wohnbereichen, Arbeitsstätten, bei Außenbeleuchtungsanlagen im innerurbanen Raum sowie generell im Zusammenhang mit der nachhaltigen Raumplanung.

Energieverbrauch und Ökobilanz

Durch den sorgsamen Einsatz von Kunstlicht können der direkte Energieverbrauch und damit verbundene Kosten und Umweltauswirkungen reduziert werden. Energieeinsparungen reduzieren die CO₂-Emission und dämmen somit zumindest grundsätzlich Klimaerwärmung und Umweltver-

schmutzung ein. In Verbindung mit der großen Dynamik des technologischen Wandels rund um das Thema Beleuchtung ist aktuell jedoch ein starker **Reboundeffekt** zu beobachten. Dieses Phänomen entsteht, wenn mit der Modernisierung von Beleuchtungseinrichtungen, beispielsweise mit LEDs, nicht nur maßgebliche Einsparungen im Energieverbrauch „pro Lumen“ einhergehen, sondern in der Folge auch eine starke Zunahme an verschwenderischem Umgang mit Licht zu verzeichnen ist. So können Reboundeffekte durch die enorme Verbilligung und mit der neuen Begeisterung für „innovative“ Einsatzmöglichkeiten von Licht letztlich sogar zu einem Netto-Zuwachs im Verbrauch führen (Kyba et al. 2017). Mit einem Blick auf die Zunahme an Lichtverschmutzung und Lebensraumaufhellung kommt dazu noch die Tatsache, dass die neue LED-Technologie selbst bei gleichbleibendem Energieverbrauch viel mehr Licht erzeugt. Ein Licht dessen Einsatz nun auch in wachsendem Ausmaß andere Ziele als die zweckdienliche Beleuchtung bedient und damit häufig einfach zur Problematik von Blendung, Ablenkung und Lichtstress beiträgt.

Ein Versuch, die vielfältigen und häufig sehr komplexen Umweltauswirkungen einer Produktlösung einigermaßen umfassend zu analysieren, besteht mit den verschiedenen Methoden der **Ökobilanz**. Je nach Herangehensweise müssen hierbei zumindest Herstellung, Verpackung, Transport, Betriebszeit und Recycling berücksichtigt werden. Viele andere Faktoren, darunter der angesprochene Reboundeffekt oder ein potentieller Beitrag zur Lichtverschmutzung während der Lebensdauer eines Leuchtmittels, können dabei aber in der Regel keine Berücksichtigung finden. Trotzdem fällt die Betriebsphase für eine Ökobilanz mit vielen Faktoren ins Gewicht. Zu diesen gehören, etwa im Falle einer LED, die hohe Lebensdauer, der niedrige Stromverbrauch während des Betriebes – insbesondere im Vergleich zu dem relativ hohen Energiebedarf bei der Herstellung – oder der hohe Prozentsatz von klima- und umweltrelevanten fossilen Energieträgern bei der Stromerzeugung im Allgemeinen. Konkrete Untersuchungen ergeben eine bessere Ökobilanz der LEDs im Vergleich zu anderen gängigen Leuchtmitteln. Diese Ergebnisse sind aber letztlich v.a. auf den geringeren Strombedarf im Betrieb zurückzuführen. Während des Herstellungsprozesses haben LEDs aufgrund des höheren energetischen und chemischen Aufwandes eine schlechtere Ökobilanz als beispielsweise Hochdruck-Natriumdampflampen oder Metallhalogenlampen (Hartley et al. 2009, Abdul Hadi et al. 2013). LEDs beinhalten mehrere gesundheitsschädliche und umweltbelastende Stoffe, oder diese sind zumindest für den Herstellungsprozess erforderlich. Aufgrund der hohen Konzentrationen dieser Stoffe ist eine Gefährdung v.a. während der Produktion und dem Recycling gegeben (Lim et al. 2011, Thema 2010). Um Umweltauswirkungen und Ressourcenverbrauch bei Herstellungs- und Entsorgungsprozessen zu minimieren, ist deshalb die Umrüstung auf neue Technologien meist nur am Ende der Lebensdauer der alten Beleuchtungsinstallationen sinnvoll. Das Ergebnis einer Auseinandersetzung mit den vielschichtigen **Umweltauswirkungen** von Beleuchtungsanlagen erlaubt aber dennoch eine einfache und klare Aussage für die Praxis. Den entscheidenden Stellenwert für die eigentliche Betriebsphase haben die drei Kernfaktoren des konkreten Einsatzes von Licht: (1) Standortwahl, (2) Lichtplanung und (3) Betriebsweise.

3.2 Eine Gute Fachliche Praxis für den Kunstlicheinsatz

Da gute Beleuchtung tatsächlich nicht nur die Lebensqualität erhöht und Kosten spart, sondern auch den Zustand der Umwelt in einer prinzipiell sehr gut **sichtbaren** und sehr direkt **erfahrbaren** Weise verbessert, wäre Lichtverschmutzung eigentlich ein im Rahmen aktiver raumplanerischer Habitatgestaltung relativ einfach zu lösendes Problem. Wenn neue Strukturen errichtet oder alte erneuert werden, sollten Menge und Zweckdienlichkeit von Beleuchtung ganz selbstverständlich im Rahmen der Planungsphase hinterfragt werden. Wird eine konkrete Beleuchtungsanlage tat-

sächlich benötigt, so ist für die funktionalen Beleuchtungsziele (im Gegensatz zu Zielen der Stil- und Designumsetzung) in erster Linie ein standortgerechtes Beleuchtungskonzept entscheidend. Auch mit Hilfe einer guten Gesamtkonzeption auf der Ebene kommunaler Bebauungspläne kann die Beleuchtungseffizienz wirkungsvoll optimiert und können Blendung, Störungen der Anrainer, oder die Aufhellung des Nachhimmels eingedämmt bzw. verhindert werden. Darüber hinaus gilt es insbesondere dann einen für die Problematik der Lichtverschmutzung offenen Blick zu wahren, wenn allgemeine Regulationsziele in den Maßnahmenkatalogen einer nachhaltigen Siedlungs- und Verkehrsentwicklung konkretisiert werden.

Wie für ökologische Schutzgüter nicht unüblich, ist auch der Schutz vor Lichtverschmutzung in den meisten Staaten eine gesetzliche Querschnittsmaterie. Zwischen EU-Normen und innovativen Ansätzen in den Kommunen bestehen in allen Alpenstaaten verschiedene Ansätze für die Regulation der Beleuchtung von Verkehrswegen, Arbeitsstätten, Industrie- und Gewerbeanlagen, Sportstätten, im Zusammenhang mit Lichtwerbung, Privatbeleuchtung, Fassadenbeleuchtungen, zur Gewährleistung von Energieeinsparungen bis hin zum Schutz von astronomischen Einrichtungen. Seit 2012 ist beispielsweise in Österreich die wichtigste Norm zur Eindämmung von Lichtverschmutzung und störenden Auswirkungen des Kunstlichts auf Anrainer die ÖNORM O 1052 „Lichtimmissionen – Messung und Beurteilung“.

