

**Sibylle Schroer, Benedikt Huggins, Marita Böttcher
und Franz Hölker**

Leitfaden zur Neugestaltung und Umrüstung von Außenbeleuchtungsanlagen

Anforderungen an eine nachhaltige Außenbeleuchtung



Leitfaden zur Neugestaltung und Umrüstung von Außenbeleuchtungsanlagen

Anforderungen an eine nachhaltige Außenbeleuchtung

**Sibylle Schroer
Benedikt Huggins
Marita Böttcher
Franz Hölker**

Titelbild: Beispiele für Überbeleuchtungen in verschiedenen Nachtsituationen: Fußgängerüberweg mit zu heller Leuchtreklame; helle, kalt-weiße und schlecht abgeschirmte Parkplatzbeleuchtung; Spätkauf mit zu heller und kalt-weißer Außenbeleuchtung und Eingangsbereich einer Gastronomie unzureichend ausgeleuchtet, dafür Ausleuchtung der Hausfassade (C.C. Kyba., A. Hänel., A. Lorberth., S. Schroer).

Adressen der Autorinnen und des Autors:

Dr. Sibylle Schroer	Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) Müggelseedamm 310, 12587 Berlin E-Mail: schroer@igb-berlin.de
Benedikt Huggins	Institut für Umwelt- und Planungsrecht Westfälische Wilhelms-Universität Münster Universitätsstr. 14 - 16, 48143 Münster E-Mail: huggins@uni-muenster.de
Marita Böttcher	Bundesamt für Naturschutz Karl-Liebknecht-Str. 143, 04277 Leipzig E-Mail: Marita.Boettcher@bfm.de
PD Dr. Franz Hölker	Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) Müggelseedamm 310, 12587 Berlin E-Mail: hoelker@igb-berlin.de

Fachbetreuung im BfN:

Marita Böttcher	Fachgebiet II 4.2 „Eingriffsregelung, Verkehrswegeplanung“
-----------------	--

Diese Veröffentlichung wird aufgenommen in die Literaturdatenbank „DNL-online“ (www.dnl-online.de).

BfN-Skripten sind nicht im Buchhandel erhältlich. Eine pdf-Version dieser Ausgabe kann unter [http:// www.bfn.de/skripten.html](http://www.bfn.de/skripten.html) heruntergeladen werden.

Institutioneller Herausgeber: Bundesamt für Naturschutz
Konstantinstr. 110
53179 Bonn
URL: www.bfn.de

Der institutionelle Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des institutionellen Herausgebers übereinstimmen.



Diese Schriftenreihe wird unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz Namensnennung – keine Bearbeitung 4.0 International (CC BY - ND 4.0) zur Verfügung gestellt

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.de>).

Druck: Druckerei des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).

Gedruckt auf 100% Altpapier

ISBN 978-3-89624-281-5

DOI 10.19217/skr543

Bonn - Bad Godesberg 2019

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	8
Kastenverzeichnis.....	8
Abkürzungsverzeichnis	9
Vorwort	13
Zusammenfassung	14
1 Teil Einleitung: Über den Leitfaden	19
1.1 An wen ist der Leitfaden adressiert?	19
1.2 Auswirkungen künstlichen Lichts als Umweltproblem	19
1.3 Definition der Lichtverschmutzung	20
1.4 Wie wird Lichtverschmutzung gemessen?	20
1.5 Regelungen durch Industrienormen	23
1.6 Bestehende gesetzliche Regelungen.....	24
1.7 Vorhandene Leitfäden und Empfehlungen	24
2 Teil Auswirkungen von künstlichem Licht.....	26
2.1 Was sind die Vorteile künstlicher Beleuchtung?.....	26
2.2 Was sind die Nachteile künstlicher Beleuchtung?	27
2.2.1 Beeinträchtigung der zirkadianen und saisonalen Rhythmen	28
2.2.2 Beeinträchtigung von Pflanzen.....	30
2.2.3 Beeinträchtigung von Tieren und Lebensräumen	33
2.2.3.1 Der Schutz aquatischer Lebensräume	34
2.2.3.2 Orientierung an der Milchstraße	34
2.2.3.3 Lebensraumbegrenzung durch Licht und Schatten	34
2.2.3.4 Der Staubsaugereffekt	35
2.2.3.5 Auswirkungen auf Insekten	36
2.2.3.6 Auswirkungen auf Amphibien.....	37
2.2.3.7 Auswirkungen auf Fledermäuse	37
2.2.3.8 Auswirkungen auf Vögel	39
2.2.3.9 Auswirkungen auf tagaktive Arten	40
2.2.4 Indirekte Auswirkungen auf Ökosysteme	41
2.2.5 Mögliche Beeinträchtigung des Menschen	43
2.3 Zusammenfassung der Auswirkungen künstlichen Lichts	44
3 Teil Rechtliche Anforderungen an Außenbeleuchtungen.....	45
3.1 Naturschutzrechtliche Pflichten.....	45
3.1.1 Artenschutzrechtliche Zugriffsverbote	45
3.1.1.1 Artenschutzrechtliche Zugriffsverbote	45
3.1.1.2 Artenschutzrechtliches Störungsverbot	47
3.1.1.3 Artenschutzrechtlicher Lebensstättenschutz	48
3.1.2 Allgemeiner Schutz von Natur und Landschaft.....	49
3.1.3 Schutz von Natura 2000-Gebieten	50
3.2 Immissionsschutzrechtliche Pflichten.....	51
3.2.1 Schädliche Umwelteinwirkungen.....	52
3.2.2 Vermeidungspflicht.....	53

3.2.3	Minimierungspflicht.....	53
3.2.4	Schutzlücken.....	54
3.3	Bauplanerische Gestaltungsmöglichkeiten.....	55
3.3.1	Festsetzungsoptionen der Gemeinde.....	55
3.3.2	Pflicht der Gemeinde zur Konfliktbewältigung.....	55
3.4	Sicherheit durch Licht?.....	56
3.4.1	Soziale Sicherheit.....	56
3.4.2	Straßenverkehrssicherungspflichten.....	56
3.4.3	Technische Normen	57
4	Teil Handlungsempfehlungen	59
4.1	Anforderungsprofile als Voraussetzung für Lichtanlagen.....	60
4.2	Beleuchtungsstärke	60
4.2.1	So viel wie nötig und so wenig wie möglich	61
4.2.2	Begrenzung beleuchteter oder selbst leuchtender Flächen	62
4.2.3	Straßenbeleuchtungen: Wahl der niedrigsten Beleuchtungsklasse	63
4.2.4	Vermeidung von ansteigenden Helligkeitsniveaus durch effiziente Beleuchtung	65
4.2.5	Zeitliche Beleuchtungsstärkesteuerung	66
4.2.6	Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen für die Beleuchtungsstärke.....	66
4.3	Abstrahlungsgeometrie	67
4.3.1	Voll abgeschirmte Leuchten für Infrastrukturbeleuchtung	69
4.3.2	Objektbestrahlung von oben nach unten	71
4.3.3	Begrenzung der Lichtemissionen aus Innenraum- und Gewächshausbeleuchtungen	71
4.3.4	Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen für die Abstrahlungsgeometrie.....	72
4.4	Lichtfarbe.....	73
4.4.1	Wahl der Lichtfarbe für die Straßenbeleuchtung.....	73
4.4.2	Vermeidung zu hoher Blaulichtanteile	73
4.4.3	Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen für geeignete Lichtfarben	75
4.5	Planungs- und Entscheidungskriterien	76
4.5.1	Vernetzung von Lebensräumen.....	76
4.5.2	Anforderungen an private Außenbeleuchtungen	77
4.5.3	Umweltbildung.....	78
4.5.4	Verhalten in Konfliktfällen	78
4.5.5	Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen für Entscheidungs- und Planungskriterien.....	79
	Anhang.....	80
	Literaturverzeichnis	85

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Illustration für gute Beleuchtungspraxis der Parameter Abstrahlungsgeometrie, Lichtfarbe und Beleuchtungsstärke in der Straßenbeleuchtung. Illustrationen von Rainer Stock im Auftrag des „Loss of the Night“ Netzwerks LoNNe (EU-COST-Aktion ES1204) © 2016..... 18
- Abbildung 2: Beispiele für unterschiedliche Himmelsaufhellungen abgeleitet aus Fischaufnahme. An zwei Orten wurden Fischaufnahmen des ganzen Himmels gemacht (a), sowie vertikale Ebenen Aufnahmen nach Westen (b) und nach Osten (c). In der oberen Reihe sind RGB-Daten dargestellt (a - c), in der mittleren Reihe die Leuchtdichte in mcd/m^2 (d - f), und in der untersten Reihe die korrelierte Farbtemperatur (CCT) in Kelvin (g - i). Links: Aufnahmen bei klaren atmosphärischen Bedingungen und wenig Lichtverschmutzung im Internationalen Sternenpark Zselic, Ungarn. Rechts: Aufnahmen einer bedeckten Nacht bei leichter Schneedecke im Winter im Internationalen Sternenpark Westhavelland. Deutlich sind die helleren Himmelsbedingungen durch atmosphärische Reflektion im Westhavelland zu erkennen. Aus: JECHOW 2019 (CC by 4.0) 21
- Abbildung 3: Karte für Himmelshelligkeit durch künstliche Aufhellung im Verhältnis zur natürlichen Himmelshelligkeit mit einem angenommenen Wert für natürliche Nachtlandschaften von $174 \mu\text{cd/m}^2$ (oben links) Himmelshelligkeit durch eine modellhafte flächendeckende Umrüstung der Straßenbeleuchtung von Natriumdampfhochdruck auf 4000 Kelvin CCT LED-Beleuchtung ohne Veränderung der Beleuchtungsstärke (oben rechts), nach FALCHI et al. (2016) (CC BY-NC 4.0). Die Werte der mit unterschiedlichen Farben dargestellten Helligkeiten sind in Tabelle 1 dargestellt. Bild unten: Skotopische Leuchtdichten unterschiedlicher Leuchtmittel im Verhältnis zu einer Natrium-Niederdrucklampe (LPS) nach LUGINBUHL et al. (2013) bei klaren atmosphärischen Bedingungen im Zenit. Dargestellte Leuchtmittel sind drei LEDs mit 5100 K, 2400 K und eine 3000 K mit ausgefilterten Wellenlängen unter 500 nm (FLED), eine Metallhalogenlampe mit 4100 K (MH4) und eine Natriumdampf-Hochdrucklampe (HPS) (CC BY-NC-ND 3.0). Illustriert von Catherine Perez Vega..... 22
- Abbildung 4: Licht beeinflusst die „innere Uhr“. Licht ist das wichtigste Signal für die Synchronisation der inneren Uhren. Künstliches Licht in der Nacht kann diese Synchronisation stören. Illustriert von Catherine Perez Vega. 29
- Abbildung 5: Lichtexposition von Wildtieren gemessen an einer nachtaktiven Känguruart, den Tammar-Wallabys (*Macropus eugenii*), innerhalb eines eingezäunten Marinestützpunktes mit Straßenbeleuchtung, aus dem die freilebenden Tiere nicht entweichen konnten und außerhalb im Buschland. Die wildlebenden Tiere trugen Lichtsensoren, die Daten über die Lichtexposition während der Nacht wiedergeben. Durch die Straßenbeleuchtung des Stützpunktes erfuhren die Tiere auf dem Stützpunkt eine um eine Größenordnung höhere Helligkeit während der Nacht, als die Tiere, die in unbeleuchtetem Buschland leben. Dadurch wurden die Helligkeit des Mondes und damit der astronomische monatliche Rhythmus heller Vollmondnächte überstrahlt. Illustriert von Catherine Perez Vega nach Daten von ROBERT et al. (2015). 30

Abbildung 6:	Straßenbäume (Platanen, <i>Platanus × acerifolia</i>), die gegenüber der Straßenleuchten noch komplett belaubt sind, wohingegen die Bäume in den Zwischenräumen schon vollständig entlaubt sind. Aufgenommen im Dezember 2013 von Sabine Frank.	31
Abbildung 7:	Herbst und Frühling an einem Baum. Verfrühte Knospenbildung an japanischer Zierkirsche (<i>Prunus serrulata</i> 'Kanzan') in Berlin im November 2017. Während der Baum noch nicht vollständig entlaubt ist, steht er schon Ende November in Blüte. Foto: Sibylle Schroer.	31
Abbildung 8:	Geringere nächtliche Bestäubung kann zur Abnahme der Biodiversität führen. Nachtfalter verfügen über eine andere Befruchtungsphysiologie als tagaktive Bestäuber. Infolgedessen können an die Befruchtungsphysiologie dieser Nachtschmetterlinge angepasste Wildblumen verloren gehen. Links: Südeuropäischer Nachtschwärmer der seinen Rüssel zur Aufnahme von Nektar nutzt. Foto (Ausschnitt): Sven Haustein (2003). Rechts: Illustration direkter und indirekter Effekte durch Straßenbeleuchtung auf nacht- und tagaktive Bestäuber. Illustriert von Catherine Perez Vega nach KNOP et al. (2017).	33
Abbildung 9:	Unterschiede in Froschaugen durch Helligkeitsadaptation. Links: Verkleinerte Pupillenöffnung in starkem Licht eines Rotaugenlaubfroschs (<i>Agalychnis callidryas</i>). Foto von Carey James Balboa (Wikipedia.en, CC BY-SA 2.0). Rechts: Weite Pupillenöffnung im Nachtlicht eines in Madagaskar endemischen grünen, helläugigen Frosches (<i>Boophis viridis</i>). Foto von Bernard Dupont (CC BY-SA 2.0). Bilder zuletzt abgerufen am 11.04.2019.	34
Abbildung 10:	Illustration möglicher Effekte durch Straßenbeleuchtung am Ufer. Illustriert von Catherine Perez Vega. nach PERKIN et al. (2011).	35
Abbildung 11:	Anziehung von Eintagsfliegen an eine Lichtquelle (links) und ihre beleuchteten Flugbahnen (rechts). Links: „Donaublumen an einer Lampe“. Foto: Imre Potyó (Göd, 2013). Rechts: „Donaublumen in Bewegung“. Foto: Bajomi Bálint (Tahitotfalu, 2013). Abgerufen von Flickr (CC by 2.0). (übersetzt aus dem Ungarischen). Bilder zuletzt abgerufen am 11.04.2019.	35
Abbildung 12:	Zugvogelrouten nächtlich wandernder Arten (Linien) und globale Lichtverschmutzung (gelbe Flächen über schwarzem Hintergrund). Linien verbinden Überwinterungs- und Brutgebiete nachtaktiver wandernder Vogelarten (n = 298). Die Linienfarben stellen die Entfernungen der Routen dar, die kürzer (weiß) oder länger (grau) sind als der gesamte Median der untersuchten Routen darstellt. Vor allem die kürzeren Flugrouten in Amerika und Asien befinden sich größtenteils über stark lichtverschmutzten Gebieten. Aus CABRERA-CRUZ et al. 2018 (CC by 4.0).	40
Abbildung 13:	Lichtverschmutzung in einer italienischen Bucht als Beispiel für den Wandel in den Lichtverhältnissen. Ehemals hellere Wasserflächen, die das natürliche nächtliche Licht reflektieren, erscheinen durch übermäßige Beleuchtung dunkler als Siedlungsgebiete. Foto von Volker Crone.	40
Abbildung 14:	Illustration von zu starker Straßenbeleuchtung (links) und regulierter Straßenbeleuchtung (rechts). Illustrationen von Rainer Stock im Auftrag des „Loss of the Night Netzwerks“ (EU-COST-Aktion ES1204) © 2016.	67