Eine weitere bedeutende Dimension im Umgang mit Schutzgütern ist ganz allgemein die Aufklärung und Miteinbeziehung von Umsetzungsakteuren. Insbesondere im öffentlichen Bereich können Planungs- und Realisierungsprozesse auch maßgeblich durch das strategische Bereitstellen von Informationen und Ressourcen gesteuert werden. So wurde beispielsweise in Österreich auf Beschluss der Landesumweltreferenten aller Bundesländer eine Planungshilfe für umweltfreundliche Außenbeleuchtung bereitgestellt – der „Österreichische Leitfaden Außenbeleuchtung“ (Bierbaum et al. 2018).

3.3 Standortgerechte Beleuchtung

Raumplanungsfaktor Dunkelheit für Siedlung und Verkehr

Die wirklich ungestörte natürliche Nachtlandschaft ist ein immer selteneres und sehr sensibles Zusammenspiel dunkler Schattierungen. In der fein nuancierten relativen Dunkelheit des Freilands heben sich Landschaftsstrukturen wie Bergketten, Gewässer oder Waldsilhouetten deutlich voneinander ab und der ungestörte Nachthimmel erlaubt einen tiefen und reichen Blick in das Weltall. Selbst für den, auf eine tagaktive Lebensweise spezialisierten, Menschen sind maßgebliche Störungen der nächtlichen Nahumgebung bereits durch vergleichsweise geringe Lichtemissionen (z.B. den kurzen Blick auf das Smartphone) gegeben. Bei stationären Lichtquellen im **Freiland** handelt es sich v.a. um die Beleuchtung verschiedener industrieller oder touristischer Einrichtungen. Ob Burgen, Kirchen, Hotels, Schipisten, Bergbahnstationen, Industriegebiete, Kläranlagen oder Kraftwerke – die zu einem relativ großen Teil verzichtbare Beleuchtung von Bauwerken und Arealen im Freiland beeinträchtigt die umgebenden Lebensräume in einem oft überproportionalen räumlichen Umkreis. Daher soll insbesondere die Beleuchtung im Freiland ganz vermieden oder zumindest räumlich und zeitlich stark begrenzt werden.

Abb. 6: Natürliche Nachtlandschaft. (oben) © Norbert Span.

Abb. 7: Künstliche Nachtlandschaft. (unten) © Christoph Malin.



Der Stellenwert von Kunstlicht innerhalb der **Verkehrsentwicklung** besteht, wie bereits ausgeführt, v.a. im Zusammenhang mit Verkehrssicherheit (insbesondere Blendung) und Lebensraumzerschneidung (Fragmentierungsfaktor Straßenbeleuchtung siehe Teil 1: Das Insektensterben in der hellen Nacht). Bei Dunkelheit geht die Sehschärfe zurück, Farben können schlechter oder gar nicht unterschieden werden und die Blendempfindlichkeit nimmt zu. Es ist daher in der Regel nicht mehr, sondern vielmehr ein besseres Licht, dass gegebenenfalls für ein gutes Sehen zweckdienlich sein kann. Das menschliche Auge fixiert unwillkürlich die stärkste Lichtquelle und passt sich sehr schnell an diese an, wogegen die Adaptation von hell auf dunkel im vollen Umfang bis zu 30 Minuten benötigt. So ist beim plötzlichen Wechsel von hell auf dunkel im ersten Moment keine geordnete visuelle Wahrnehmung möglich. Die Zeit für Navigation und Gefahrenerkennung verringert sich, die Augen werden überproportional angestrengt und es kommt zu Übermüdigungserscheinungen (Reidenbach et al. 2014, Heilig 2018). Eine umsichtige Lichtplanung auf der Straße (inklusive Autoscheinwerfer des Gegenverkehrs) und in deren visuellen Einzugsgebieten kann die Sicherheit mit blendfreier, orientierungsgebender Beleuchtung in der erforderlichen Stärke deutlich verbessern. Generell zu vermeiden sind auch gefährliche Irritationen durch sekundäre Lichtquellen wie z.B. Werbeanlagen, LED-Screens, Effektbeleuchtungen, Skybeamer etc.

Nicht zuletzt ist eine angemessene Berücksichtigung von Standortfaktoren für Beleuchtungsanlagen innerhalb der **Siedlungsgebiete** wichtig. Denn in urbanen Räumen leben nicht nur Menschen, sie sind auch Lebensraum von Tier- und Pflanzenarten. Gewässer, Parks, Grünanlagen, Bäume oder manche Bauwerke sind bedeutend für die Regeneration und als potentiell Bruthabitat. Ihr ökologischer Wert hängt dabei sehr stark vom lokalen Beleuchtungsregime ab und damit letztlich von einer standortgerechten Lichtplanung. Die Randbereiche von Siedlungen bilden als Übergänge zur freien Landschaft oft auch die primären Rückzugsräume für den Menschen. Siedlungsgrenzbereiche außerhalb oder an der Peripherie der urbanen Lichtglocke sind aufgrund ihrer einfachen Erreichbarkeit von großer Bedeutung für das menschliche Erleben des Sternenhimmels und damit von Naturnähe im Allgemeinen.

Raumplanungsfaktor Dunkelheit und der Nexus Schutzgebiete, Naherholungs- räume und Tourismus

Wenn Lichtglocken den Sternenhimmel verschwinden lassen, künstliche Lichtquellen den größten Teil der Aufmerksamkeit auf sich ziehen, Rastlosigkeit und Adaptionerscheinungen an Lichtüberflutung im Alltag spürbar werden, benötigt der Mensch nicht nur einfach Erholung. Er braucht vielmehr eine Erholung von den spezifischen Faktoren seiner Ermüdung. Vor diesem Hintergrund gewinnt, neben der Ruhe, auch die Ressource Dunkelheit zunehmend an (Erholungs-) Wert für Naherholungsräume und Tourismus. Insbesondere in den Gebirgsregionen geht mit dem Verlust von Sternenhimmel und Nachtlandschaft der essentielle Bezug des Menschen zu Umwelt und Natur verloren, was im Zusammenhang mit dem Alpentourismus nicht nur den Erholungs- sondern ebenso den Erlebniswert extrem schmälert. In dem für die Alpen geradezu traditionellen Konfliktfeld zwischen Fremdenverkehrs- und Naturschutzanliegen ist es daher besonders wichtig, den Wert des Schutzgutes Dunkelheit als ein gemeinsames Anliegen herauszustreichen: Durch den standortangepassten Verzicht auf, oder die konsequente Optimierung von Beleuchtungsanlagen in Gebirgsräumen bleiben Anwohner, Landschaftsbild, Gäste, Tiere, Pflanzen und ihre Interaktionen als ein Ganzes ungestört. Zunehmend werben Gemeinden und Alpentäler auch mit ihrer schönen Nachtlandschaft und ihrem beeindruckenden Sternenhimmel. Neben einer Vielzahl lokaler und regionaler Bestrebungen um Sterneparks, Lichtschutzgebiete, Themenwege und Sternwarten, bestehen Beispiele für konkrete Umsetzungskonzepte etwa mit der Winklmoos-Alm in Bayern (erster

Sternenpark in den Alpen, 2018 von der IDA als „International Dark-Sky Park“ zertifiziert), den „Sternendörfern“ Steinegg und Gummer in Südtirol, oder den „Alpine Astrovillage“ Luzein in der Ostschweiz.

3.4 Lichtplanung

Ein innovationsstarker Markt mit wachsendem Selbstbewusstsein

Im Sektor Lichtplanung und Leuchtmittelherstellung ist man sich der enormen Unterschiede zwischen einem guten und einem weniger guten Beleuchtungskonzept seit langem bewusst. Doch erst in jüngerer Zeit beginnt dieser spürbar in die Breite zu wachsen. Was noch vor zehn Jahren als exklusiv galt, ist längst zum Standard geworden und ehemals utopische Vorstellungen kommen heute in großen Stückzahlen zum Einsatz. Die Errichtung zeitgemäßer Beleuchtungsanlagen im öffentlichen oder wirtschaftlichen Segment erfordert zwar häufig immer noch individuelle Lösungen, doch mit der Verfügbarkeit besserer lichttechnischer Basiskomponenten und einer generell wachsenden Angebotsvielfalt technischer Lösungen liegt der Schwerpunkt mittlerweile bei der Planungskompetenz als solcher. Neben der Einhaltung der jeweils gültigen Normen und Auflagen, sowie dem Ermitteln eines zweckgerechten und qualitativ angemessenen Beleuchtungskonzepts, erfordern hier auch die großen Unterschiede im Anwendungsbereich (Straße-, Geh- und Radweg, Gebäude und Objekte, Sport- und Freizeitstätten, Baustellen, Gewerbe- und Industrieanlagen, Lichtwerbung, Effektbeleuchtung, Wohnbaubeleuchtung, private Außenbeleuchtungen etc.) in der Regel eine professionelle Lichtplanung.

Gesunde, umweltverträgliche und effiziente Leuchtmittel

Die verschiedenen im Außenbereich eingesetzten Leuchtmittel unterscheiden sich in vielen Parametern, wie insbesondere Effizienz, Spektrum und Farbwiedergabe. Während Entladungslampen (z.B. Hochdruck-Natriumdampfampe) noch bis vor nicht allzu langer Zeit die häufigsten Straßenlampen in Europa waren (van Tichelen et al. 2007), geht der Trend in der Außenbeleuchtung nun klar in Richtung LED. Mit der Umrüstung von alten Beleuchtungseinrichtungen auf neue Technologien können derzeit aufgrund des Faktors Betriebskosten signifikante Einsparungen erfolgen. Positive Eigenschaften von LEDs sind Energieeffizienz, die Möglichkeit zur präzisen Lichtlenkung, zur Regelung der Farbtemperatur sowie zur Dimmung. Zunächst zur

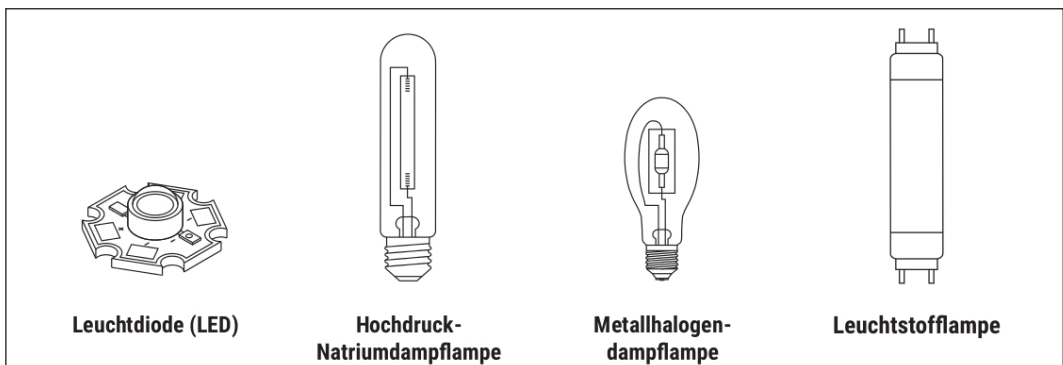


Abb. 8: Leuchtmittel in der Außenbeleuchtung. © Illustration: Vandasye 2017.

LICHTFARBEN (KELVIN)										
6500 K	6000 K	5500 K	5000 K	4500 K	4000 K	3500 K	3000 K	2500 K	2000 K	1500 K
kaltweiß				neutralweiß			warmweiß			
ATMOSPHERE		technisch		sachlich			gemütlich			
KURZWELLIG ←							→ LANGWELLIG			

Abb. 9: Die Lichtfarbe ist die Farbe des Lichts, wie es dem menschlichen Auge erscheint.

© Illustration: Vandasye 2017.