Abbildung 15:	Beispiele für Lichtverteilungskurven. Links: symmetrisch. Mitte: asymmetrisch breit. Rechts: Asymmetrisch tief. Illustriert von Catherine Perez Vega.	68
Abbildung 16:	Räumliche Lichtverteilungen von Straßenleuchten in Winkeln. Links: Kugelleuchte, Mitte: Kofferleuchte, rechts: Kofferleuchte mit Vollabschirmung (full cut off). Illustriert von Catherine Perez Vega.	68
Abbildung 17:	Empfehlungen für die Anstrahlung von Gebäuden und Objekten. Strahler müssen gezielt das Objekt beleuchten und nicht über die Objektgrenzen hinweg strahlen. Es sollte möglichst von oben nach unten beleuchtet werden. Links: Bodenstrahler, der in alle Richtungen strahlt, verursacht Lichtverschmutzung. Mitte: die Objektanstrahlung bleibt in den Grenzen des Objektes. Rechts: Optimal sind Objektstrahler von oben nach unten zu richten. Illustration von Catherine Perez Vega.	71
Abbildung 18:	Illustration von einer Kugelleuchte, ohne Begrenzung des nach oben gerichteten Lichtes (ULR) (links) und abgeschirmter Straßenleuchte, die nur den Infrastrukturbereich mit Gehweg beleuchtet, ohne Abstrahlung auf Wohnräume oder Habitate (rechts). Illustrationen von Rainer Stock im Auftrag des „Loss of the Night“ Netzwerks LoNNe (EU-COST-Aktion ES1204) © 2016.	72
Abbildung 19:	Lichtspektren unterschiedlicher Leuchtmittel, Natriumdampf-Niederdruck (LPS), Natriumdampf-Hochdruck (HPS) und LEDs mit unterschiedlichen Farbtemperaturen. Abbildungen der Spektren von Flagstaff Darksky Coalition (http://www.flagstaffdarkskies.org/for-works/lamp-spectrum-light-pollution).	75
Abbildung 20:	Illustration der Lichtfarbe. Eine kaltweiße Straßenbeleuchtung mit hohem Blauanteil (links) und warmweiße bis bernsteinfarbene Beleuchtung mit geringen Blauanteil (rechts). Illustrationen von Rainer Stock im Auftrag des „Loss of the Night“ Netzwerks LoNNe (EU-COST-Aktion ES1204) © 2016.	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verwendete Farbstufen des Neuen Weltatlas für Himmelshelligkeit des Nachthimmels (FALCHI et al. 2016). Die erste Spalte gibt das Verhältnis zwischen der künstlichen Helligkeit und der natürlichen Hintergrundhelligkeit des Himmels an, die mit einem $174 \mu\text{cd}/\text{m}^2$ angenommen wird. Die zweite Spalte gibt die künstliche Aufhellung des Himmels in $\mu\text{cd}/\text{m}^2$ an; die dritte Spalte gibt die ungefähre (es wird ein natürlicher Hintergrund von $22 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ angenommen) Gesamthelligkeit (mcd/m^2) an; und die vierte und fünfte Spalte geben die Farben an, die in den Karten des Weltatlases verwendet wurden.	23
Tabelle 2:	Typische durch künstliches Licht induzierte Verhaltensreaktionen europäischer Fledermäuse in Bezug auf spezifische Aktivitäten und Lebensräume (n. a. = nicht anwendbar; D. m. = Daten mangelhaft; opportun. = opportunistisch; verändert nach VOIGT et al. 2018).	38
Tabelle 3:	Typische nächtliche Beleuchtungsstärken für verschiedene natürliche und künstliche Beleuchtungsszenarien (nach HÖLKER et al. 2018 und SEIDELMANN 1992).	61
Tabelle 4:	Beleuchtungsklassen nach DIN EN 13201-2 (2016). Die Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten werden nach Formeln der EN 13201-3 und 4 berechnet.	64
Tabelle 5:	Lichtstärkeverteilungsklassen nach EN 13201-2, 2003.	68
Tabelle 6:	Zoneneinstufung nach CIE (2017) und ILP (2011) mit unterschiedlichen Werten für nach oben abgestrahlte Emission (ULR) aller Leuchten einer Lichtanlage.	69

Kastenverzeichnis

Kasten 1:	Was definiert eine gute Beleuchtung?	16
Kasten 2:	Die menschliche visuelle Wahrnehmung	26
Kasten 3:	Auszug eines Artikels der Kölnischen Zeitung am 28. März 1819.	27
Kasten 4:	Ökosystemrelevante direkte Auswirkungen durch künstliche Beleuchtung auf Organismen und in der Folge indirekte Effekte auf Ökosystemebene.	42
Kasten 5:	Die Einschätzungsprärogative	47
Kasten 6:	Das Vorsorgeprinzip	52

Abkürzungsverzeichnis

ABIEG	Amtsblatt Europäische Gemeinschaft
ABIEU	Amtsblatt Europäische Union
AMA	Amerikanische Medizinische Gesellschaft
arcsec ²	Quadratbogensekunde
Art.	Artikel
BArtSchV	Bundesartenschutzverordnung
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BayStrWG	Bayerisches Straßen- und Wegegesetz
BerlStrG	Berliner Straßengesetz
Beschl.	Beschluss
BGH	Bundesgerichtshof
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BT-Drs.	Bundestagsdrucksache
BUG	Backlight-Uplight-Glare
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Schweiz)
BVerwG	Bundesverwaltungsgericht
CCD-Kamera	Charge-coupled Device-Kamera
CCFL	cold cathode fluorescent lamp
CCT	Correlated Color Temperature
cd	Candela
cd/m ²	Candela pro Quadratmeter
cd/km ²	Candela pro Quadratkilometer
cd/klm	Candela pro Kilolumen
CIE	Commission Internationale de L'Eclairage, International Commission of Illumination
CO ²	Kohlendioxid
COST	Cooperation in Science and Technology
CSAPH	Council on Science & Public health
DMSP/OLS	Defense Meteorological Program/Operational Line-Scan System

DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN 5034	Tageslicht in Innenräumen
DOI	Digital Object Identifier
EN	Europäische Norm
EN 12193	Europäische Norm für Sportstättenbeleuchtung
EN 13201	Europäische Norm für Straßenbeleuchtung
EN 12464	Europäische Norm für Beleuchtung von Arbeitsstätten im Freien
EU-Cost	European Cooperation in Science and Technology
F&E	Forschung und Entwicklung
FLED	Flächen-LED
FNL	DIN-Normenausschuss Lichttechnik
FFH-RL	Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie
FKZ	Forschungskennzahl
G-Index	Gamut Index
GK-BImSchG	Gemeinschaftskommentar zum Bundesimmissionsschutzgesetz
GOBO-	Graphical optical blackout
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
HPS	(High Pressure Sodiumlights), Natriumdampf-Hochdruck-Lampe
IDA	International Dark Sky Association
IES	Illuminating Engineering Society
ILP	Institution of Lightening Professionals
IR-Strahlung	Infrarot-Strahlung
ISO	Internationale Organisation für Normung, (International Organization for Standardization)
ISO 9689	Zahnheilkunde — Behandlungsleuchten
IUCN	International Union for Conservation of Nature
JRC	Joint Research Centre
K	Kelvin
km	Kilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
LAI	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz
LED	Licht emittierende Diode
LiTG	Lichttechnische Gesellschaft
lm	Lumen
lm/W	Lumen pro Watt

LoNNE	Loss of the Night Netzwerk
LPS	Low Pressure Sodium Lamp, Natrium-Niederdruck-Lampe
LVK	Lichtstärkeverteilungskurven
lx	lux
m	Meter
m ²	Quadratmeter
mag	Magnitude
mag/arcsec ²	Magnitude pro Quadratbogensekunde
MAMs	Merkblatt zum Amphibienschutz an Straßen
MAQ	Merkblatt zur Anlage von Querungshilfen von Tieren
MBI. NRW	Ministerialblatt Nordrhein-Westfalen
mcd/m ²	Millicandela pro Quadratmeter
μcd/m ²	Mikrocandela pro Quadratmeter
μmol/m ²	Mikromol pro Quadratmeter
MH 4	Halogen-Metall dampflampe 4 mit 4100 Kelvin
MüKo BGB	Münchener Kommentar zum Bürgerlichen Gesetzbuch
m. w. N.	mit weiteren Nachweisen
n	Anzahl
NABU	Naturschutzbund Deutschland
NBS	Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt
NJW	Neue Juristische Wochenschrift
NJW-RR	Neue Juristische Wochenschrift-Rechtsprechung-Report
nm	Nanometer
NuR	Zeitschrift für Natur und Recht
NVwZ	Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht
NZV	Neue Zeitschrift für Verkehrsrecht
O ₂	Sauerstoff
OLG	Oberlandesgericht
OVG	Oberes Verwaltungsgericht
§ x Abs. x Gesetz	Paragraph x Absatz x Gesetz
§ x Abs. x Nr. x Gesetz	Paragraph x Absatz x Nummer x Gesetz
§ x Abs. x S. x Gesetz	Paragraph x Absatz x Satz x Gesetz
PC-Amber	Phosphor converted amber
RGB	Rot Grün Blau
RL	Richtlinie

Rn	Randnummer
St. Rspr. BGH	Ständige Rechtsprechung Bundesgerichtshof
StrG BW	Straßengesetz Baden-Württemberg
SQM	Sky Quality Meter
StVO	Straßenverkehrsordnung
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungsverordnung
TA-Licht	Technische Anweisung Licht
Tess-Photometer	Telescope Encoder and Sky Sensor Photometer
TI	Threshold increment
UV	Ultraviolett
UV-A	Ultraviolettstrahlung mit einer Wellenlänge zwischen 320 und 400 Nanometern
UNEP	United Nations Environment Programme
ULR	upward light ratio
Urt.	Urteil
UV-Strahlung	Ultraviolett-Strahlung
VO (EG)	Verordnung der Europäischen Gemeinschaft
VwV	Verwaltungsvorschrift
W	Watt
WIFI	Wireless Fidelity
III ZR	Dritter Zivilsenat des Bundesgerichtshofs

Vorwort

Nächtliche Beleuchtung soll Menschen im öffentlichen Raum Sicherheit vermitteln und vor Unfällen schützen sowie das gesellschaftliche Leben in den Abendstunden fördern. Aber Licht beeinflusst auch unsere Umwelt, denn Lichtimmissionen verändern nicht nur unsere Wahrnehmung der Nachtlandschaft, sie haben auch vielfältige und vor allem negative Auswirkungen auf Tiere, Pflanzen und nicht zuletzt auf den Menschen. Vergegenwärtigt man sich, dass 60 % aller Insektenarten und immerhin auch 30 % aller Säugetierarten dämmerungs- und/oder nachtaktiv sind, so wird deutlich, dass die Veränderungen der Lichtverhältnisse Auswirkungen auf die biologische Vielfalt nach sich ziehen können. So werden z. B. nachtaktive Schmetterlinge desorientiert und können daher ihrer Funktion als Bestäuber für bestimmte Pflanzenarten nicht nachkommen.

Nach bisherigem Kenntnisstand ist eine an ökologischen und technischen Gegebenheiten ausgerichtete Lichtplanung in Städten und Kommunen die Ausnahme. Dass Lichtplanung nicht nur in Städten, sondern auch für die Erhaltung unserer Nachtlandschaften in der Normallandschaft erforderlich ist, wird nicht zuletzt daran deutlich, dass die Erhellung der Nachtlandschaften global um 2 – 6 % jährlich zunimmt. Deutschland macht hier keine Ausnahme. So nahm die Beleuchtung der Nachtlandschaft zwischen 2012 und 2016 beispielsweise in Hamburg um 29 % und in Bayern sogar um 35 % zu. Wie nicht anders zu erwarten, werden auch Schutzgebiete trotz der Einrichtung von Pufferzonen durch künstliches Licht beeinträchtigt, weil z. B. Lichtglocken von Städten über viele Kilometer hin wirksam sind und viele Schutzgebiete wiederum in der Nähe menschlicher Siedlungen liegen.

Doch die Vermeidung oder Verminderung von Beeinträchtigungen durch Licht ist schon heute konstruktiv und kosteneffizient möglich. Dazu soll der vorliegende Leitfaden dienen. Er wendet sich vor allem an Kommunen, Licht-, Landschafts-, Stadt- und Regionalplanerinnen und -planer. Behandelt werden die öffentliche Straßenbeleuchtung, aber auch gewerbliche und private Außenanlagen, insbesondere Lichtwerbung. Im Überblick und auf die praktischen Anforderungen bezogen, werden die Auswirkungen von Lichtimmissionen auf Tiere, Pflanzen und Lebensgemeinschaften sowie auf den Menschen zusammengestellt. Die rechtlichen Rahmenbedingungen sowie sich daraus ergebende Anforderungen werden referiert und auf Fehlinterpretationen, z. B. bei der Handhabung der DIN EN 13201, hingewiesen. Der Leitfaden schließt mit Handlungsempfehlungen für eine flächendeckende, naturschutzfreundlichere und nachhaltigere Lichtgestaltung. Ich hoffe, dass der Leitfaden weit verbreitet und angewendet wird.

Prof. Dr. Beate Jessel

Präsidentin des Bundesamtes für Naturschutz

Zusammenfassung

Dieser Leitfaden für Außenbeleuchtung richtet sich an Kommunen, Licht-, Stadt- und Regionalplanende sowie an Gerichte. Er behandelt vorrangig die öffentliche Straßenbeleuchtung, nimmt aber auch gewerbliche und private Außenbeleuchtungen – insbesondere Lichtwerbungen – mit in den Blick. Die hier beschriebenen Handlungsempfehlungen betreffen gleichermaßen Neuinstallationen oder Umrüstungen von Beleuchtungsanlagen in Normallandschaften und urbanen Gegenden wie auch in Schutzgebieten. Die Handlungsempfehlungen sind wichtige Maßnahmen, um die in diesen Bereichen lebenden Arten, deren Lebensraum und damit die biologische Vielfalt flächendeckend zu schützen. Auch der urbane Bereich bietet vielen Arten Lebensraum. Lichtemissionen von fachlich fehlerhaft installierten oder zu hellen Lichtquellen können weit in die Landschaft hineinwirken und über atmosphärische Reflektion in Form von Lichtlocken weite Landschaftsbereiche erhellen.

Künstliche Beleuchtungen werden für die Zeit nach Einbruch der Dunkelheit als ein besonders wichtiges Gut eingestuft. Trotz bereits ubiquitär vorhandener Beleuchtungsanlagen nimmt der Einsatz von Beleuchtung stetig zu. In der Folge steigen damit die nachteiligen Auswirkungen auf die Umwelt. Die zunehmende Aufhellung der Nachtlandschaft beeinträchtigt die Sinne dämmerungs- und nachtaktiver Tiere, die sich auf die Nachtnische und ihre natürlichen Schwachlichtbedingungen eingestellt haben. Pflanzen können direkt durch Beleuchtung beeinflusst werden und die Vegetation kann durch das veränderte Verhalten von Herbivoren, Frugivoren und Bestäubern verändert werden. Die künstlichen Lichtbedingungen können sich auf die zirkadianen und saisonalen Rhythmen nachteilig auswirken und Lebensgemeinschaften verzerren. Die Auswirkungen auf dämmerungs- und nachtaktive Arten können weiterhin auch die Bedingungen und Lebensgemeinschaften von tagaktiven Arten verändern.

Rechtliche Anforderungen an Beleuchtungen im Außenbereich können sich aus dem Naturschutz-, dem Immissionsschutz-, dem Bauplanungs- und dem Verkehrssicherungsrecht ergeben. Im Naturschutzrecht besteht im Rahmen der Eingriffsregelung zuerst eine Vermeidungspflicht, wonach die hier erarbeiteten Maßnahmen zu ergreifen sind, bis keine erhebliche Beeinträchtigung mehr verbleibt. Allerdings gilt die Eingriffsregelung nur bei Vorhaben im Außenbereich im Sinne des Baugesetzes (§ 35 BauGB) und bei planfeststellungsersetzenden Bebauungsplänen. Gegen das Tötungsverbot (§ 44 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG) verstößt eine Lichtanlage, wenn sie Auswirkungen hervorruft, die ein signifikant erhöhtes Tötungsrisiko für Individuen besonders geschützter Arten verursachen und keine gebotenen Schutzmaßnahmen ergriffen wurden. Daneben kann der Einsatz von Licht gegen das Störungsverbot nach § 44 Abs. 1 Nr. 2 BNatSchG verstoßen, wenn eine erhebliche Störung gegeben ist. Diese ist anzunehmen, wenn mit einer Verschlechterung des Erhaltungszustandes der lokalen Population zu rechnen ist. Schließlich ist die erhebliche Beeinträchtigung von Natura 2000-Gebieten durch Lichtanlagen untersagt (§ 34 Abs. 2 BNatSchG).

Beleuchtungen unterliegen als Lichtanlagen typischerweise keiner immissionsschutzrechtlichen Genehmigungspflicht. Allerdings verpflichtet das Immissionsschutzrecht Betreiberinnen und Betreiber nicht genehmigungspflichtiger Lichtanlagen schädliche Umwelteinwirkungen durch Maßnahmen nach dem Stand der Technik zu vermeiden bzw. zu minimieren. Diese Pflichten gelten für gewerbliche Außenbeleuchtungen, wie etwa Lichtwerbeanlagen, nicht aber für private Haus- und Gartenbeleuchtungen oder für gemeindlich betriebene Straßenbeleuchtungen.

Das Bauplanungsrecht ermöglicht es, der Gemeinde zum Schutz lichtempfindlicher Arten

und Lebensräume sowie zum Schutz des Menschen, die Pflicht zur Durchführung von Vermeidungsmaßnahmen in ihren Bebauungsplänen festzusetzen. Sie ist dazu verpflichtet, wenn im Plangebiet erhebliche Beeinträchtigungen prognostiziert werden und eine Konfliktlösung im späteren Verwaltungsverfahren (z. B. Baugenehmigungsverfahren) realistischerweise nicht erwartet werden kann.

Aus straßenverkehrssicherungsrechtlichen Gesichtspunkten besteht lediglich die Pflicht, Gefahrenlagen so zu beleuchten bzw. entgegenzuwirken, dass Verkehrsteilnehmerinnen und Verkehrsteilnehmer, die ihr Verhalten an die Dunkelheit anpassen, Gefahrensituationen rechtzeitig erkennen können. Eine flächendeckende, d. h. allgemeine Straßenbeleuchtungspflicht, besteht in der Regel nicht. Ebenfalls erzeugen die Beleuchtungsvorgaben technischer Normen (beispielsweise DIN EN 13201) keine Rechtspflichten. Insbesondere stellen die Mindestwerte für Beleuchtungsniveaus keine rechtlich verbindlichen Anforderungen dar.