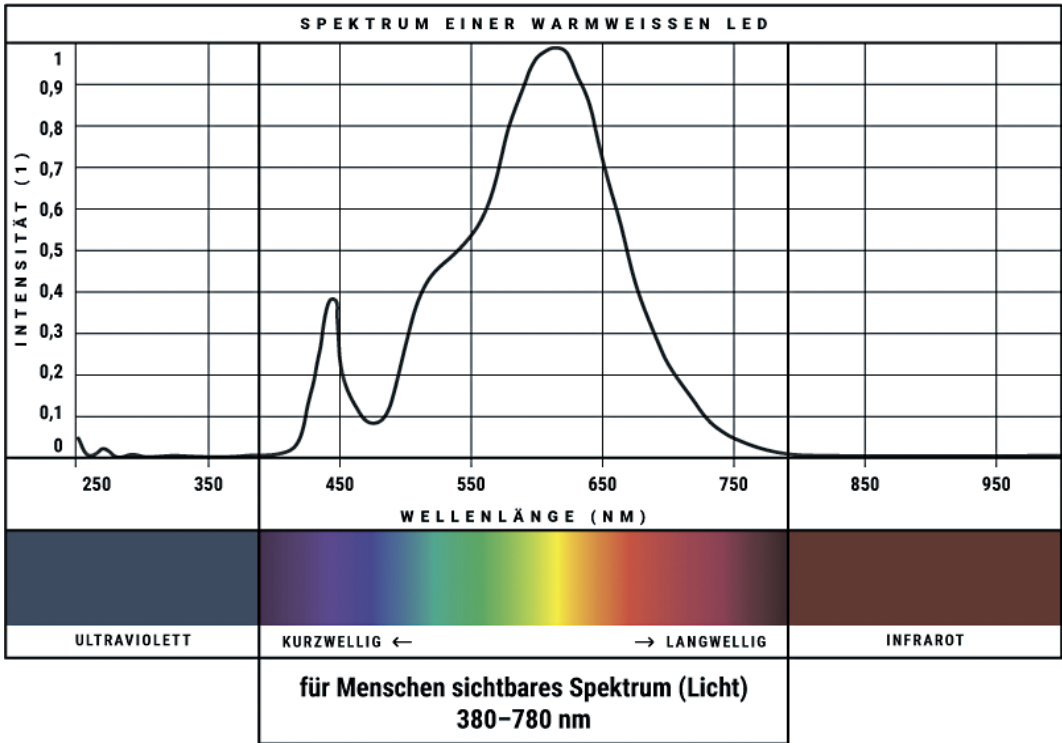


Abb. 10: Die Spektralkurve geht ins Detail und zeigt den emittierten Strahlungsanteil eines Leuchtmittels.

© Illustration: Vandasye 2017.

Farbtemperatur bzw. Lichtfarbe: Weißes Licht wird durch die Umwandlung der Strahlung blauer LEDs mit Hilfe einer Konversionsschicht erzeugt. Zusammensetzung und Dicke dieser Schicht sind entscheidend für die letztlich emittierte Farbtemperatur. Aus ästhetischen, gesundheitlichen und ökologischen Gründen werden niedrige Farbtemperaturen empfohlen, also Amber LEDs (unter 2200 Kelvin) oder auch warmweiße LEDs (unter 3000 Kelvin). Der zweite wichtige, mit der Farbtemperatur zusammenhängende, Parameter eines Leuchtmittels ist der emittierte Spektralbereich. Zum Wohl der Gesundheit sowohl des Menschen als auch vieler Tierarten soll insbesondere die Ausstrahlung im kurzwelligeren Bereich des Spektrums (unter 480 nm) vermieden werden. Weiße (auch warmweiße) LEDs können aber in ihrer spektralen Zusammensetzung variieren. Van Langevelde et al. (2011), Longcore et al. (2015) sowie Spoelstra et al. (2015) sehen

in diesem Umstand v.a. die positive Möglichkeit Lichtemissionen bereits in der Leuchtmittelherstellung hinsichtlich einer Minimierung deren Potentials ökologischer und gesundheitlicher Störungen zu regulieren.

Anlockwirkung verschiedener Leuchtmittel auf Insekten

Untersuchungen der Anlockwirkung unterschiedlicher Leuchtmittel auf Insekten wurden in den Jahren 2010 und 2011 von den Tiroler Landesmuseen in Zusammenarbeit mit der Tiroler Umweltanwaltschaft durchgeführt (Huemer et al. 2011a, Huemer et al. 2011b). Der Leuchtmittelvergleich 2010 ergab, dass insbesondere LEDs mit geringer Farbtemperatur (unter 3000 Kelvin) weniger Insekten anziehen. In der geringen Anlockkraft führten die LEDs vor der Hochdruck-Natriumdampflampe und den drei untersuchten Metallhalogendampflampen. Eine weitere Feldstudie mit einem lichttechnisch optimierten Versuchsaufbau im Sommer 2011 bestätigte dann das Vorergebnis. Die Hochdruck-Natriumdampflampe lockte ca. 65 Prozent mehr Insekten an als die getesteten LEDs. Die geringste Anlockwirkung hatten warmweiße LEDs (2700 Kelvin). In beiden Anlocktests (2010 und 2011) wurde, durch die Verwendung eines ultraviolett absorbierenden Zylinders, von keinem Leuchtmittel Ultraviolett-Strahlung emittiert.

Warum an der Hochdruck-Natriumdampflampe (1850 Kelvin) eine größere Anlockkraft als an den warmweißen und neutralweißen LEDs (4200 Kelvin) festgestellt wurde, ist derzeit noch unbekannt. Eine mögliche Ursache dafür könnte ein Flimmer- oder Flackereffekt der LEDs sein, womit eine weitere technologisch prinzipiell regulierbare Größe besteht. Abhängig von der Frequenz ist dieses Flimmern für den Menschen nicht wahrnehmbar, für viele Insekten aufgrund ihres hohen zeitlichen Auflösungsvermögens jedoch sehr wohl. Weniger Insektenanflug auf Flimmerlicht wurde bereits festgestellt (Inger et al. 2014, Barroso et al. 2015).

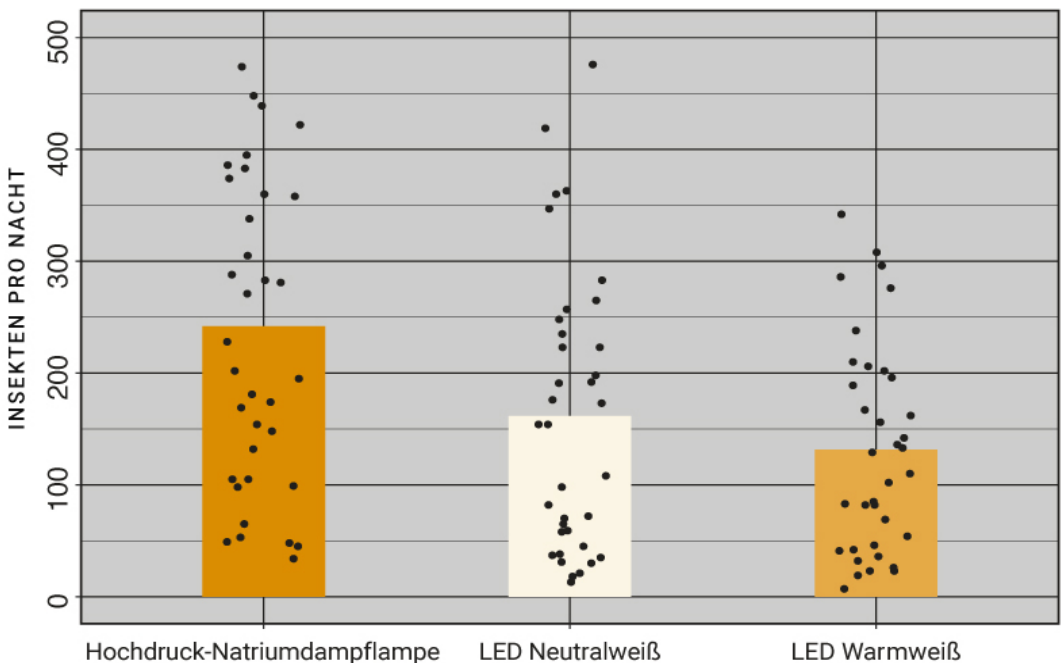


Abb. 11: Insekten-Anlockkraft der Leuchtmittel, die von den Tiroler Landesmuseen im Jahr 2011 in Völs bei Innsbruck getestet wurden. © Hannes Kühtreiber.