Mangels expliziter Regelungen für Außenbeleuchtungen werden die Industrienormen in der Praxis aber trotzdem oft wie Rechtsvorschriften behandelt. Die öffentliche Beleuchtung wird zunehmend als notwendige Sicherheitsvorkehrung angesehen. Die von Normen vorgegebenen Beleuchtungsniveaus einzuhalten, ist für Lichtplanende und Kommunen maßgeblich. Vielfach werden sogar die Mindestanforderungen der technischen Normen weit überschritten, um eventuelle Schadensersatzansprüche auszuschließen und dem Vorwurf vorzubeugen, dass die Straßenbeleuchtung nicht dem Stand der Technik genügt. Dies kann dazu führen, dass sich europäische Nachtschaften rasant erhellen werden (FALCHI et al. 2016), denn die Beleuchtung in vielen Kommunen mit alten Beleuchtungstechnologien entspricht nicht den Mindestanforderungen der Normen und deren Helligkeitsniveau müsste folgerichtig angehoben werden.

Der heutige Trend zu effizienter, kaltweißer bis neutralweißer Beleuchtung ohne Begrenzung der Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte oder Abstrahlungsgeometrie (in den oberen Halbraum oder in die Horizontale) kann gegen das Naturschutzrecht, insbesondere das Artenschutz- und FFH-Recht (Flora-Fauna-Habitat), verstoßen. Denn statt Stromeinsparungen sind Erhellung der Nachtschaften und Rebound-Effekte zu erwarten, die daraus resultieren, dass Leuchtmittel günstiger werden und daher der Konsum und das Helligkeitsniveau steigt (HÖLKER et al. 2010A, KYBA et al. 2014). Ein transparenter, langjähriger Vergleich des Stromverbrauchs für unterschiedliche Beleuchtungslösungen würde diesem Trend entgegenwirken. Auch könnten die Normen (z. B. DIN-Normen) optimiert werden, indem andere Disziplinen, insbesondere die Chronobiologie und die Ökologie, stärker berücksichtigt werden. Dies wiederum wäre förderlich für zukünftige Investitionen in die Forschung und Entwicklung transdisziplinärer nachhaltiger Beleuchtungslösungen.

Die Vermeidung oder Minimierung von Beeinträchtigungen künstlicher Beleuchtung ist möglich. Viele der vorgestellten Maßnahmen sind einfach und kostengünstig umsetzbar. Allerdings ist zu erwarten, dass der zu investierende Mehraufwand nur geleistet wird, wenn Begrenzungen wie zum Beispiel Grenzwerte, zeitlich und räumlich verbindlich sind. Für einen wirksamen Schutz der biologischen Vielfalt, insbesondere Insekten, sind Politik und Verantwortliche wie zum Beispiel Kommunen sowie Licht-, Stadt- und Regionalplanende aufgerufen, den bewussten Umgang mit künstlichem Licht zu fördern.

Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen

Der hier vorgelegte Leitfaden zur Neugestaltung und Umrüstung von Beleuchtungsanlagen soll Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern helfen, indem Vorgaben an die Beleuchtung im Außenraum konkretisiert und Maximalwerte definiert werden. Dadurch sollen nachteilige Auswirkungen durch Beleuchtungen auf Tiere, Pflanzen und ihre Lebensräume, sowie den Menschen vermieden bzw. minimiert werden. Zudem sollen Hinweise und Maßnahmen für eine nachhaltige, naturschutzfreundliche und effiziente öffentliche Beleuchtung aufgezeigt und damit der fortschreitenden Erhellung der Nachtlandschaften entgegengewirkt werden. Eine Definition für gute Beleuchtungspraxis findet sich in Kasten 1.

Kasten 1: Was definiert eine gute Beleuchtung?

Gute Beleuchtung:

- ist effizient und senkt den Stromverbrauch,
- ist ästhetisch und
- begrenzt Umweltbelastungen auf ein Mindestmaß, indem sie
- die biologische Vielfalt kaum beeinträchtigt und
- den Menschen nur geringfügig stört.

Folgende Maßnahmen sind für die gute fachliche Praxis von Außenbeleuchtungsanlagen allgemein zu berücksichtigen, um nachteilige Auswirkungen auf Wohn- und Lebensräume zu vermeiden oder zu reduzieren und trotzdem die Anforderungen an Sicherheit und Sichtbarkeit zu erfüllen.

Anforderungsprofil

Für Außenbeleuchtungsanlagen sollte ein Anforderungsprofil erstellt werden, worin die nachstehend genannten Parameter abgearbeitet und ein Abweichen ausführlich begründet wird. Ein solches Anforderungsprofil hilft nicht nur in der Planungsphase unnötige Lichtinstallationen zu vermeiden, sondern kann auch in der Entscheidungsphase helfen, die Argumente für oder gegen die Neuinstallation oder Umrüstung einer Lichtanlage transparent darzustellen.

- Es gilt der Grundsatz: So viel wie nötig, so wenig wie möglich.
- Einhaltung von Beleuchtungsstärke- bzw. Leuchtdichtemaxima je nach Nutzungsart, -dauer und -auslastung (z. B. angelehnt an das vorherrschende Verkehrsaufkommen) und in Bezug zu den jeweiligen örtlichen Umweltbedingungen.
- Beleuchtungsstärken in Straßenbeleuchtungsnormen, wie beispielsweise der EN 13201, müssen evaluiert und wissenschaftlich gerechtfertigt werden. Denn:
 - Die aktuellen Beleuchtungsstärken in Europa liegen oft unter den Minimalwerten der EN 13201, obwohl sie den Sicherheitsanforderungen genügen.
 - Der Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß würde sich mit einer flächendeckenden Umsetzung der Minimalanforderungen der technischen Norm drastisch erhöhen, bzw. die potenziellen Energieeinsparungen bei Umrüstungen auf effiziente Leuchtmittel (LED) würden marginalisiert, was den Klimaschutzzielen zuwiderläuft.

- Die Aufhellung der Nachtlandschaften wirkt sich nachteilig auf Lebensraum und biologische Vielfalt aus.
- Für beleuchtete oder selbstleuchtende Flächen werden in naturnahen, schützenswerten Nachtlandschaften maximale Leuchtdichten von 1 - 2 cd/m² empfohlen. In urbanen Bereichen können für kleinere Flächen unter 10 m² bis zu 100 cd/m² zugelassen werden. Größere Flächen, über 10 m² sollten auch in urbanen Bereichen auf eine Leuchtdichte von maximal 5 cd/m² begrenzt werden.
- Leuchtpunkte und -flächen der privaten oder gewerblichen Beleuchtung dürfen nicht das Maximum der erforderlichen Beleuchtungsstärke der öffentlichen Beleuchtung überschreiten, um einem Wettrüsten entgegenzuwirken. Regionale Lichtkonzepte sollten Maximalwerte für Lichtemissionen, gemessen im installierten Lichtstrom (Lumen) pro Nutzungsquadratmeter, aufnehmen.

Abstrahlungsgeometrie:

- Die Abstrahlung in den oberen Halbraum ist möglichst zu vermeiden. Empfohlen wird, die Abstrahlung in den Himmel für sämtliche Außenbeleuchtungen so gering wie möglich zu halten und in naturnahen Räumen auf null Prozent (ULR = 0) zu begrenzen.
- Auch horizontal abstrahlendes Licht ist zu vermeiden, da es Wohn- und Lebensräume beeinträchtigt und Blendungen verursachen kann.
- Fassadenbeleuchtungen sind nach unten auszurichten und Bodeneinbauleuchten, die das Licht nach oben abstrahlen, zu vermeiden.

Lichtfarbe

- Ultraviolette (UV-) und Infrarote (IR-) Strahlung können vom Menschen nicht visuell wahrgenommen werden. Deshalb sollten die eingesetzten Leuchtmittel keine UV- und IR-Strahlungen emittieren. Gegebenenfalls sind Filter zu verwenden.
- Kaltweißes Licht mit hohem Blauanteil (Wellenlängen unter 500 nm und Farbtemperaturen über 3000 Kelvin) ist als Außenbeleuchtung aus folgenden Gründen zu vermeiden:
 - Das zirkadiane System von Säugetieren und Menschen reagiert auf blaues Licht besonders empfindlich.
 - Blaues Licht übt ebenso wie UV-Licht eine hohe Attraktion auf die meisten Fluginsekten aus.
 - Blaues Licht wird in der Atmosphäre stärker als andere Lichtfarben gestreut und hat daher einen größeren Einfluss auf Lichtglocken, welche die Umgebung weiträumig erhellen.
- Die Lichtfarbe sollte nicht allein, sondern immer im Kontext mit der Beleuchtungsstärke und der Abstrahlungsgeometrie betrachtet werden.

Planungs- und Entscheidungskriterien

- Die Planungs- und Entscheidungskriterien für die Genehmigung von Außenbeleuchtungsanlagen müssen transparent gestaltet sein und öffentlich zur Verfügung stehen. Dies beinhaltet u. a. das Vorliegen einer Begründung für die Beleuchtung und deren Parameter, die Wahl einer geeigneten Abstrahlungsgeometrie und Beleuchtungsstärke.
- Die Schutzanforderungen stehen in Abhängigkeit zu den spezifischen Konditionen der umgebenden Lebensräume. Das bedeutet, dass besonders hohe Anforderungen an Bereiche gestellt werden müssen, die sich als Habitate für lichtempfindliche Arten eignen. Dies erfordert aber auch die Berücksichtigung nachteiliger Auswirkungen von Beleuchtung aus urbanen Gegenden. Denn die atmosphärische Verteilung des Lichts in Form von Lichtglocken beeinträchtigt entferntere Naturlandschaften und kann dort ebenfalls die Bedingungen in diesen Lebensräumen verschlechtern.
- Für die Akzeptanz der Beleuchtungskriterien in der Bevölkerung ist Umweltbildung eine notwendige Voraussetzung. Daher ist es zu empfehlen, diese auf kommunaler Ebene zu fördern.
- Für den Umgang mit Beleuchtungskonflikten wird eine analytische Darstellung der Beleuchtungssituation und der möglichen Perspektiven nach MEIER (2019) empfohlen.



Abbildung 1: Illustration für gute Beleuchtungspraxis der Parameter Abstrahlungsgeometrie, Lichtfarbe und Beleuchtungsstärke in der Straßenbeleuchtung. Illustrationen von Rainer Stock im Auftrag des „Loss of the Night“ Netzwerks LoNNe (EU-COST-Aktion ES1204) © 2016.

1 Teil Einleitung: Über den Leitfaden

Der Leitfaden ist entstanden aus dem F&E-Vorhaben „Analyse der Auswirkungen künstlichen Lichts auf die Biodiversität, Bestimmung von Indikatoren für die Beeinträchtigung und Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Vermeidung negativer Effekte im Rahmen von Eingriffen“, FKZ 3514821700. Das Projekt befasste sich mit den Fragen, welche Auswirkungen durch Beleuchtung auf einzelne Tiergruppen zu erwarten sind, wie sich das veränderte Verhalten einzelner Organismen auf Ökosysteme auswirken kann und welche Beleuchtungslösungen die negativen Auswirkungen auf Flora, Fauna und Habitat verringern könnten (SCHROER et al. in Vorber.).

1.1 An wen ist der Leitfaden adressiert?

Dieser Leitfaden richtet sich an Kommunen, an Licht-, Stadt- und Regionalplanende sowie an Gerichte. Er soll die Entwicklung kommunaler Planungen durch Bebauungspläne und Satzungen unterstützen, sowie fachliche Entscheidungshilfen für Planfeststellungsbeschlüsse in Bezug auf Straßen bieten. Der Leitfaden soll der fachlichen und rechtlichen Unterstützung und Überprüfung von bestehenden und zu erarbeitenden Lichtsatzungen, -konzepten bzw. Lichtmasterplänen dienen und für die Rechtsprechung in Belangen des Arten- und Habitatschutzes als sachverständige Beurteilungshilfe Anwendung finden. Der Leitfaden befasst sich vorrangig mit der öffentlichen Straßenbeleuchtung, nimmt aber zusätzlich private Außenbeleuchtungen – insbesondere Lichtwerbungen – mit in den Blick. Es werden Kriterien für die gute fachliche Praxis beschrieben und begründet, Planungs- und Entscheidungskriterien für die Genehmigung von Neuinstallationen oder Umrüstungen von Außenbeleuchtungsanlagen dargestellt und Hinweise zur Lösung von Nutzungskonflikten gegeben. Die Praxistipps ergeben sich aus den Anforderungen für eine bedarfsgerechte und nachhaltige Außenbeleuchtung, insbesondere der Straßenverkehrssicherheit und der bisher in nur geringem Maße berücksichtigten Auswirkungen von Straßenbeleuchtung auf Flora und Fauna und ihre Lebensräume.

1.2 Auswirkungen künstlichen Lichts als Umweltproblem

Die Erhellung der Nachtschaften nimmt global im Jahr um mindestens 2 - 6 Prozent zu (HÖLKER et al. 2010A, KYBA et al. 2017B) und zeigt auch für Deutschland einen beständig zunehmenden Trend. Während in den Jahren 2012 bis 2016 in einigen wenigen Bundesländern sogar ein Rückgang an Himmelsaufhellungen zu verzeichnen war, wie beispielsweise Thüringen (-17 %) und Sachsen-Anhalt (-5,6 %), nahm diese in anderen Bundesländern erheblich zu, wie zum Beispiel in Bayern (+35 %), oder Hamburg (+29 %) (KYBA et al. 2017A). Naturschutzgebiete sind von dieser ansteigenden Erhellung der Nachtschaften nicht ausgenommen (GASTON et al. 2015). GUETTE et al. (2018) weisen sogar darauf hin, dass trotz der Einrichtung von Pufferzonen um Naturschutzgebiete auch die Kernbereiche der Schutzgebiete durch künstliches Licht beeinträchtigt werden. Wichtige Areale mit hoher Biodiversität sind einem immer höheren Druck durch anthropogene Einflüsse ausgesetzt, da die Urbanisierung vor allem in den Grenzgebieten zu Naturschutzarealen immer weiter zunimmt. Künstliches Licht in der Nacht kann Populationen lichtempfindlicher Arten erheblich beeinträchtigen, Lebensräume verschlechtern und Ökosysteme und Ökosystemfunktionen verzerren. Aus diesen Gründen ist eine restriktive gesetzliche Regelung von Außenbeleuchtungen dringend erforderlich.

1.3 Definition der Lichtverschmutzung

Der Begriff „Lichtverschmutzung“ entstand vermutlich in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts (DEGENRING 2015). Lichtverschmutzung bezeichnet alle nachteiligen Auswirkungen auf die Umwelt, die allein durch künstliches Licht verursacht werden (vgl. Anhang II Nr. 3 lit. e Ökodesign-Verordnung). Darunter fallen nachteilige Auswirkungen auf den Menschen, Flora und Fauna sowie Beeinträchtigungen des ästhetischen Erscheinungsbildes von Stadt- und Naturlandschaften und der Sichtbarkeit des Sternenhimmels. RICH & LONGCORE (2006) unterscheiden zwischen „astronomischer Lichtverschmutzung“ und „ökologischer Lichtverschmutzung“. Astronomische Lichtverschmutzung bezeichnet demnach die Überblendung des Nachthimmels durch künstliches Licht. Ökologische Lichtverschmutzung beschreibt die nachteiligen Auswirkungen auf Ökosysteme durch künstliches Licht. Im Rahmen dieses Leitfadens werden unter dem Begriff der Lichtverschmutzung sämtliche nachteilige Auswirkungen künstlichen Lichts verstanden. Der Handlungsleitfaden zielt darauf ab, die ökologischen nachteiligen Auswirkungen durch künstliches Licht zu vermeiden oder zu minimieren sowie eine gute Beleuchtungspraxis zu fördern (siehe Kasten 1). Ungeachtet dessen wirken sich die vorgeschlagenen Maßnahmen in der Regel auch positiv auf den Nachthimmel aus und reduzieren die astronomische Lichtverschmutzung.

1.4 Wie wird Lichtverschmutzung gemessen?

Die Himmelshelligkeit bemisst die Helligkeit der Lichtabstrahlung vom Himmel in Richtung Erde. Diese Lichtabstrahlung kann von natürlichen oder künstlichen Lichtquellen von der Erde in Richtung Himmel ausgehen. Lichttechnisch wird die Himmelshelligkeit als Leuchtdichte gemessen. Diese Messung erfolgt in der astronomischen Einheit Magnitude pro Quadratbogensekunde (mag/arcsec^2), die mit kleineren Werten eine umso hellere Himmelshelligkeit beschreibt. Dieser astronomische Wert wird anhand der visuell wahrnehmbaren Helligkeit sogenannter Standardsterne mit einer logarithmischen Skala ermittelt. Fünf Magnituden machen einen 100-fachen Helligkeitsunterschied aus. Das bedeutet ein Stern erster Magnitude (Größenklasse) mit 1 mag ist genau hundertmal so hell wie ein Stern sechster Größenklasse mit 6 mag. Mit der Quadratbogensekunde (arcsec^2) wird eine Flächeneinheit des Himmels im Winkelmaß beschrieben. Ein natürlich sternenklarer Nachthimmel hat $21,9 \text{ mag/arcsec}^2$, die Milchstraße ist ab etwa $20,5 \text{ mag/arcsec}^2$ sichtbar. In hellen Großstädten liegt die Himmelshelligkeit bei $16 - 17 \text{ mag/arcsec}^2$. Die Himmelshelligkeit ist damit in Großstädten um die 100-mal heller als der natürliche Nachthimmel (HÄNEL et al. 2018).

Die Messungen können mit verschiedenen Messgeräten durchgeführt werden. Für einfache Messungen ist das Sky Quality Meter, kurz SQM (Himmelsqualitätsmesser) der kanadischen Firma Unihedron ein Messgerät in der Größe einer Zigarettenschachtel, das die Himmelshelligkeit in mag/arcsec^2 misst. Das TESS-Photometer, das von der Universität Complutense de Madrid kürzlich entwickelt wurde, lässt sich via WIFI verbinden und sendet darüber automatisch die Daten der Himmelshelligkeit an ein wachsendes globales Netzwerk (Tess Photometer).¹

¹ Für diese Messungen gibt es auf dem Markt derzeit nur die genannten Instrumente von diesen beiden Herstellern. Im Sinne der Nachvollziehbarkeit und Auffindbarkeit werden daher ausnahmsweise beide Hersteller genannt.

Für Messungen können auch digitale bildgebende Empfänger wie Spiegelreflexkameras oder CCD-Kameras eingesetzt werden. Mit einem Fischaugenobjektiv lässt sich veranschaulichen, wie die HimmelsHELLigkeit über den gesamten Himmel verteilt ist und wo störende Lichtquellen zu finden sind. Mit der Hilfe spezieller Software kann die HimmelsHELLigkeit aus den Bildern in Leuchtdichten (in mag/arcsec^2 oder photometrischer Einheit cd/m^2) angegeben werden (JECHOW et al. 2017, 2019, HÄNEL et al. 2018), (Abbildung 2).

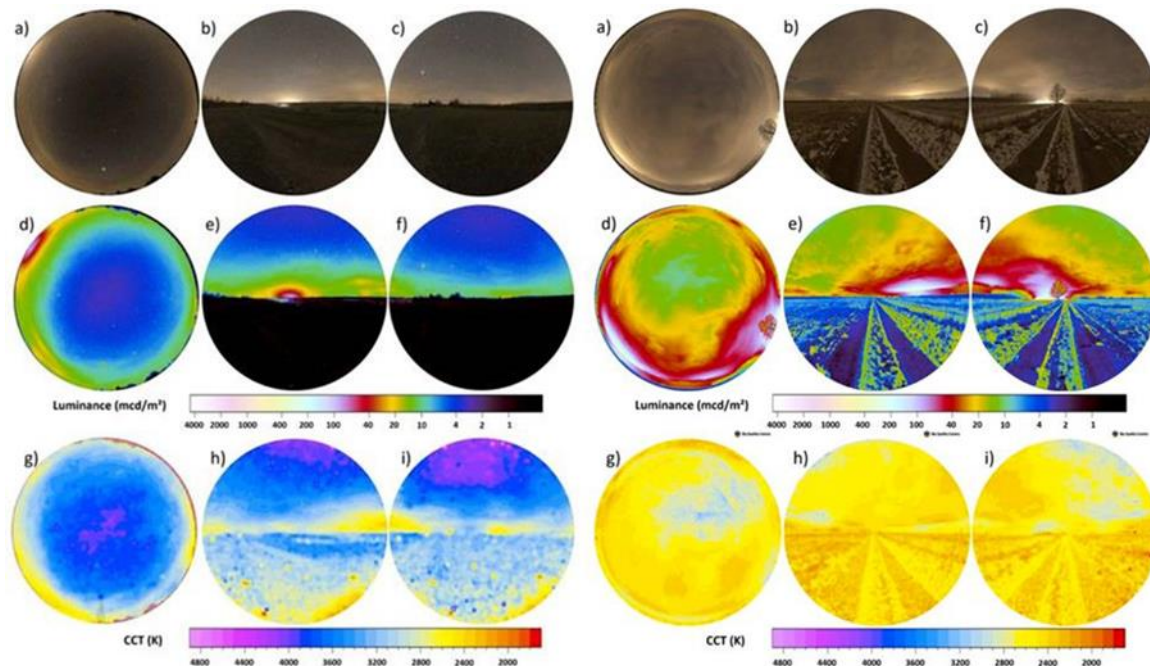


Abbildung 2: Beispiele für unterschiedliche Himmelsaufhellungen abgeleitet aus Fischaugenaufnahme. An zwei Orten wurden Fischaugenaufnahmen des ganzen Himmels gemacht (a), sowie vertikale Ebenen Aufnahmen nach Westen (b) und nach Osten (c). In der oberen Reihe sind RGB-Daten dargestellt (a - c), in der mittleren Reihe die Leuchtdichte in mcd/m^2 (d - f), und in der untersten Reihe die korrelierte Farbtemperatur (CCT) in Kelvin (g - i). Links: Aufnahmen bei klaren atmosphärischen Bedingungen und wenig Lichtverschmutzung im Internationalen Sternenpark Zselic, Ungarn. Rechts: Aufnahmen einer bedeckten Nacht bei leichter Schneedecke im Winter im Internationalen Sternenpark Westhavelland. Deutlich sind die helleren Himmelsbedingungen durch atmosphärische Reflektion im Westhavelland zu erkennen. Aus: JECHOW 2019 (CC by 4.0)

Alle erhobenen Daten zur HimmelsHELLigkeit können auf globalen Datenbanken gesammelt und öffentlich zur Verfügung gestellt werden, beispielsweise auf dem neu eingerichteten TESS-Photometer-Netzwerk (<http://tess.stars4all.eu/map>) oder der bürgerwissenschaftlichen Webseite „my sky at night“ (Mein Himmel in der Nacht) (<http://www.myskyatnight.com>). Diese Daten werden für die Entwicklung von Weltkarten genutzt, welche die Aufhellung des Nachthimmels darstellen (z. B. FALCHI et al. 2016). In Modellen wurde weiterhin berechnet, wie sich eine Umrüstung auf moderne, effiziente Leuchtmittel auswirken könnte, wenn bei der Umrüstung nicht auf die Parameter Abstrahlungsgeometrie, Lichtfarbe und Beleuchtungsstärke geachtet wird (Abbildung 3).

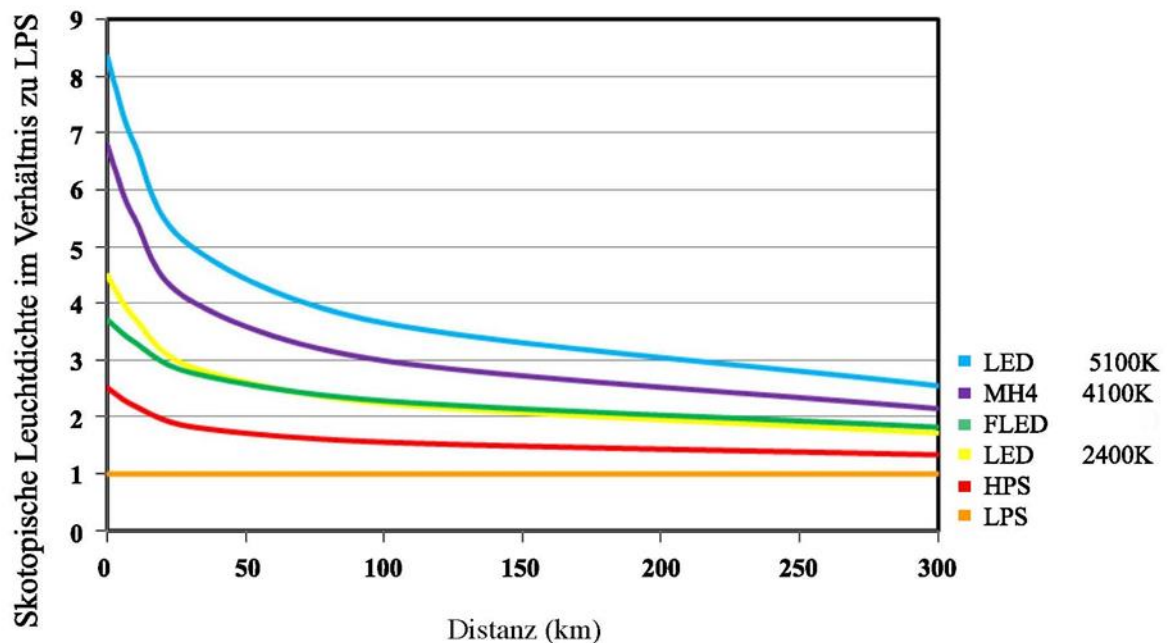
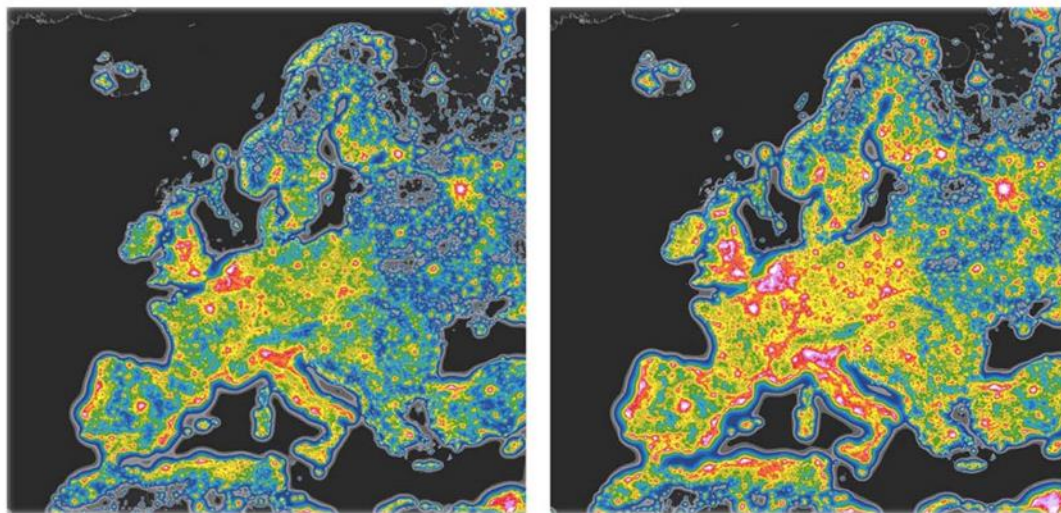


Abbildung 3: Karte für Himmelshelligkeit durch künstliche Aufhellung im Verhältnis zur natürlichen Himmelshelligkeit mit einem angenommenen Wert für natürliche Nachtlandschaften von $174 \mu\text{cd}/\text{m}^2$ (oben links) Himmelshelligkeit durch eine modellhafte flächendeckende Umrüstung der Straßenbeleuchtung von Natriumdampfhochdruck auf 4000 Kelvin CCT LED-Beleuchtung ohne Veränderung der Beleuchtungsstärke (oben rechts), nach FALCHI et al. (2016) (CC BY-NC 4.0). Die Werte der mit unterschiedlichen Farben dargestellten Helligkeiten sind in Tabelle 1 dargestellt. Bild unten: Skotopische Leuchtdichten unterschiedlicher Leuchtmittel im Verhältnis zu einer Natrium-Niederdrucklampe (LPS) nach LUGINBUHL et al. (2013) bei klaren atmosphärischen Bedingungen im Zenit. Dargestellte Leuchtmittel sind drei LEDs mit 5100 K, 2400 K und eine 3000 K mit ausgefilterten Wellenlängen unter 500 nm (FLED), eine Metallhalogenlampe mit 4100 K (MH4) und eine Natriumdampf-Hochdrucklampe (HPS) (CC BY-NC-ND 3.0). Illustriert von Catherine Perez Vega.

Tabelle 1: Verwendete Farbstufen des Neuen Weltatlas für Himmelshelligkeit des Nachthimmels (FALCHI et al. 2016). Die erste Spalte gibt das Verhältnis zwischen der künstlichen Helligkeit und der natürlichen Hintergrundhelligkeit des Himmels an, die mit einem $174 \mu\text{cd}/\text{m}^2$ angenommen wird. Die zweite Spalte gibt die künstliche Aufhellung des Himmels in $\mu\text{cd}/\text{m}^2$ an; die dritte Spalte gibt die ungefähre (es wird ein natürlicher Hintergrund von $22 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$ angenommen) Gesamthelligkeit (mcd/m^2) an; und die vierte und fünfte Spalte geben die Farben an, die in den Karten des Weltatlases verwendet wurden.

Verhältnis zur natürlichen Helligkeit	Künstliche Aufhellungen ($\mu\text{cd}/\text{m}^2$)	Ungefähre Gesamthelligkeit (mcd/m^2)	Farbe	
<0.01	<1.74	<0.176	Schwarz	
0.01–0.02	1.74–3.48	0.176–0.177	Dunkelgrau	
0.02–0.04	3.48–6.96	0.177–0.181	Grau	
0.04–0.08	6.96–13.9	0.181–0.188	Dunkelblau	
0.08–0.16	13.9–27.8	0.188–0.202	Blau	
0.16–0.32	27.8–55.7	0.202–0.230	Hellblau	
0.32–0.64	55.7–111	0.230–0.285	Dunkelgrün	
0.64–1.28	111–223	0.285–0.397	Grün	
1.28–2.56	223–445	0.397–0.619	Gelb	
2.56–5.12	445–890	0.619–1.065	Orange	
5.12–10.2	890–1780	1.07–1.96	Rot	
10.2–20.5	1780–3560	1.96–3.74	Magenta	
20.5–41	3560–7130	3.74–7.30	Pink	
>41	>7130	>7.30	Weiß	

1.5 Regelungen durch Industrienormen

Beleuchtungen des öffentlichen Raumes sind gesetzlich nicht ausdrücklich geregelt. Dagegen existieren Europäische Normen, wie zum Beispiel die Europäische Norm für Straßenbeleuchtungen (EN 13201), für Beleuchtung von Arbeitsstätten im Freien (EN 12464-2) oder für Sportstättenbeleuchtungen (EN 12193).

Obwohl die Normen keine Pflichten im Rechtssinne begründen, werden sie von Kommunen und Planenden oft aus Angst vor Schadensersatzansprüchen wie rechtlich bindende Vorgaben behandelt und entsprechend eins zu eins umgesetzt oder sogar überinterpretiert. Allerdings können sich aus der Nichteinhaltung technischer Normen keine Schadensansprüche ergeben. Lediglich aus einer Verletzung der Straßenverkehrssicherungspflichten können sich Ansprüche ergeben, wenn Gefahrenstellen nicht hinreichend gekennzeichnet bzw. beleuchtet sind. Entsprechend begründet das Unterschreiten der durch die DIN EN 13201 vorgegebenen Beleuchtungsniveaus zwar weder eine Haftung noch einen Rechtsverstoß, jedoch kann das Einhalten der Beleuchtungsniveaus den Vorwurf ausschließen, dass die Straßenbeleuchtung nicht dem Stand der Technik genügt. Aus diesem Grund werden die Vorgaben an die öffentliche Beleuchtung durch die DIN EN 13201 derzeit von Lichtplanenden und Kommunen häufig als maßgeblich betrachtet. Dies kann in naher Zukunft dazu führen, dass sich die europäischen Nachtlandschaften rasant erhellen. Grund dafür ist, dass bislang nur wenige Kommunen mit alten Beleuchtungstechnologien das durch die Normung empfohlene Helligkeitsniveau erreichen. Bei einer Umrüstung droht dann eine deutliche Steigerung des Helligkeitsniveaus. Außerdem führt der europaweite Trend zu effizienter, weißer Beleuchtung oft nicht zu den erwarteten Stromeinsparungen,

sondern vielmehr zu einer Erhellung der Nachtlandschaften (TSAO et al. 2010, KYBA et al. 2017B). Effiziente Leuchten strahlen mehr Lichtstrom (Menge sichtbaren Lichtes) bei gleicher elektrischer Leistung aus und in der Folge werden viele Orte durch Umrüstung auf LED-Beleuchtung deutlich heller, wenn nicht geeignete Beleuchtungsstärkeregelungen vorgesehen werden. Nur in seltenen Fällen wird für die Umrüstungsplanung eine kontextspezifische Analyse der Stromersparnis durch die Umstellung auf LED-Beleuchtung im Vergleich zu anderen modernen Beleuchtungsalternativen (zum Beispiel moderne Gasentladungslampen mit langer Lebensdauer und Beleuchtungsstärkeregelung) durchgeführt. Da viele Kommunen vorab keine Messungen des Helligkeitsniveaus durchgeführt haben oder durchführen, kann zudem in der Regel kein Vergleich zu dem vorherigen Beleuchtungsstärkeniveau gezogen werden.