3.5 Betriebsweise

Bedarfsgerechte Beleuchtung und Cut-Off Standard

Ältere Beleuchtungsanlagen erhellen häufig mehr den Nachthimmel als den gewünschten Bereich, womit es mangels entsprechender Abschirmungen, Intensitäts- und Leuchtzeitanpassungen häufig zu den bereits ausgeführten Störungen von Mensch und Ökosystemen kommt. Per Definition sind derartige Störungen durch Kunstlicht als eine unökonomische Verlustleistung zu werten. Entlang der sinnstiftenden Frage „wo“ und „wann“ eine Lichtemission ihren planungsmäßigen Zielbereich trifft – oder verfehlt – ist eine gezielte Beleuchtung der Nutzfläche durch voll abgeschirmte Leuchten ebenso bedeutend, wie ein über die Zeitachse differenziertes Beleuchtungskonzept. Durch die Begrenzung des Ausstrahlwinkels auf maximal 70° und eine parallele Ausrichtung der Lichtaustrittsfläche zur beleuchteten Nutzfläche wird nicht nur die Lichtverteilung optimiert, sondern auch Lichtverschmutzung vermindert. Wird zusätzlich die Lichtpunkthöhe reduziert, verringert sich auch die Fernwirkung des in die Umgebung abgestrahlten Verlustlichts und somit auch die Beeinträchtigung der Nachtlandschaft und der in ihr lebenden Arten. Für das relativ schwierige Beispiel der Außenbeleuchtung von Gebäuden und Fassaden kann das Licht möglichst nahe an der Fassade geführt werden und bestenfalls von oben nach unten strahlen. Hier können auch sogenannte Projektor- oder Maskentechniken Anwendung finden (Mohar et al. 2014).

Die Innovation flexibler Intensitäts- und Leuchtzeitanpassungen

Bedarfsgerechte Beleuchtung bedeutet insbesondere auch eine Betriebsweise, bei der Kunstlicht nur zu den Zeiten und in den Intensitäten zum Einsatz kommt, in welchen es benötigt wird. Eine grundsätzliche Intensitätsanpassung, intelligente Steuerungssysteme, Nachtabsenkungen und Spätnachtabschaltungen sind hier die wichtigsten Instrumente bedarfsgerechter Beleuchtung. Unsere Augen können sich an niedrige Beleuchtungsniveaus nicht nur „anpassen“. Eine gleichmäßige,

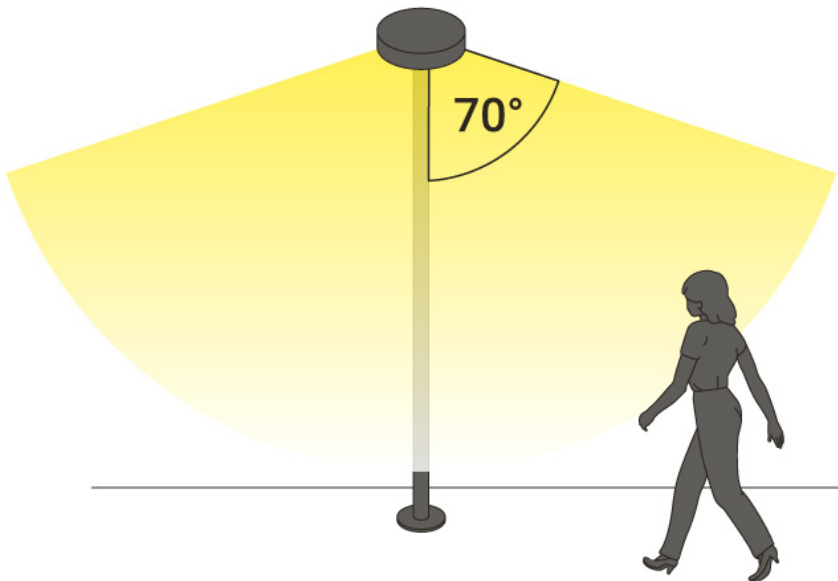


Abb. 12: Der voll abgeschirmte Leuchtentyp (Cut-Off) hat einen Ausstrahlwinkel von maximal 70° und sorgt für eine optimale Lichtverteilung. © Illustration: Vandasye 2017.

nicht blendende und orientierungsgebende Beleuchtung erhöht in der Regel die Sicherheit. Die Praxis zeigt, dass zahlreiche Beleuchtungsanlagen **aus Sicht des Nutzungszwecks** viel zu hell sind, da die Beleuchtungsintensität unzureichend an die, der ganzen Beleuchtungsinstallation zugrunde gelegten, Sehanforderungen angepasst wurden. So ist beispielsweise in dunklen Gebieten eine geringe Leuchtdichte ausreichend, um den optimalen Hell-Dunkel-Kontrast auf der Fassade eines historischen Gebäudes zu erreichen. Empfohlen werden für die meisten Gebäudeanstrahlungen eine durchschnittliche Leuchtdichte von weniger als 1 cd/m², in Gebieten mit sehr geringer Umgebungshelligkeit erzielen sogar Leuchtdichten von 0,5 cd/m² den gewünschten Effekt (Mohar et al. 2014). Verschiedene intelligente Steuerungssysteme für eine automatisierte Nachtabsenkung, Zeitintervallabschaltungen, gezielte Bedarfseinschaltungen anhand sensorischer Elemente, oder sensorgesteuerte Lichtleistungsreduktionen in temporärer Abwesenheit eines Verkehrsaufkommens sind mittlerweile viel erprobte technologische Komponenten.