1.6 Bestehende gesetzliche Regelungen

Künstliches Licht gehört ebenso wie Luftverunreinigungen, Geräusche u. a. zu Immissionen i. S. d. Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG). Entsprechend finden auf Lichtimmissionen die Regelungen des Bundesimmissionsschutzgesetzes Anwendung. Das sind insbesondere die Betreiberpflichten (§§ 5, 22 BImSchG). Spezifische, Licht betreffende Regelungen bestehen indes nicht. Ähnliches gilt für das Naturschutzrecht, was maßgeblich im Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) geregelt ist. Besondere auf Lichtimmissionen ausgerichtete Regelungen existieren derzeit nicht. Sofern aber künstliches Licht nachteilige Auswirkungen auf geschützte Rechtsgüter hervorruft, sind die jeweiligen Schutzvorschriften des Bundesnaturschutzgesetzes anwendbar. Dazu zählen die artenschutzrechtlichen Zugriffsverbote (§ 44 Abs. 1 BNatSchG) und die Regelungen zum allgemeinen und besonderen Gebietsschutz. Als bislang einzige länderspezifische gesetzliche Regelung hat Baden-Württemberg Skybeamer im Außenbereich mit einem Verbot belegt. Abgesehen davon hat Nordrhein-Westfalen einen Runderlass zur Messung, Beurteilung und Verminderung nachteiliger Auswirkungen künstlichen Lichts erlassen (MBL NRW 2015, S. 7129). Das Land Hessen hat Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Beleuchtung und das Land Brandenburg Lichtleitlinien veröffentlicht. Diesen Handlungsleitlinien zugrunde liegen die Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen, die von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) erarbeitet und 2014 mit Hinweisen für Maßnahmen zum Schutz von Insekten aktualisiert wurden. Die Hinweise der LAI sind zwar nicht rechtsverbindlich, werden jedoch in Gerichtsentscheidungen bei der Anwendung der Normen als sachverständige Beurteilungshilfe herangezogen.

1.7 Vorhandene Leitfäden und Empfehlungen

Derzeit gibt es einige Leitfäden und Empfehlungen zum fachgerechten Umgang mit künstlichem Licht. Dazu zählt der vom Joint Research Centre (EU-Kommission) herausgegebene technische Report (Revision of the EU Green Public Procurement Criteria for Road Lighting and traffic signals), (DONATELLO et al. 2019), der sich mit der öffentlichen Beschaffung von Straßenbeleuchtung und Verkehrssignalen befasst. Ebenso liegen mehrere regionale Publikationen vor, die Handlungsanleitungen für umweltschonende Außenbeleuchtungslösungen bieten. Diese Leitfäden enthalten immer deutlichere Hinweise auf unterschiedliche Maßnahmen, um Beleuchtungen nicht nur effizient, sondern auch umweltschonend zu gestalten. Allerdings fehlen in den Leitfäden und Empfehlungen weitestgehend Darstellungen zu den kontextbezogenen Umweltauswirkungen. Diese sind aber notwendig, um passende Beleuchtungslösungen entsprechend der umgebenden Landschaft zu bestimmen und die Beleuchtung an den vorfindlichen Lebensraum und das Artenspektrum anzupassen. Der vorliegende Leitfaden stellt daher den Stand der Forschung über nachteilige Auswirkungen

durch künstliche Lichtimmissionen auf die Umwelt dar, konkretisiert die rechtlichen Grundlagen für den Umgang mit diesen Auswirkungen von Außenbeleuchtungen und formuliert Leitlinien für die gute fachliche Praxis, die als Entscheidungs- und Planungskriterien für die Genehmigung von Neuinstallationen oder Umrüstungen von Außenbeleuchtungen genutzt werden können.

2 Teil Auswirkungen von künstlichem Licht

2.1 Was sind die Vorteile künstlicher Beleuchtung?

Beleuchtungen sind notwendig, um auch nach Einbruch der Dunkelheit sehen zu können und dadurch Wohlbefinden, Sicherheit und Orientierung zu erhöhen sowie Unfälle zu vermeiden. Generell können künstliche Beleuchtungen die Aktivität im Außenraum nach Einbruch der Dunkelheit erleichtern, obwohl unsere Augen in schlechten Lichtbedingungen deutlich verminderte Sehleistungen erbringen (siehe Kasten 2).

Kasten 2: Die menschliche visuelle Wahrnehmung

Das menschliche Auge hat sich an die Lichtverhältnisse des Tages angepasst und kann unter diesen Bedingungen Farben unterscheiden und schnell auf Helligkeitsunterschiede reagieren. Unter dunklen Lichtverhältnissen, zum Beispiel in der Nacht, können die Zapfen in der Netzhaut des Auges, die das Farbsehen ermöglichen, nicht genügend Photonen aufnehmen. In diesem Fall ermöglichen die Stäbchen das Sehen. Stäbchen sind gegenüber Helligkeitsunterschieden sehr empfindlich, können aber Farben kaum wahrnehmen. Die maximale Empfindlichkeit haben die Stäbchen im blaugrünen Spektralbereich (498 nm). Deshalb erscheinen blaue Objekte im Dunkeln heller als rote. Auch ist das Reaktionsvermögen der Stäbchen auf Lichtreize langsamer als das der Zapfen – das Auge benötigt also mehr Zeit, um Objekte im Sichtfeld wahrzunehmen. Der Bereich des skotopischen Sehens, das ist die nächtliche visuelle Wahrnehmung, an der die Stäbchen beteiligt sind, reicht von einer Leuchtdichte von etwa 0,003 cd/m², der untersten Begrenzung für menschliches Sehen, bis ungefähr 0,03 cd/m². Darüber beginnt der mesopische Bereich, der das Sehen bei geringer Helligkeit, z. B. während der Dämmerung in einen Leuchtdichtebereich von etwa 1 bis 30 cd/m² beschreibt. Am mesopischen Sehen sind sowohl die Stäbchen als auch die Zapfen der Netzhaut beteiligt. Bei über 30 cd/m² beginnt die photopische Wahrnehmung, die das Sehen des Farbspektrums von Blau (ca. 390 nm) bis Rot (ca. 700 nm) erlaubt und sich aus den maximalen Empfindlichkeiten Blau (420 nm), Grün (534 nm) und Rot (564 nm) zusammensetzt (HADJIKHANI & TOOTELL 2000).

Künstliches Licht kann zudem Emotionen erzeugen und Orte oder Veranstaltungen „ins rechte Licht rücken“. Dabei ist Licht nicht nur auf Helligkeit zu reduzieren. Licht kann die Psyche des Menschen und damit auch seine Gesundheit und Leistungsbereitschaft beeinflussen. Die Farben des Lichtes können Aktivitäts- oder Gemütlichkeitsempfinden stimulieren, Kälte und Wärmempfinden auslösen, verstärken oder abmildern. Künstliches Licht am Tag kann den Tag-Nacht-Helligkeitsunterschied vergrößern und die Leistungsbereitschaft verbessern.

Aus diesen Gründen ist es nicht verwunderlich, dass künstliche Beleuchtungen überwiegend positiv bewertet und mit Wohlstand und Sicherheit assoziiert werden (HÖLKER et al. 2010). Beleuchtungen unterstützen die menschliche visuelle Wahrnehmung, um in dunklen Räumen Objekte schneller zu erfassen und auf Gefahren zu reagieren. Beleuchtungen können daher in Verkehrsräumen die Sicherheit verbessern und Fußgängern sowie Radfahrern die Möglichkeit der Objekt- und Gesichtserkennung in der Dunkelheit verschaffen. Die am Fahrzeug installierte Beleuchtung verbessert die Kenntlichkeit des Fahrzeugs und hat daher eine hohe Relevanz für den Schutz vor Unfällen (HOQUE 1990). Zudem wird die öffentliche Außenbeleuchtung mit dem Schutz vor Straftaten in Verbindung gebracht. Allerdings konnten statistisch keine signifikanten Unterschiede zwischen beleuchteten und unbeleuchteten Siedlungen bezüglich der Sicherheit und dem Schutz vor Straftaten festge-

stellt werden (MARCHANT 2010, STEINBACH et al. 2015). Die Frage, ob Beleuchtungen sich tatsächlich positiv auf die Kriminalstatistik auswirken, hat allerdings keinen Einfluss auf die Tatsache, dass sich Fußgänger überwiegend sicherer fühlen, wenn eine gleichmäßige Beleuchtung vorhanden ist, die das Farbsehen ermöglicht (PEÑA-GARCÍA et al. 2015). Diese subjektiv empfundene Sicherheit ist wichtig, damit möglichst viele Menschen den öffentlichen Raum auch nach Sonnenuntergang nutzen und Aktivitäten im Außenraum von allen Bevölkerungsgruppen wahrgenommen werden. Künstliches Licht wurde aber nicht immer mit Sicherheit assoziiert. Als die öffentliche Beleuchtung zu Beginn des 19. Jahrhunderts eingeführt wurde, regten sich Zweifel ob der öffentlichen Sicherheit, wie ein Artikel der Kölnischen Zeitung aus dem Jahr 1819 nahelegt (siehe Kasten 3).

Kasten 3: Auszug eines Artikels der Kölnischen Zeitung am 28. März 1819

„Jede Straßenbeleuchtung ist verwerflich“

- 1.) aus theologischen Gründen: weil sie als Eingriff in die Ordnung Gottes erscheint. Noch tiefer ist die Macht zur Finsternis eingesetzt, die nur zu gewissen Zeiten vom Mondlicht unterbrochen wird. Dagegen dürfen wir uns nicht auflehnen, den Weltplan nicht hofmeistern, die Nacht nicht in Tag verkehren wollen; -
- 2.) aus juristischen Gründen; weil die Kosten dieser Beleuchtung durch eine indirekte Steuer aufgebracht werden sollen. Warum soll dieser und jener für eine Einrichtung zahlen, die ihm gleichgültig ist, da sie ihm keinen Nutzen bringt, oder ihn gar in manchen Verrichtungen stört?
- 3.) aus medizinischen Gründen; die Öl- und Gasausdünstung wirkt nachteilig auf die Gesundheit schwachleibiger oder zartherziger Personen, und legt auch dadurch zu vielen Krankheiten den Stoff, indem sie den Leuten das nächtliche Verweilen auf den Straßen leichter und bequemer macht, und ihnen Schnupfen, Husten und Erkältung auf den Hals zieht –
- 4.) aus philosophisch-moralischen Gründen; die Sittlichkeit wird durch Gassenbeleuchtung verschlimmert. Die künstliche Helle verscheucht in den Gemüthern das Grauen vor der Finsternis, das die Schwachen von mancher Sünde abhält. Diese Helle macht den Trinker sicher, daß er in Zechstuben bis in die Nacht hinein schwelgt, und sie verkuppelt verliebte Paare -
- 5.) aus polizeilichen Gründen; sie macht die Pferde scheu und die Diebe kühn –
- 6.) aus staatswirtschaftlichen Gründen; für den Leuchtstoff, Öl oder Steinkohlen, geht jährlich eine bedeutende Summe ins Ausland, wodurch der Nationalreichthum geschwächt wird –
- 7.) aus volksthümlichen Gründen; öffentliche Feste haben den Zweck, das Nationalgefühl zu erwecken. Illuminationen sind hierzu vorzüglich geschikt. Dieser Eindruck wird aber geschwächt, wenn derselbe durch allnächtliche Quasi-Illuminationen abgestumpft wird. Daher gafft sich der Landmann toller in dem Lichtglanz als der lichtgesättigte Großstädter.

2.2 Was sind die Nachteile künstlicher Beleuchtung?

Der Umstand, dass heute Außenbeleuchtungen selbstverständlicher Teil des öffentlichen Lebens sind, darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass künstliches Licht nachteilige Auswirkungen hervorruft. Beispielsweise können Beleuchtungsanlagen neben der gewollten Erhellung von Infrastrukturen und Wohnbereichen gleichzeitig eine Störwirkung in Form von Blendung und Streulicht erzeugen. Die internationale Beleuchtungskommission (CIE) unterscheidet bei Störwirkungen von Außenlichtanlagen zwischen Raumaufhellung und Himmelsaufhellung, sowie zwischen psychologischer Blendung (Beeinträchtigung des Sehkomforts) und physiologischer Blendung (Beeinträchtigung der Sehleistung) (CIE 150:2017).

Die psychologische Blendung wird durch das Blendmaß beschrieben, das anhand der Leuchtdichte der Lichtquelle, der Umgebungshelligkeit sowie von dem Beobachtenden aus gesehenem Raumwinkel der Lichtquelle ermittelt wird. Um die psychologische Blendung zu begrenzen, werden maximale Lichtstärken vorgegeben, die von der Lichtquelle in Störrichtung abgegeben werden dürfen. Die physiologische Blendung wird durch eine Schwellenerhöhung (TI = threshold increment) der Umgebungshelligkeit ermittelt. Zur Begrenzung der physiologischen Blendung darf nach Angaben der CIE der Schwellenwert der Lichtanlage den gemessenen Höchstwert der Umgebungshelligkeit nicht um mehr als 15 Prozent überschreiten (z. B. bei Sportanlagen und anderen Anlagen, die keine Straßenbeleuchtungen sind).

Die von der CIE noch als zulässig eingestufte maximale Störwirkung von Beleuchtungen beurteilt sich je nach Umweltzone und Uhrzeit, wobei zwischen Raum- und Himmelsaufhellung differenziert wird (WALKLING & STOCKMAR 2013). Die Raumaufhellung wird mit Hilfe der vertikalen Beleuchtungsstärke vor dem Fenster gemessen. Die Maximalwerte für vertikale Beleuchtungsstärken liegen zwischen 0 und 15 lx. Das nach oben gerichtete Licht, das einen direkten Beitrag zur Himmelsaufhellung leistet, darf je nach Umweltzone ² einen bestimmten ULR-Wert (engl. Upward Light Ratio) nicht überschreiten.

Abgesehen von den Störwirkungen auf die menschliche Wahrnehmung, verändert künstliches Licht in der Nacht auch natürliche Lichtverhältnisse. Das Leben auf der Erde hat sich den Tag- und Nachtzeiten entsprechend in einem 24 Stunden Rhythmus entwickelt, der in erster Linie durch natürliches Licht gesteuert wird. Sowohl die Tageslichtdauer und -intensität als auch der Verlauf der Dämmerung sowie die natürlichen Lichter der Nacht, insbesondere das Mondlicht, bilden Signale für Orientierung und Rhythmen und stellen somit für Lebewesen wichtige Informationen dar. In diesem Sinne können Dämmerungs- und Nachtzeiten auch als Schwachlichtumgebungen bezeichnet werden. Künstliches Licht kann diese natürlichen schwächeren Lichtsignale in der Dämmerung und während der Nacht überstrahlen und infolgedessen maskieren. Organismen, die sich an die ökologische Nische der Dämmerung oder Nacht angepasst haben, können durch das künstliche Licht gestört werden, indem die für das nächtliche Sehen erforderlichen Sinnessysteme geblendet sowie Orientierungssignale und saisonale Reize überlagert werden. Die Beeinträchtigungen von nacht- und dämmerungsaktiven Organismen können sich auch auf das Verhalten und die Bedingungen von tagaktiven Organismen und ihrer Lebensgemeinschaften auswirken, etwa weil Ökosystemleistungen und -funktionen, die von nacht- und dämmerungsaktiven Organismen bereitgestellt werden, unterdrückt werden oder gänzlich fehlen (vgl. KNOP et al. 2017, GRUBISIC et al. 2018B, MANFRIN et al. 2018).

2.2.1 Beeinträchtigung der zirkadianen und saisonalen Rhythmen

Gesellschaftliche Abläufe werden durch Uhren synchronisiert. Eine vergleichbare Synchronisation findet auch in Ökosystemen statt, um Abläufe zeitlich und örtlich abzustimmen und gemeinschaftliche Aktivitäten zu koordinieren. Das maßgebliche steuernde Signal für diese Rhythmen ist das natürliche Licht. Der Tag-Nacht-Wechsel, in der die Erde innerhalb von 24 Stunden jeweils eine helle und eine dunkle Phase durchläuft, gibt den Takt vor. Diese Rhythmen haben eine Periodenlänge von ungefähr 24 Stunden und werden daher als zirkadianer Rhythmus (lateinisch für circa = ungefähr, dies = Tag) bezeichnet. Daneben gibt es noch die kürzeren ultradianen Rhythmen (z. B. Herzschlag, Atmung) und die längeren

² Umweltzonen werden durch die CIE in innerstädtische, peri-urbane, naturnahe Siedlungen und naturnahe gering besiedelte Bereiche unterteilt.

infradianen (z. B. Menstruationszyklus), circalunaren und zirkannualen oder saisonalen Rhythmen. Licht wirkt für all diese Rhythmen als Zeitgeber, der regelmäßig die inneren Uhren stellt und damit alle Rhythmen untereinander und mit der Außenwelt abstimmt (Abbildung 4). Die Überlagerung des natürlichen Lichtes durch Beleuchtung kann sich auf zirkadiane Rhythmen nachteilig auswirken, indem die inneren Uhren unterschiedlicher Organismen nicht synchronisiert werden und Aktivitäten in Lebensgemeinschaften zeitlich verschoben werden. Diese Verzerrung von Aktivitätszeiten kann das Räuber-Beuteverhältnis, die Partnersuche und die Reproduktion beeinträchtigen und es können Stoffwechselprozesse, die in der Regel während der Ruhephase stattfinden, nicht mehr zum richtigen Zeitpunkt und in der notwendigen Intensität ablaufen.