4. Literatur

- Abdul Hadi, S., M.R. Al Kaabi, M.O. Al Ali & H.A. Arafat (2013): Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of streetlight technologies for minor roads in United Arab Emirates. *Energy for Sustainable Development* 17(5):438-450. doi:10.1016/j.esd.2013.05.001.
- Altermatt, F. & D. Ebert (2016) Reduced flight-to-light behaviour of moth populations exposed to long-term urban light pollution. *Biology Letters* 12:20160111. doi:10.1098/rsbl.2016.0111.
- Aubé, M. (2015): Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment. *Phil Trans R Soc* 370(1669). doi:10.1098/rstb.2015.0143.
- Barroso, A., I. Haifig, V. Janei, I. da Silva, C. Dietrich et al. (2015): Effects of flickering light on the attraction of nocturnal insects. *Lighting Res Technol* 49:100-110. doi:10.1177/1477153515602143.
- Bedrosian, T.A., L.K. Fonken, J.C. Walton, A. Haim & R.J. Nelson (2011): Dim light at night provokes depression-like behaviors and reduces CA1 dendritic spine density in female hamsters. *Psychoneuroendocrinology* 36(7):1062-9. doi:10.1016/j.psyneuen.2011.01.004.
- Bennie, J., T.W. Davies, D. Cruse, R. Inger & K.J. Gaston (2015): Cascading effects of artificial light at night: resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem. *Phil Trans R Soc* 370(1667):20140131. doi:10.1098/rstb.2014.0131.
- Bierbaum, H., M. Donat, W. Doppler, P. Juhasz, P. Heilig et al. (2018): Österreichischer Leitfaden Außenbeleuchtung: Licht, das mehr nützt als stört. Ämter der neun Österreichischen Bundesländer und Magistrat der Stadt Wien (Hg).
- Buchanan, B.W. (2006): Observed and potential effects of artificial night lighting on Anuran amphibians. In: Rich, C. & T. Longcore (ed) *Ecological consequences of artificial night lighting*. Washington DC: Island Press 192–200.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit – BMU (2018): Aktionsprogramm Insektenschutz der Bundesregierung: Diskussionsvorschläge des BMU für Maßnahmen. Berlin.
- Briggs, W.R. (2006): Physiology of plant responses to artificial lighting. In: Rich, C. & T. Longcore (ed) *Ecological consequences of artificial night lighting*. Washington DC: Island Press 389-406.

- Briscoe A.D. & L. Chittka (2001): The evolution of color vision in insects. *Annual Review of Entomology* 46(1):471–510. doi:10.1146/annurev.ento.46.1.471.
- Bruce-White, C. & M. Shardlow (2011): A review of the impact of artificial light on invertebrates: Putting the backbone into invertebrate conservation. Peterborough UK: Buglife, The Invertebrate Conservation Trust.
- Cleve, K. (1967): Das spektrale Wahrnehmungsvermögen nachts fliegender Schmetterlinge. *Nachrichtenblatt der Bayerischen Entomologen* 16:33-35.
- Corbet, S.A., R.D. Sellick & N.G. Willoughby (1974): Notes on the biology of the mayfly *Povilla adusta* in West Africa. *Journal of Zoology* 172(4):491-502. doi:10.1111/j.1469-7998.1974.tb04381.x.
- Dacke, M., E. Baird, M. Byrne, C.H. Scholtz & E.J. Warrant (2013): Dung Beetles Use the Milky Way for Orientation. *Current Biology* 23(4). doi:10.1016/j.cub.2012.12.034.
- Da Silva, A., M. Valcu & B. Kempenaers (2015): Light pollution alters the phenology of dawn and dusk singing in common European songbirds. *Phil Trans R Soc* 370(1667):20140126. doi:10.1098/rstb.2014.0126.
- Davies, T.W., J. Bennie & K.J. Gaston (2012): Street lighting changes the composition of invertebrate communities. *Biology Letters* 8(5):764-7. doi:10.1098/rsbl.2012.0216.
- Degen, T., O. Mitesser, E.K. Perkin, N.S. Weiß, M. Oehlert, E. Mattig & F. Hölker (2016): Street lighting: sex-independent impacts on moth movement. *Journal of Animal Ecology* 85(5):1352-1360. doi:10.1111/1365-2656.12540.
- Eisenbeis, G. (2006): Artificial Night Lighting and Insects: Attraction of Insects to Streetlamps in a Rural Setting in Germany. In: Rich, C. & T. Longcore (ed) *Ecological consequences of artificial night lighting*. Washington DC: Island Press 281-304.
- Eisenbeis, G. & K. Eick (2011): Studie zur Anziehung nachtaktiver Insekten an die Straßenbeleuchtung unter Einbeziehung von LEDs. *Natur und Landschaft* 86(7):298-306.
- Fonken, L.K., J.L. Workman, J.C. Walton, Z.M. Weil, J.S. Morris et al. (2010): Light at night increases body mass by shifting the time of food intake. *Proc Natl Acad Sci USA* 107(43):18664-9. doi:10.1073/pnas.1008734107.
- Fox, R. (2013): The decline of moths in Great Britain: a review of possible causes. *Insect Conservation and Diversity* 6(1):5-19. doi:10.1111/j.1752-4598.2012.00186.x.
- Grubisic, M., G. Singer, M.C. Bruno, R.H.A. van Grunsven, A. Manfrin et al. (2017): Artificial light at night decreases biomass and alters community composition of benthic primary producers in a sub-alpine stream. *Limnol Oceanogr* 62(6):2799-2810. doi:10.1002/lno.10607.
- Grubisic, M., R.H.A. van Grunsven, C.C.M. Kyba, A. Manfrin & F. Hölker (2018): Insect declines and agroecosystems: does light pollution matter? *Annals of Applied Biology* ISSN 0003-4746. doi:10.1111/aab.12440.
- Hahn, M. & C.A. Brühl (2016): The secret pollinators: an overview of moth pollination with a focus on Europe and North America. *Arthropod-Plant Interactions* 10:21-28. doi:10.1007/s11829-016-9414-3.
- Haim, A., A. Yukler, O. Harel, H. Schwimmer & F. Fares (2010): Effects of chronobiology on prostate cancer cells growth in vivo. *Sleep Science* 3(1):32-35.
- Hartley, D., C. Jurgens & E. Zatcoff (2009): *Life Cycle Assessment of Streetlight Technologies*. Mascaro Center for Sustainable Innovation, University of Pittsburgh.

- 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* 45(1):1-19.
- Heilig, P. (2018): Im Rampenlicht. *Concept Ophthalmologie* 2:29-30.
- Hölker, F., T. Moss, B. Griefahn, W. Kloas, C.C. Voigt et al. (2010a): The dark side of light: a transdisciplinary research agenda for light pollution policy. *Ecology and Society* 15(4):13. doi:10.5751/ES-03685-150413.
- Hölker, F., C. Wolter, E.K. Perkin & K. Tockner (2010b): Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology & Evolution* 25(12):681-2. doi:10.1016/j.tree.2010.09.007.
- Huemer, P. (2009): Potentielle Auswirkungen der Beleuchtung des Nachtschibetriebes in Söll-Hochsöll auf nachtaktive Insekten. Studie der Tiroler Umweltschutzgesellschaft und der Berg- und Skilift Hochsöll GmbH, Innsbruck.
- Huemer, P., H. Kührtreiber & G. Tarmann (2011a): Anlockwirkung moderner Leuchtmittel auf nachtaktive Insekten: Ergebnisse einer Feldstudie in Tirol (Österreich). *Wissenschaftliches Jahrbuch der Tiroler Landesmuseen*, Innsbruck: 110-135.
- Huemer, P., H. Kührtreiber & G. Tarmann (2011b): Anlockwirkung moderner Leuchtmittel auf nachtaktive Insekten: Feldstudie 2011. Studie der Tiroler Umweltschutzgesellschaft und der Tiroler Landesmuseen GmbH, Innsbruck.
- Inger, R., J. Bennie, T.W. Davies & K.J. Gaston (2014): Potential Biological and Ecological Effects of Flickering Artificial Light. *PLoS ONE* 9(5):e98631. doi:10.1371/journal.pone.0098631.
- Johnsen, S., A. Kelber, E.J. Warrant, A.M. Sweeney, E.A. Widder et al. (2006): Crepuscular and nocturnal illumination and its effects on color perception by the nocturnal hawkmoth *Deilephila elpenor*. *The Journal of Experimental Biology* 209:789-800. doi:10.1242/jeb.02053.
- Kelber, A., A. Balkenius & E.J. Warrant (2002): Scotopic colour vision in nocturnal hawkmoths. *Nature* 419:922-925. doi:10.1038/nature01065.
- Kelber, A., M. Vorobyev & D. Osorio (2003): Animal colour vision—behavioural tests and physiological concepts. *Biological Reviews* 78(1):81-118. doi:10.1017/S1464793102005985.
- Kerfoot, W.B. (1967): The lunar periodicity of *Sphecodogastra texana*, a nocturnal bee (Hymenoptera: Halictidae). *Animal Behaviour* 15(4):479-486. doi:10.1016/0003-3472(67)90047-4.
- Kloog, I., R.G. Stevens, A. Haim & B.A. Portnoy (2010): Nighttime light level co-distributes with breast cancer incidence. *Cancer Causes Control* 21(12):2059-68. doi:10.1007/s10552-010-9624-4.
- Knop, E., L. Zoller, R. Ryser, C. Gerpe, M. Hörler et al. (2017): Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature* 548:206-209. doi:10.1038/nature23288.
- Kronfeld-Schor, N., D. Dominoni, H. de la Iglesia, O. Levy, E.D. Herzog et al. (2013): Chronobiology by moonlight. *Proceedings of the Royal Society B* 280:20123088. doi:10.1098/rspb.2012.3088.
- Kyba, C.C.M., K.P. Tong, J. Bennie, I. Birriel, J.J. Birriel et al. (2015): Worldwide variations in artificial skyglow. *Sci Rep* 5:8409. doi:10.1038/srep08409.
- Kyba, C.C.M., T. Kuester, A.S. de Miguel, K. Baugh, A. Jechow et al. (2017): Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *Science advances* 3(11) e1701528. doi:10.1126/sciadv.1701528.
- Lim, S.R., D. Kang, O.A. Ogunseitan & J.M. Schoenung (2011): Potential environmental impacts of light-emitting diodes (LEDs): metallic resources, toxicity, and hazardous waste classification. *Environ Sci Technol* 45(1):320-7. doi:10.1021/es101052q.

- Longcore, T. & C. Rich (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.
- Longcore, T., H.J. Aldern, S. Eggers, L. Flores, E. Franco et al. (2015): Tuning the white light spectrum of light emitting diode lamps to reduce attraction of nocturnal arthropods. *Phil Trans R Soc B* 370:20140125. doi:10.1098/rstb.2014.0125.
- Macgregor, C.J., M.J.O. Pocock, R. Fox & D.M. Evans (2015): Pollination by nocturnal Lepidoptera and the effects of light pollution: a review. *Ecological Entomology* 40(3):187-198. doi:10.1111/een.12174.
- Macgregor, C.J., D.M. Evans, R. Fox & M.J.O. Pocock (2017): The dark side of street lighting: impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport. *Global Change Biology* 23:697-707. doi:10.1111/gcb.13371.
- Macgregor, C.J., M.J.O. Pocock, R. Fox & D.M. Evans (2019): Effects of street lighting technologies on the success and quality of pollination in a nocturnally pollinated plant. *Ecosphere* 10(1):e02550. doi:10.1002/ecs2.2550.
- Mani, A. & G.W. Schwartz (2017): Circuit Mechanisms of a Retinal Ganglion Cell with Stimulus-Dependent Response Latency and Activation Beyond Its Dendrites. *Current Biology* 27(4):471-482. doi:10.1016/j.cub.2016.12.033.
- Manfrin, A., G. Singer, S. Larsen, N. Weiß, R.H.A. van Grunsven, N.S. Weiß, S. Wohlfahrt, M.T. Monaghan & F. Hölker (2017): Artificial light at night affects organism flux across ecosystem boundaries and drives community structure in the recipient ecosystem. *Frontiers in Environmental Science* 5:61. doi:10.3389/fenvs.2017.00061.
- Manfrin, A., D. Lehmann, R.H.A. van Grunsven, S. Larsen, J. Syväranta, G. Wharton, C.C. Voigt, M.T. Monaghan & F. Hölker (2018): Dietary changes in predators and scavengers in a nocturnally illuminated riparian ecosystem. *Oikos*. doi:10.1111/oik.04696.
- McLay, L.K., M.P. Green M.P. & T.M. Jones (2017): Chronic exposure to dim artificial light at night decreases fecundity and adult survival in *Drosophila melanogaster*. *Journal of Insect Physiology* 100:15-20. doi:10.1016/j.jinsphys.2017.04.009.
- McLay, L.K., V. Nagarajan-Radha, M.P. Green & T.M. Jones (2018): Dim artificial light at night affects mating, reproductive output, and reactive oxygen species in *Drosophila melanogaster*. *Journal of Experimental Zoology A* 329(8-9):419-428. doi:10.1002/jez.2164.
- Meyer, L.A. & S.M.P. Sullivan (2013): Bright lights, big city: influences of ecological light pollution on reciprocal stream-riparian invertebrate fluxes. *Ecological Applications* 23(6):1322-30.
- Mohar, A., M. Zgmajster, R. Verovnik & B. Skaberne (2014): Nature-friendlier lighting of objects of cultural heritage (churches): Recommendations. LIFE+ Life at Night project in cooperation with the Slovenian National Commission for UNESCO, Ljubljana.
- Oehmke, M.G. (1973): Lunar periodicity in flight activity of honey bees. *Journal of Interdisciplinary Cycle Research* 4:319-335. doi:10.1080/09291017309359395.
- Potts, S.G., J.C. Biesmeijer, C. Kremen, P. Neumann, O. Schweiger & W.E. Kunin (2010): Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution* 25(6):345-353. doi:10.1016/j.tree.2010.01.007.
- Raguso, R.A. & M.A. Willis (2005): Synergy between visual and olfactory cues in nectar feeding by wild hawkmoths, *Manduca sexta*. *Animal Behaviour* 69:407-418. doi:10.1016/j.anbehav.2004.04.015.