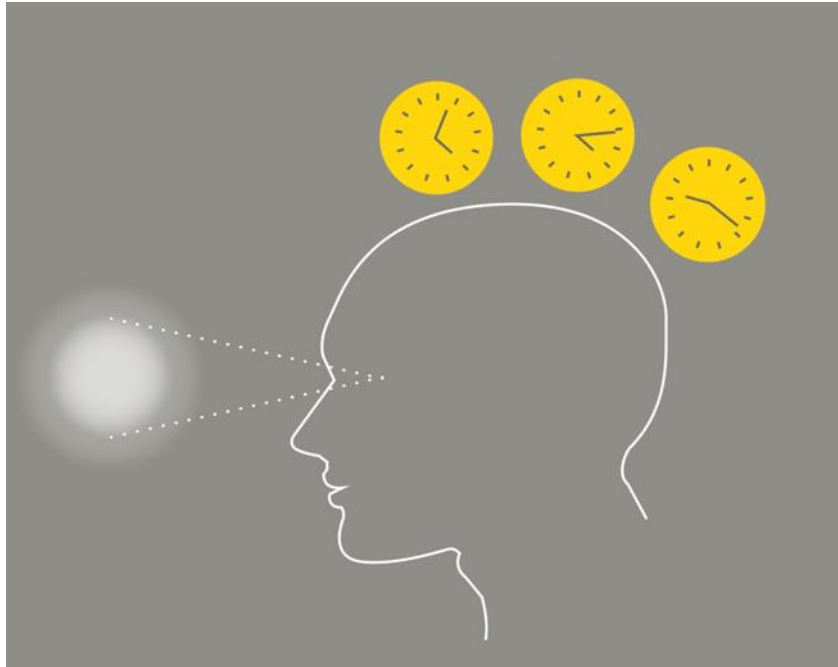


Abbildung 4: Licht beeinflusst die „innere Uhr“. Licht ist das wichtigste Signal für die Synchronisation der inneren Uhren. Künstliches Licht in der Nacht kann diese Synchronisation stören. Illustriert von Catherine Perez Vega.

Beleuchtung in der Nacht kann zudem saisonale Rhythmen wie z. B. die Reproduktion bei Säugetieren beeinträchtigen. Bei einer Känguruart in Australien, dem Tammar-Wallaby (*Macropus eugenii*) wurde eine zeitliche Verschiebung des Reproduktionszyklus zwischen Tieren festgestellt, die in unbeleuchtetem Buschland und solchen, die auf einem benachbarten Marinestützpunkt frei leben. Anhand von Lichtsensoren an den Tieren wurde eine um 20-fach höhere Lichtexposition der Tiere auf dem Marinestützpunkt gemessen (ROBERT et al. 2015). Die Tiere im Buschland erfuhren dagegen eine zyklische Veränderung der Lichtniveaus in der Nacht durch Mondlicht (Abbildung 5). Diese regelmäßige Erhellung der nächtlichen Umgebung ist um eine 10er Potenz geringer, als die dauernde nächtliche Lichtexposition auf dem Marinestützpunkt. Während im Buschland über 70 Prozent der Geburten im Dezember und Januar stattfinden, verzögern sich die Geburten auf dem Marinestützpunkt bis spät in den April hinein. Bei Grauen Mausmakis (*Microcebus murinus*), einer Lemurenart, wurden Beeinträchtigungen durch Licht während der Nacht anhand der Bewegungsaktivität während der Paarungszeit im Frühjahr festgestellt. Die Paarungsbereitschaft trat früher ein und war zeitlich verkürzt (LE TALLEC et al. 2015, 2016). Für Ziegen (*Capra hircus*) hingegen, die sich im Herbst paaren, wurde das Signal für die Entwicklung der Fortpflanzungsorgane überlagert und sie blieben kleiner (YASUO et al. 2006). Auch bei

Zwerghamstern (*Phodopus sungorus*) wurde beobachtet, dass Beleuchtung im Winter zu einer stagnierenden Entwicklung der Fortpflanzungsorgane führt und frühzeitige Wachstumssteigerungen sowie Haarwechsel hin zum Sommertyp bewirkt (AUBRECHT et al. 2014, IKENO et al. 2014).

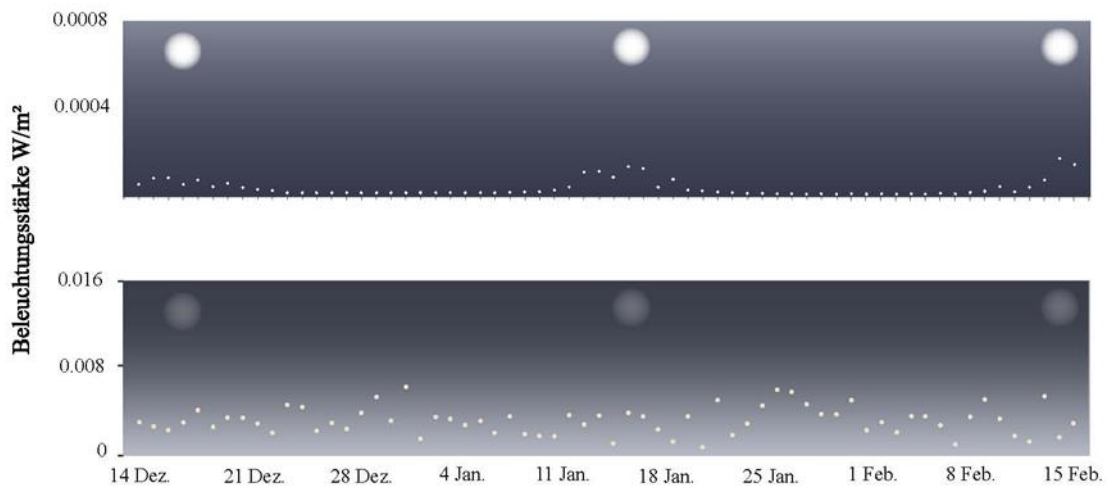


Abbildung 5: Lichtexposition von Wildtieren gemessen an einer nachtaktiven Känguruart, den Tamar-Wallabys (*Macropus eugenii*), innerhalb eines eingezäunten Marinestützpunktes mit Straßenbeleuchtung, aus dem die freilebenden Tiere nicht entweichen konnten und außerhalb im Buschland. Die wildlebenden Tiere trugen Lichtsensoren, die Daten über die Lichtexposition während der Nacht wiedergeben. Durch die Straßenbeleuchtung des Stützpunktes erfuhren die Tiere auf dem Stützpunkt eine um eine Größenordnung höhere Helligkeit während der Nacht, als die Tiere, die in unbeleuchtetem Buschland leben. Dadurch wurden die Helligkeit des Mondes und damit der astronomische monatliche Rhythmus heller Vollmondnächte überstrahlt. Illustriert von Catherine Perez Vega nach Daten von ROBERT et al. (2015).

2.2.2 Beeinträchtigung von Pflanzen

Künstliches Licht kann auch die von Pflanzen wahrgenommene Tageslänge verlängern und dadurch die Information über jahreszeitliche Veränderungen überlagern. Unter anderem wird die Signalwirkung für den Laubabwurf (Abbildung 6) und die Blüteninduktion (Abbildung 7) verändert. Schon in den 30er Jahren wurde eine Verzögerung des Laubabwurfs bei Laubbäumen unter Straßenbeleuchtung festgestellt (MATZKE 1936). Ein verspäteter Laubabwurf und veränderte Blütezeiten können zur Folge haben, dass einbrechender Frost das Gewebe beschädigt oder die Synchronisation der Blüten mit dem Auftreten der Bestäuber beeinträchtigt wird. Die meisten Laubbäume werden zwar durch Mechanismen geschützt, welche die Phasen für Winterruhe und Reproduktion unter 12 °C stärker durch Temperatur- als durch Lichtreize regeln (CATHEY & CAMPBELL 1975). Allerdings steigt das Risiko der Pflanzen durch Luftverschmutzungen oder Wassermangel geschädigt zu werden, weil das tagesrhythmische Öffnen und Schließen der Stomata unter dem Einfluss von künstlichem Licht reduziert wird und die Poren für längere Zeit geöffnet bleiben (CHANEY 2002).



Abbildung 6: Straßenbäume (Platanen, *Platanus × acerifolia*), die gegenüber der Straßenleuchten noch komplett belaubt sind, wohingegen die Bäume in den Zwischenräumen schon vollständig entlaubt sind. Aufgenommen im Dezember 2013 von Sabine Frank.

Eine verfrühte Knospenbildung wird vor allem in beleuchteten Gebieten beobachtet (FFRENCH-CONSTANT et al. 2016). Das Phänomen scheint stärker durch Lichtsignale als von Temperaturverhältnissen ausgelöst zu werden. Entsprechend kommt es eher in beleuchteten als in unbeleuchteten warmen, urbanen Gebieten zur verfrühten Knospenbildung. Die Veränderungen der Blütezeiten haben dann nachteilige Auswirkungen, wenn sie außerhalb der Flugzeiten von Bestäubern stattfinden und nur wenige oder keine Insekten für die Vermehrung von diesen betroffenen Wildpflanzen zur Verfügung stehen. Da Pflanzen mit unterschiedlicher Empfindlichkeit auf Licht und Unterschiede in der Tageslänge reagieren (CHANEY 2002), kann es durch künstliche Beleuchtungen zum Verlust empfindlicher Arten und in der Folge zu einem verminderten Angebot an Blütenformen kommen, was sich wiederum auf das Vorkommen und die Vielfalt bestäubender Insekten auswirken kann.



Abbildung 7: Herbst und Frühling an einem Baum. Verfrühte Knospenbildung an japanischer Zierkirsche (*Prunus serrulata* 'Kanzan') in Berlin im November 2017. Während der Baum noch nicht vollständig entlaubt ist, steht er schon Ende November in Blüte. Foto: Sibylle Schroer.

Verlängerte Vegetationszyklen scheinen nachteilige Auswirkungen auf die Fitness und das Altern von Bäumen zu haben. So konnten PRETSCH et al. (2018) anhand einer globalen Langzeitstudie bedeutende Unterschiede zwischen der Alterung ländlicher und städtischer Bäume nachweisen. Die Autorinnen und Autoren machen dafür zwar vor allem den Klimawandel und Luftverunreinigungen verantwortlich. Durch vermehrte künstliche Beleuchtung der Lebensräume bei gleichzeitiger Häufung und Intensivierung von abiotischen Umweltstressoren und ungewöhnlichen Temperaturschwankungen befinden sich aber insbesondere Stadtbäume in einer Phase ständiger Anpassungsprozesse (MCCLUNG 2006). Es wurde zudem festgestellt, dass zirkadianer Stress durch eine Verschiebung des Lichtsignals übermäßigen oxidativen Stress in Wildpflanzen hervorrufen kann (NITSCHKE et al. 2016). In Blättern von Tulpenbäumen (*Liriodendron tulipifera*), die nachts künstlichem Licht ausgesetzt waren (Natriumdampf-Hochdruck), wurde schon bei einer Lichtexposition von 1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ eine Akkumulation von Radikalen (O_2 und H_2O_2) sowie eine verminderte nächtliche Atmung beobachtet (KWAK et al. 2018).

Erste Studien weisen auch Auswirkungen durch Straßenbeleuchtung auf saisonale Lebensgemeinschaften von Mikroorganismen in aquatischen Sedimenten nach (HÖLKER et al. 2015). Unter anderem können Photosynthese betreibende Kieselalgen und Cyanobakterien durch Beleuchtung auf der Sedimentoberfläche zunehmen. Nach einem Jahr Beleuchtung reichte den Mikroorganismen in anschließenden Laborversuchen ein Beleuchtungs-niveau, vergleichbar mit einer hellen LED-Straßenbeleuchtung (70 Watt) aus, um während der Nacht sogar Photosynthese betreiben zu können. Dies stellt für die Nachtzeit ein unnatürliches und in der Evolutionsgeschichte der Organismen ein noch nie dagewesenes Phänomen dar (HÖLKER et al. 2015).

Zudem kann künstliche Beleuchtung in Fließgewässern bei sich neu entwickelndem Erstbewuchs von Aufwuchsgemeinschaften (Periphyton) eine verminderte Biomasseproduktion der typischen Primärproduzenten (Grün- und Kieselalgen, Cyanobakterien) und Veränderungen in der Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften verursachen (GRUBISIC et al. 2017). Aufwuchsgemeinschaften bilden die Grundlage für die Nahrungsnetze vieler aquatischer Systeme. Nachteilige Auswirkungen können daher weitreichende nachteilige Folgeeffekte nach sich ziehen. Erste Nachweise zeigen, dass diese Auswirkungen eher von LED- als von Natriumdampf-Beleuchtungen hervorgerufen werden (GRUBISIC et al. 2018B).

Weitere Auswirkungen künstlicher Beleuchtungen auf die Flora werden indirekt durch licht-induzierte Verhaltensänderungen der Fauna verursacht. Gerade die Auswirkungen der Beleuchtung auf Insekten spielen hierfür eine bedeutende Rolle. Veränderungen der Vegetation können aber auch durch Verhaltensänderungen von Frugivoren (Früchtefresser), z. B. von Vögeln (LEVEY 2005) oder Fledermäusen (LEWANZIK & VOIGT 2014), hervorgerufen werden, die einen gewichtigen Einfluss auf die Ausbreitung von Samen haben.

70 bis 90 Prozent der Blütenpflanzen sind für die Bestäubung auf Tiere angewiesen (FONTAINE et al. 2006). Der drastische Insektenschwund, der regional in den vergangenen Jahrzehnten auf über 70 Prozent Biomasseverlust eingeschätzt wird (z. B. VOGEL 2017, HALLMANN et al. 2017, SÁNCHEZ-BAYO et al. 2019), führt nach dem derzeitigen Wissen und Forschungsstand zu beeinträchtigten Ökosystemfunktionen. Durch den Verlust einzelner Bestäubertypen, die auf spezifische Blütenformen angepasst sind, wird die Stabilität im Gefüge von Pflanzengemeinschaften gefährdet. Denn der Verlust der Bestäuber führt wiederum zu dem Verlust wichtiger Nahrungsquellen für andere Insektenarten (FONTAINE et al. 2006). Wie groß der Einflussfaktor künstlichen Lichts für den Verlust nachtaktiver Bestäuber ist, ist eine dringliche Forschungsaufgabe (GRUBISIC et al. 2018A, DESOUHANT

et al. 2019). MACGREGOR et al. (2015) listen 289 Pflanzenarten, die nachweislich zumindest teilweise auf Nachtbestäubung angewiesen sind. Eine experimentelle Beleuchtung in bisher unbeleuchteten Regionen der Schweizer Voralpen zeigte nachteilige Verhaltensveränderungen von Nachtbestäubern in der Nähe von künstlichen Lichtquellen. So wurde beispielsweise die Fruchtbildung einer Distelart (*Cirsium oleraceum*), die auf Nachtbestäubung durch Insekten angewiesen ist, durch Straßenbeleuchtung um 13 Prozent reduziert. Die Tagbestäuber konnten die verringerte nächtliche Bestäubung nicht ausgleichen. Die reduzierte Fruchtbildung kann zu indirekten negativen Systemeffekten führen, da sich viele Tagbestäuber von den Früchten ernähren, was sich wiederum auf das Angebot der tagbestäubenden Insekten und damit auf deren Leistung auswirken kann (KNOP et al. 2017), (Abbildung 8).



Abbildung 8: Geringere nächtliche Bestäubung kann zur Abnahme der Biodiversität führen. Nachtfalter verfügen über eine andere Befruchtungsphysiologie als tagaktive Bestäuber. Infolgedessen können an die Befruchtungsphysiologie dieser Nachtschmetterlinge angepasste Wildblumen verloren gehen. Links: Südeuropäischer Nachtschwärmer der seinen Rüssel zur Aufnahme von Nektar nutzt. Foto (Ausschnitt): Sven Haustein (2003). Rechts: Illustration direkter und indirekter Effekte durch Straßenbeleuchtung auf nacht- und tagaktive Bestäuber. Illustriert von Catherine Perez Vega nach KNOP et al. (2017).

2.2.3 Beeinträchtigung von Tieren und Lebensräumen

Ungefähr 30 Prozent aller heute bekannten Wirbeltiere sind nachtaktiv, bei den Wirbellosen sind sogar über 60 Prozent aller bekannten Arten auf die ökologische Nische der Nacht eingestellt (HÖLKER et al. 2010B). Durch Ausbildung hoch entwickelter Sinne haben sich nachtaktive Tiere an die Nachtnische anpassen können und ihre Sinne an die Schwachlichtbedingungen adaptiert. Diese Arten können Beeinträchtigungen ausgesetzt sein, wenn die Schwachlichtbedingungen durch künstliches Licht verändert werden.

2.2.3.1 Der Schutz aquatischer Lebensräume

Ein besonderes Augenmerk erfordern aquatische Ökosysteme. Insbesondere Fließgewässer werden von Insekten, Vögeln, Fischen und Fledermäusen häufig als Wanderrouten genutzt. Die sich an Gewässern befindlichen Naturflächen sind sehr artenreich und für die Stabilität der betroffenen Ökosysteme von großer Bedeutung. Zudem können Lichtanlagen aufgrund der ebenen Flächen aquatischer Lebensräume in einem großen Wirkradius nachteilige Auswirkungen hervorrufen. Bei Beleuchtungsplanungen sollten deshalb insbesondere Gewässer vor Lichtimmissionen geschützt und in die Entwicklung von Lebensraumkorridoren integriert werden (BRÜNING & HÖLKER 2015, HÖLKER et al. 2018).

2.2.3.2 Orientierung an der Milchstraße

Künstliche Beleuchtungen sind oft wesentlich heller als eine Vollmondnacht und überstrahlen das Signal der Sterne und des Mondes. Orientierungen an der Milchstraße, wie beispielsweise bei Mistkäfern beobachtet (DACKE et al. 2003), sind im Wirkradius künstlicher Beleuchtungen kaum möglich (KYBA & HÖLKER 2013).

2.2.3.3 Lebensraumbegrenzung durch Licht und Schatten

Weiterhin können die empfindlichen Augen nachtaktiver Arten geblendet werden. Bei Amphibien kann es beispielsweise 45 Minuten und länger dauern, bis sich die Augen von einer Blendung durch eine Lampe wieder dunkeladaptiert haben (BUCHANAN 2006). In diesem Zeitraum fehlen den Tieren somit visuelle Informationen über Lebensräume, Prädatoren, Konkurrenten oder Sexualpartner. Siehe dazu Abbildung 9.



Abbildung 9: Unterschiede in Froschaugen durch Helligkeitsadaptation. Links: Verkleinerte Pupillenöffnung in starkem Licht eines Rotaugenlaubfroschs (*Agalychnis callidryas*). Foto von Carey James Balboa (Wikipedia.en, CC BY-SA 2.0). Rechts: Weite Pupillenöffnung im Nachtlicht eines in Madagaskar endemischen grünen, helläugigen Frosches (*Boophis viridis*). Foto von Bernard Dupont (CC BY-SA 2.0). Bilder zuletzt abgerufen am 11.04.2019.

Licht wirft Schatten. Die dadurch entstehenden hell-dunkel Unterschiede können Barrieren in Lebensräumen bilden, da sich die Sinnesorgane für das Heraustreten des Tieres aus einem Lichtkegel in die Dunkelheit bzw. an die Helligkeitsunterschiede anpassen müssen. Während der Dunkeladaptation kann das Tier zur Beute werden, weshalb Helligkeitsunterschiede vermieden werden und Lebensraum ungenutzt bleibt (Abbildung 10). Künstliche Beleuchtungen, die diese Helligkeitsunterschiede verstärken, können so Barrierewirkungen erzeugen, Lebensräume begrenzen und Eintrittspforten für invasive Arten bieten, die den ungenutzten Lebensraum füllen können.

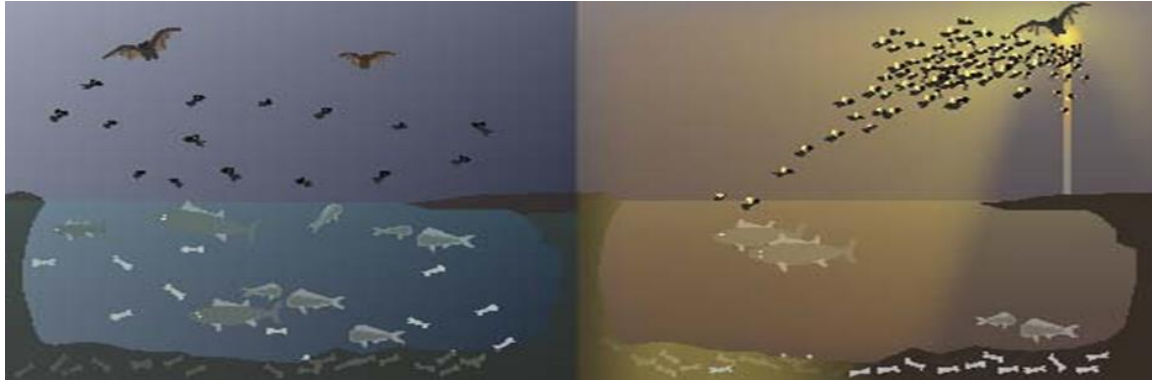


Abbildung 10: Illustration möglicher Effekte durch Straßenbeleuchtung am Ufer. Illustriert von Catherine Perez Vega. nach PERKIN et al. (2011).

2.2.3.4 Der Staubsaugereffekt

Während kleine und scheue Arten in den schattigen und unbeleuchteten Räumen bleiben und beleuchtete Räume meiden, werden andere Tiere, darunter ein Großteil der Insekten, von Licht angezogen und können sich aus dem Lichtschein von Leuchten nicht befreien (Abbildung 11). Über 1000 Fluginsekten konnten in nur einer Nacht an einzelnen Straßenleuchten festgestellt werden (EISENBEIS & HASSEL 2000), weshalb diese Anlockwirkungen auch als Staubsaugereffekt bezeichnet werden (EISENBEIS 2006). Diese Staubsaugerwirkungen werden nicht nur in terrestrischen Umgebungen, sondern auch an künstlichen Lichtquellen in Gewässern beobachtet (NAVARRO-BARRANCO et al. 2015). Die vom Licht angezogenen Organismen werden dadurch ihrem Lebensraum entzogen und können unter anderem der Nahrungs- und Partnersuche nicht mehr gleichermaßen erfolgreich nachgehen wie in unbeleuchteten Lebensräumen. Sind die Tiere dem Lebensraum entzogen, fallen sie auch als Nahrungsgrundlage für andere Tiere aus. Ferner können Staubsaugerwirkungen dazu führen, dass Ökosystemleistungen beeinträchtigt werden. Beispielsweise hat eine Abnahme von Nachtfaltern, Käfern und Zweiflüglern zur Folge, dass weniger Pflanzen bestäubt werden (KNOP et al. 2017). Und auch lichtinduzierte Veränderungen im Vorkommen und Verhalten von Schädlingen wie Blattläusen oder deren Feinden – z. B. Käfer oder Spinnen – können ein eingespieltes System aus dem Gleichgewicht bringen (BENNIE et al. 2018, MANFRIN et al. 2017, 2018).

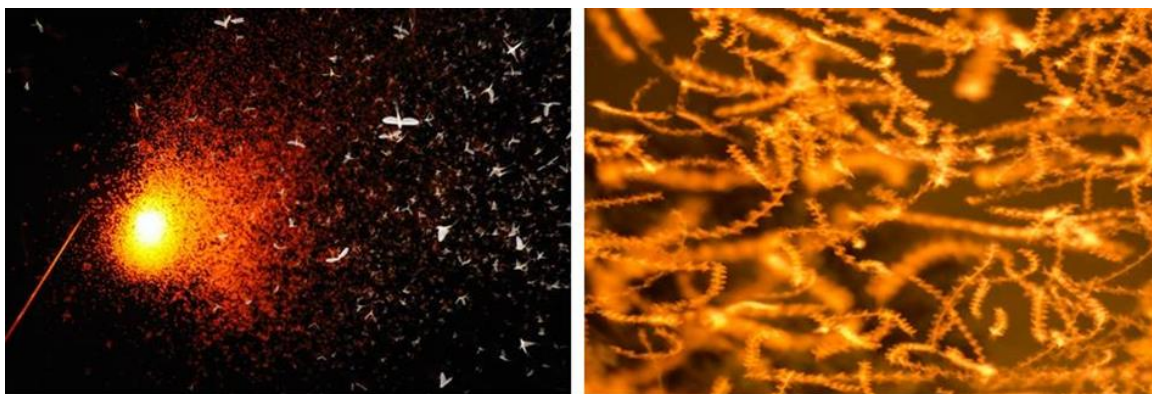


Abbildung 11: Anziehung von Eintagsfliegen an eine Lichtquelle (links) und ihre beleuchteten Flugbahnen (rechts). Links: „Donaublumen an einer Lampe“. Foto: Imre Potyó (Göd, 2013). Rechts: „Donaublumen in Bewegung“. Foto: Bajomi Bálint (Tahitotfalu, 2013). Abgerufen von Flickr (CC by 2.0). (übersetzt aus dem Ungarischen). Bilder zuletzt abgerufen am 11.04.2019.

2.2.3.5 Auswirkungen auf Insekten

Zahlreiche störende und fitness-relevante Auswirkungen von künstlichem Licht in der Nacht wurden sowohl für tag- als auch für nachtaktive Insekten nachgewiesen, die den Gesamtumweltdruck auf Insektenpopulationen in lichtverschmutzten Landschaften erhöhen können (HALLMANN et al. 2018, GRUBISIC et al. 2018A, SÁNCHEZ-BAYO et al. 2019, DESOUHANT et al. 2019). Über diese grundlegenden Wirkmechanismen hinaus verbleiben allerdings noch Erkenntnisdefizite. Daher besteht dringender Forschungsbedarf dahingehend, inwieweit unterschiedliche Insektenarten durch künstliches Licht in der Nacht in welcher Quantität gefährdet sind und welche Ökosystemfunktionen dadurch betroffen sein könnten.

Insgesamt lassen sich die Auswirkungen auf Insekten am Beispiel von Nachtfaltern illustrieren: Obwohl aufgrund des Staubsaugereffektes an Straßenleuchten um die 70 Prozent mehr Falter zu beobachten sind, als an unbeleuchteten Standorten, wurde eine verringerte Artenvielfalt der Falter um über 25 Prozent an beleuchteten Standorten nachgewiesen (MACGREGOR et al. 2017). Die Autoren stellen weiterhin fest, dass die Falter an beleuchteten Standorten eine deutlich verminderte Anzahl an Pollen von weniger unterschiedlichen Pflanzenarten tragen als in natürlicher Dunkelheit. Damit wird die Reproduktionsleistung von Pflanzen gemindert. Außerdem produzieren Nachtfalter in einer beleuchteten Umgebung weniger Pheromone, was bedeutet, dass ihre eigene Reproduktionsleistung ebenfalls abnimmt (GEFFEN VAN et al. 2015).

Der Rückgang von Insekten wird in einer deutschen Langzeitstudie (27 Jahre) auf über 75 Prozent der Insektenbiomasse der fliegenden Arten geschätzt (HALLMANN et al. 2017). Noch gibt es allerdings wenige Zahlen über quantitative Veränderungen unterschiedlicher Insektenordnungen. In Großbritannien wurde mithilfe von Langzeitstudien über einen Zeitraum von 35 Jahren nachgewiesen, dass die Biomasse einiger Falterpopulationen um bis zu 30 Prozent in zehn Jahren zurückgegangen ist (CONRAD et al. 2006). Als Gründe für den Rückgang werden hauptsächlich Landnutzung und Pestizideinsatz genannt. Die Gefährdung von Insektenarten durch den Faktor künstliches Licht wird heute noch relativ wenig diskutiert (GRUBISIC et al. 2018A), obwohl die allgemeine Aufhellung der Nachtlandschaften durch künstliche Beleuchtung selbst in ausgewiesenen Naturschutzgebieten³ weltweit auf über 40 Prozent heller geschätzt werden, als unter natürlichen Bedingungen (GASTON et al. 2015). In Europa sind von dieser von 1992 bis 2010 durch Satellitenbilder gemessenen Aufhellung vor allem Schutzgebiete der Kategorie IV und V (IUCN 2012)⁴ betroffen, das sind Habitat- und Arten- sowie Landschaftsschutzgebiete. Auch in der Studie von HALLMANN et al. (2017) erwiesen sich die untersuchten Regionen als überdurchschnittlich lichtverschmutzt (GRUBISIC et al. 2018A). Eine dreißigjährige Studie über die Entwicklung von Falterpopulationen in den Niederlanden zeigt zudem, dass tagaktive Arten weniger gefährdet sind als nachtaktive Arten und letztere sind umso gefährdeter, je lichtsensitiver sie sind (LANGEVELDE VAN et al. 2018). In einer weiteren Langzeitstudie in Großbritannien und Irland wurden 20 Prozent der langfristigen Veränderungen in der Nachtfalterhäufigkeit durch Lichtverschmutzung begründet (WILSON et al. 2018). DESOUHANT et al. (2019) fassen wissenschaftliche Studien zusammen und benennen

³ Karten von weltweiten Schutzgebieten, welche mit Satellitendaten (DMSP/OLS) verglichen wurden. (Schutzgebietskarten: IUCN & UNEP, aufgerufen Juni 2013 von GASTON et al. 2015)

⁴ Kategorien der Schutzgebiete nach IUCN 2012: Francoise Burhenne-Guilmin (2011). Guidelines for Protected Areas Legislation. IUCN. S. 147. ISBN 9782831712451.

künstliches Licht in der Nacht als kritischen Faktor für Insektenpopulationen, weil durch Beleuchtung ihr Jagdverhalten verändert, die Entwicklung der Imago in Zeit und Anzahl vermindert und Reproduktion sowie physiologische und hormonelle Stoffwechselprozesse beeinträchtigt werden.

2.2.3.6 Auswirkungen auf Amphibien

Amphibien sind größtenteils nachtaktiv und zeichnen sich durch sehr gutes nächtliches Sehen aus. So können Frösche und Kröten in natürlichen, nächtlichen Lebensräumen bei Beleuchtungsstärken von bis zu 10 - 5 lx noch Aktivitäten zeigen (BUCHANAN 1998). Diese an nächtliche Bedingungen optimal angepasste visuelle Wahrnehmung kann durch künstliche Beleuchtung erheblich gestört werden. Bereits eine geringfügige Zunahme der Beleuchtungsintensität, die durch nahe gelegene künstliche Lichtquellen oder sogar durch natürliche Himmelslichter verursacht werden, können das Jagdverhalten oder das Räuber-vermeidungsverhalten von Fröschen und Kröten verändern (BUCHANAN 2006, BAKER & RICHARDSON 2006). Heute ist bereits ein Drittel der weltweiten Amphibienarten bedroht oder ausgestorben. Eine zunehmende Zahl – über 40 Prozent aller Arten – sind in der Population rückläufig⁵. Das deutet darauf hin, dass die Zahl der bedrohten Arten in Zukunft sogar noch steigen wird. Neben dem Einfluss der Landnutzung darf künstliche Beleuchtung als bestimmender Faktor für die Lebensraumbeschränkung nicht übersehen werden.

2.2.3.7 Auswirkungen auf Fledermäuse

Fast alle Fledermausarten sind dämmerungs- oder nachtaktiv. Viele Arten sind in ihrem Bestand stark bedroht, sodass die Arten und ihre Lebensräume schutzbedürftig sind. Beeinträchtigungen durch künstliche Beleuchtungen sind stark artabhängig (VOIGT et al. 2018). Auf der Gattungsebene lassen sich europäische Fledermäuse grob nach ihrer Reaktion auf künstliches Licht einteilen. Hierbei wird für verschiedene Situationen zwischen lichtscheuen, neutralen und opportunistischen Reaktionen unterschieden (Tabelle 2). Lichtscheues Verhalten bedeutet, dass die Fledermäuse unter normalen Bedingungen künstliches Licht in der Nacht vermeiden. Als neutral wird eine Reaktion bezeichnet, wenn die räumliche Verteilung und Aktivität einer Fledermaus durch künstliche Beleuchtung in der Regel nicht beeinflusst wird. Als opportunistische Reaktion wird ein Verhalten beschrieben, wonach die Fledermaus unter bestimmten Bedingungen, z. B. bei der Jagd, beleuchtete Standorte nutzt, da der Vorteil eines erhöhten Nahrungsangebotes das Risiko überwiegt, Prädatoren zum Opfer zu fallen. Diese taxonomische Vereinfachung ist möglich, weil die Arten derselben Gattung eine ähnliche Reaktion auf künstliche Beleuchtungen zeigen. Neutrale und opportunistische Arten sind oft an Jagdzeiten in der hereinbrechenden Dunkelheit und im Zwielicht angepasst. Schnellfliegende, opportunistische Arten fangen ihre Beute meist aus der Luft und können vereinzelt die Anlockwirkung von Leuchten auf Insekten ausnutzen (SCHOEMAN 2016). Lichtscheue Arten sind meist später in der Nacht aktiv und auf nicht fliegende Beute spezialisiert (LACOEUILHE et al. 2014). Der Jagdvorteil einiger opportunistischer Arten kann zu einer Verdrängung von lichtscheuen Arten und damit zu artenärmeren Fledermausgemeinschaften führen (POLAK et al. 2011, SCHOEMAN 2016). Diese Veränderungen können sich zudem auf die Zusammensetzung von Insektengemeinschaften auswirken (RYDELL 1992, MINNAAR et al. 2015), da manche dieser Arten mehr Nachtfalter unter Beleuchtung konsumieren, als in natürlich dunklen Gebieten, in denen sie sich hauptsächlich von Käfern ernähren würden (MINNAAR et al. 2015).

⁵ Zahlen der IUCN Red List: Rote Liste (zuletzt abgerufen am 20.02.2019).