- Reidenbach, H.D., K. Dollinger, D. Beckmann, I. Al Ghouz, G. Ott et al. (2014): Blendung durch künstliche optische Strahlung unter Dämmerungsbedingungen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hg) Dortmund, Berlin, Dresden.
- Rich, C. & T. Longcore (2006): Ecological consequences of artificial night lighting. Washington DC: Island Press.
- Scheibe, M.A. (2000): Quantitative Aspekte der Anziehungskraft von Straßenbeleuchtungen auf die Emergenz aus nahegelegenen Gewässern (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, Diptera: Simuliidae, Chironomidae, Empididae) unter Berücksichtigung der spektralen Emission verschiedener Lichtquellen. Dissertation, Johannes Gutenberg-Universität, Mainz.
- Seymore, B.M. (2018): Enlightening butterfly conservation efforts: the importance of natural lighting for butterfly behavioral ecology and conservation. *Insects* 9:22. doi:10.3390/insects9010022.
- Soneira, M. (2013): Anlockwirkung unterschiedlicher Beleuchtungsmittel auf Insekten (Insecta) unter besonderer Berücksichtigung der Köcherfliegen (Trichoptera). Diplomarbeit, Universität Wien.
- Sorhithandhu, S. & R.R. Baker (1979): Celestial orientation by the large yellow underwing moth, *Noctua pronuba*. *Animal Behaviour* 27(3):786–800. doi:10.1016/0003-3472(79)90015-0.
- Spiegel, K., K. Knutson, R. Leproult, E. Tasali & E. van Cauter (2005): Sleep loss: A novel risk factor for insulin resistance and Type 2 diabetes. *J Appl Physiol* 99(5):2008–19. doi:10.1152/jappphysiol.00660.2005.
- Spoelstra, K., R.H.A. van Grunsven, M. Donners, P. Gienapp, M.E. Huigens et al. (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. *Phil Trans R Soc* 370:20140129. doi:10.1098/rstb.2014.0129.
- Stone, E.L., G. Jones & S. Harris (2009): Street Lighting Disturbs Commuting Bats. *Current Biology* 19(13):1123–1127. doi:10.1016/j.cub.2009.05.058.
- Szaz, D., G. Horvath, A. Barta, B.A. Robertson, A. Farkas et al. (2015) Lamp-Lit Bridges as Dual Light-Traps for the Night-Swarming Mayfly, *Ephoron virgo*: Interaction of Polarized and Unpolarized Light Pollution. *PLoS ONE* 10(3):e0121194. doi:10.1371/journal.pone.0121194.
- Thema, J. (2010): Umwelt- und Ressourcenaspekte einer verstärkten Nutzung von Leuchtdioden (LED). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.
- van Geffen, K.G., R.H.A. van Grunsven, J. van Ruijven, F. van Berendse & E.M. Veenendaal (2014): Artificial light at night causes diapause inhibition and sex-specific life history changes in a moth. *Ecol Evol* 4(11):2082–2089. doi:10.1002/ece3.1090.
- van Geffen, K.G., A.T. Groot, R.H.A. van Grunsven, M. Donners, F. Berendse et al. (2015a): Artificial night lighting disrupts sex pheromone in a noctuid moth. *Ecological Entomology* 40:401–408. doi:10.1111/een.12202.
- van Geffen, K.G., E. van Eck, R.A. de Boer, R.H.A. van Grunsven, L. Salis et al. (2015b): Artificial light at night inhibits mating in a geometrid moth. *Insect Conservation and Diversity* 8(3):282–287. doi:10.1111/icad.12116.
- van Langevelde, F., J.A. Ettema, M. Donners, F. Michiel, M.F. WallisDeVries et al. (2011): Effect of spectral composition of artificial light on the attraction of moths. *Biological Conservation* 144(9):2274–2281. doi:10.1016/j.biocon.2011.06.004.
- van Langevelde, F., R.H.A. van Grunsven, E.M. Veenendaal & T.P.M. Fijen (2017): Artificial night lighting inhibits feeding in moths. *Biology Letters* 13(3):20160874. doi:10.1098/rsbl.2016.0874.

- van Langevelde, F., M. Braamburg-Annegarn, M.E. Huigens, R. Groendijk, O. Poitevin et al. (2018): Declines in moth populations stress, the need for conserving dark nights. *Global Change Biology* 24:925–932. doi:10.1111/gcb.14008.
- van Tichelen, P., T. Geerken, B. Jansen, M. Vanden Bosch, V. van Hoof et al. (2007): Final report lot 9: public street lighting. Study for the European Commission DG TREN unit D3.
- Warrant, E.J. & M. Dacke (2011): Vision and Visual Navigation in Nocturnal Insects. *Annual Review of Entomology* 56(1):239-54. doi:10.1146/annurev-ento-120709-144852.
- Warrant, E.J. (2017): The remarkable visual capacities of nocturnal insects: vision at the limits with small eyes and tiny brains. *Phil Trans R Soc* 372(1717). doi:10.1098/rstb.2016.0063.
- White, R.H., R.D. Stevenson, R.R. Bennett & D.E. Cutler (1994): Wavelength and the role of ultraviolet vision in the feeding behaviour of hawkmoths. *Biotropica* 26(4):427-435. doi:10.2307/2389237.
- Wu, J., S. Seregard & P.V. Algere (2006): Photochemical damage of the retina. *Surv Ophthalmol* 51(5):461-481. doi:10.1016/j.survophthal.2006.06.009.

Anschrift der Verfasser:

DI (FH) Stefanie Suchy
Tiroler Umweltschutz, Projektleitung „Helle Not“
Meranerstraße 5
6020 Innsbruck
Österreich
www.hellenot.org
s.suchy@tiroler-umweltschutz.gv.at

Mag. phil. Sebastian Stoll
Dorfstraße 21
6142 Mieders
Österreich
seb.jan.stoll@gmail.com