Die Aktivitäten der meisten Fledermausarten werden durch Beleuchtung beeinflusst. Ökologen nehmen an, dass der Faktor Licht den Lebensraum von Fledermäusen stärker beeinträchtigt, als der Faktor Flächenversiegelung. Lediglich intensive Landwirtschaft wird als beeinträchtigender Faktor stärker bewertet als Beleuchtung (AZAM et al. 2016). Dadurch lässt sich erklären, warum an beleuchteten Kirchen in Schweden ein Verschwinden von über 20 Prozent der Fledermauskolonien gemessen wurde, während an unbeleuchteten Kirchen alle beobachteten Kolonien über 25 Jahre lang unbeeinträchtigt blieben (RYDELL et al. 2017).

Tabelle 2: Typische durch künstliches Licht induzierte Verhaltensreaktionen europäischer Fledermäuse in Bezug auf spezifische Aktivitäten und Lebensräume (n. a. = nicht anwendbar; D. m. = Daten mangelhaft; opportun. = opportunistisch; verändert nach VOIGT et al. 2018).

Gattungen	Gebräuchlicher Name	Fledermausverhalten auf Beleuchtung				
		Tag-quartiere	Transfer-flüge	Nah-rungs-suche	Trinken	Winter-quartiere
<i>Rousettus</i>	Rosetten-flughunde	lichtscheu	neutral	neutral	lichtscheu	lichtscheu
<i>Rhinopoma</i>	Mausschwanz-fledermäuse	lichtscheu	D. m.	D. m.	lichtscheu	lichtscheu
<i>Rhinolophus</i>	Hufeisennasen	lichtscheu	lichtscheu	lichtscheu	lichtscheu	lichtscheu
<i>Barbastella</i>	Mopsfledermäuse	lichtscheu	lichtscheu	lichtscheu	lichtscheu	lichtscheu
<i>Eptesicus</i> ¹	Breitflügel-fledermäuse	lichtscheu	lichtscheu	opportun.	lichtscheu	lichtscheu
<i>Pipistrellus und Hypsugo</i>	Zwergfledermäuse und Glattnasen	lichtscheu	neutral	opportun.	lichtscheu	lichtscheu
<i>Myotis</i>	Mausohren	lichtscheu	lichtscheu	lichtscheu	lichtscheu	lichtscheu
<i>Plecotus</i>	Langohr-fledermäuse	lichtscheu	lichtscheu	lichtscheu	lichtscheu	lichtscheu
<i>Vespertilio</i>	Zweifarb-fledermäuse	lichtscheu	D. m.	n. a./ opportun.	lichtscheu	lichtscheu
<i>Nyctalus</i> ¹	Abendsegler	lichtscheu	D. m.	n. a./ opportun.	lichtscheu	lichtscheu
<i>Miniopterus</i>	Langflügel-fledermäuse	lichtscheu	D. m.	n. a./ opportun.	lichtscheu	lichtscheu
<i>Tadarida</i>	Faltlippen-fledermäuse	lichtscheu	D. m.	n. a./ opportun.	lichtscheu	lichtscheu

¹ *Eptesicus nilssonii* können im hohen Norden auch bei Tageslicht fliegen und die auf den Azoren endemische Madeira-Fledermaus *Nyctalus azoreum* ist in größerem Ausmaß tagaktiv.

2.2.3.8 Auswirkungen auf Vögel

Obwohl Vögel vorwiegend tagaktiv sind, werden sie vor allem aufgrund ihres stark ausgeprägten visuellen Sinns durch künstliches Licht in der Dämmerung und in der Nacht beeinflusst. Auffällig ist die durch künstliches Licht bedingte Verlängerung der Tagesaktivität von Singvögeln (DA SILVA et al. 2017, DOMINONI et al. 2013, KEMPENAERS et al. 2010, MILLER 2006, NORDT & KLENKE 2013). Diese korreliert bei vielen Vögeln wie Rotkehlchen, Buchfinken, Amseln, Kohl- und Blaumeisen mit der Beleuchtungsstärke (JONG DE et al. 2016). Auch das saisonale Verhalten von Singvögeln kann durch Beleuchtung verändert werden. So treten die Mauser und Geschlechtsreife bei nächtlicher Schwachlichtbeleuchtung (0,3 lx, vergleichbar mit einer hellen Vollmondnacht) in Laboruntersuchungen bis zu drei Wochen früher ein, als bei Vögeln, die in absoluter Dunkelheit während der Nacht untersucht wurden (DOMINONI et al. 2013). Welche fitnessrelevanten Auswirkungen eine verlängerte Tagesaktivität und Saison auf die Vögel hat, ist noch nicht ausreichend erforscht. Vordergründig könnte eine verlängerte Aktivitätszeit sogar von Vorteil sein, weil mehr Zeit auf die Nahrungssuche verwendet werden kann. Dafür muss aber auch das Nahrungsangebot bereitstehen. Wenn durch Frost im Frühjahr das Nahrungsangebot aber gering ist, kann sich der Vorteil ins Gegenteil verkehren. Vögel, die länger in die Nacht hinein aktiv sind, zeigen reduzierte Aktivitätsleistungen während des Tages (DWYER et al. 2013). Das kann am höheren Nahrungsangebot durch den Attraktionseffekt der Straßenbeleuchtung auf Insekten liegen oder daran, dass die Vögel fehlende Ruhephasen ausgleichen müssen (WELBERS et al. 2017).

In Revieren von Blaumeisen konnte an mit Straßenbeleuchtung gesäumten Waldrändern doppelt so häufig Polygynie beobachtet werden, wie in Revieren im unbeleuchteten Zentrum des Waldes (KEMPENAERS et al. 2010). Dieser Vorteil erhöhter Paarungsbereitschaft in beleuchteten Gebieten bedeutet aber auch, dass Weibchen eventuell nicht erfahrene Männchen zur Reproduktion bevorzugen, sondern solche, welche die Nähe zu beleuchteten Quartieren bevorzugen. KEMPENAERS et al. (2010) diskutieren, dass durch die Beleuchtung Selektionsfaktoren nachteilig beeinflusst werden könnten, wenn nicht das fitteste Männchen in die Reproduktion eingebunden wird. Allerdings ist es auch möglich, dass die bevorzugte Wahl der Männchen in Beleuchtungsnähe die Adaptation der Vögel an künstliches Licht begünstigt.

Problematisch sind Beleuchtungen für Zugvögel. Sie können von ihren Routen abgelenkt werden und unterliegen daher einem höheren Risiko von Räubern gefangen zu werden oder mit Gebäuden zu kollidieren. Neben wandernden Vögeln (OGDEN 1996) kollidieren auch viele See- und Sturmvögel mit Gebäuden oder Küstenformationen, wenn diese stark beleuchtet sind (TELFER et al. 1987, RODRÍGUEZ et al. 2017, 2015, 2014, RODRIGUEZ & RODRIGUEZ 2009, MILES et al. 2010). CABRERA CRUZ et al. (2018) weisen sogar darauf hin, dass das globale Wanderverhalten von Vögeln durch künstliches Licht nachteilig beeinflusst werden könnte (Abbildung 12) und die Vögel Gefahr laufen, nicht nahrungsreiche Gebiete wie Feuchtgebiete für ihre Landungen anzufliegen, sondern nahrungsärmere menschliche Siedlungen (Abbildung 13).



Abbildung 12: Zugvogelrouten nächtlich wandernder Arten (Linien) und globale Lichtverschmutzung (gelbe Flächen über schwarzem Hintergrund). Linien verbinden Überwinterungs- und Brutgebiete nachtaktiver wandernder Vogelarten ($n = 298$). Die Linienfarben stellen die Entfernungen der Routen dar, die kürzer (weiß) oder länger (grau) sind als der gesamte Median der untersuchten Routen darstellt. Vor allem die kürzeren Flugrouten in Amerika und Asien befinden sich größtenteils über stark lichtverschmutzten Gebieten. Aus CABRERA-CRUZ et al. 2018 (CC by 4.0).

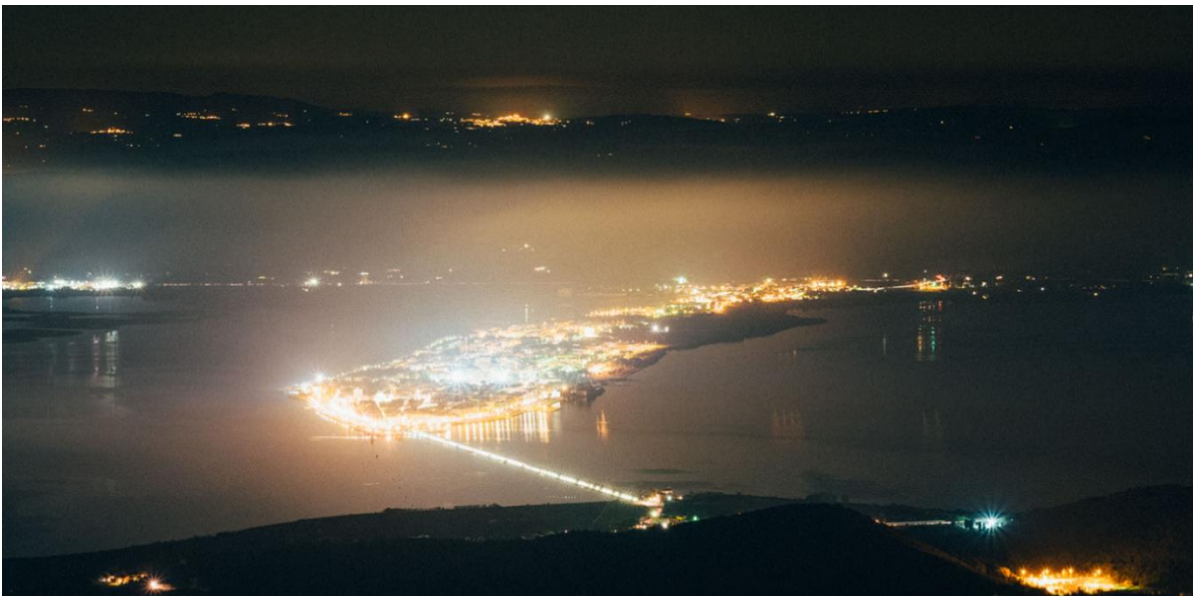


Abbildung 13: Lichtverschmutzung in einer italienischen Bucht als Beispiel für den Wandel in den Lichtverhältnissen. Ehemals hellere Wasserflächen, die das natürliche nächtliche Licht reflektieren, erscheinen durch übermäßige Beleuchtung dunkler als Siedlungsgebiete. Foto von Volker Crone.

2.2.3.9 Auswirkungen auf tagaktive Arten

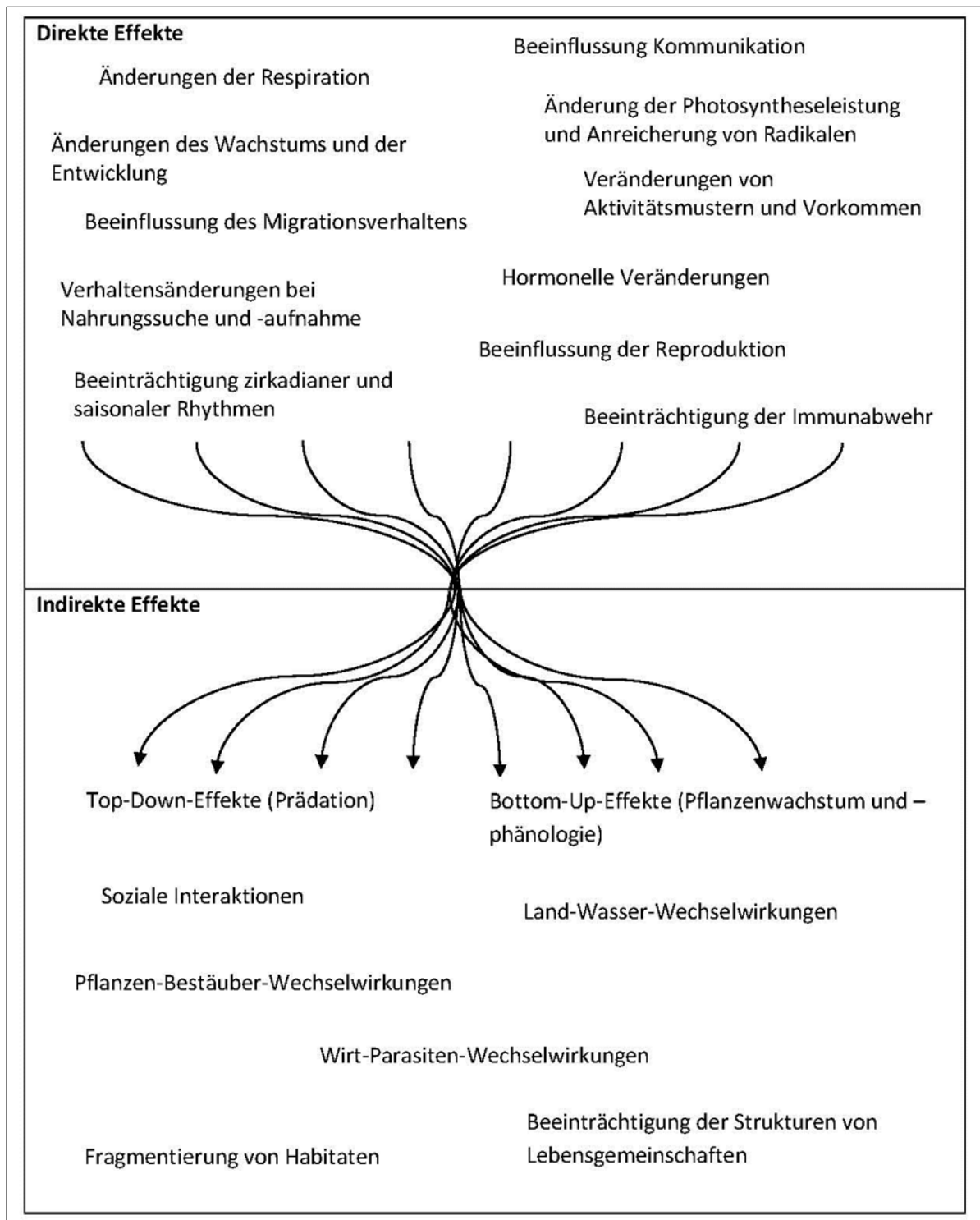
Die Beeinträchtigung der Biodiversität durch künstliches Licht in der Nacht kann sich auch auf tagaktive Arten auswirken. Einige tagaktive Arten wie Vögel oder Fische können künstliches Licht in der Dämmerung oder gar in der Nacht dazu nutzen, um ihre Aktivitätszeiten zu verlängern. Zum Beispiel wurden Wattvögel beobachtet, die auch nach Einbruch der Dunkelheit Sandwürmer jagen (SANTOS et al. 2010). Futterplätze von Singvögeln werden länger aufgesucht (DWYER et al. 2013, SANTOS et al. 2010) und manche Raubfischarten können besser jagen (ISHIBASHI et al. 2009, KEMP & WILLIAMS 2009).

Eigentlich nachtaktive Spinnen und Aaskäfer, aber auch Nacktschnecken, verlängern ihre Nahrungssuche bis in den Tag hinein – vermutlich, um von der Vielzahl erschöpfter oder toter Insekten im Bereich der Lampen zu profitieren (MANFRIN et al. 2017, GRUNSVEN VAN et al. 2018). Künstliches Licht in der Nacht macht zudem einige tagaktive Fische risikobereiter, d. h. sie kommen tagsüber häufiger aus ihrem Versteck und reagieren unerschrockener auf Fressfeinde (KURVERS et al. 2018). Eine verlängerte Aktivitätsphase kann sich jedoch zulasten der Regeneration auswirken (vgl. OUYANG et al. 2017) Räuber-Beute-Verhältnisse verändern und somit ganze Nahrungsnetze verzerren (vgl. MANFRIN et al. 2017).

2.2.4 Indirekte Auswirkungen auf Ökosysteme

Die weltweit ungebrochene Zunahme künstlicher Beleuchtung in der Nacht hat Folgen für Organismen und Lebensräume an Land und in Gewässern und kann biologische Rhythmen in ganzen Ökosystemen voneinander entkoppeln. Die zeitliche Abstimmung komplexer und miteinander verschränkter Prozesse gerät aus dem Takt und Nahrungsnetzbeziehungen, Biodiversitätsmuster und Prozesse in Ökosystemen werden verändert (siehe Kasten 4, HÖLKER et al. 2018). Darüber hinaus kann die Anfälligkeit gegenüber anderen Stressfaktoren wie Klimaerwärmung, Lärm und Luft- oder Gewässerverschmutzung wachsen (PERKIN et al. 2011, MCMAHON et al. 2017, DUTTA 2018). Direkte und indirekte Auswirkungen auf Organismen, die als Nahrung, als Herbivore der Vegetationsentwicklung oder als Bestäuber dienen, können sich kaskadenartig auf ganze Ökosysteme auswirken (BENNIE et al. 2015). Beispielsweise ändern sich die Lebensgemeinschaften vieler Tiere (Vögel, Frösche, Eidechsen, Fische, Fledermäuse etc.), die sich überwiegend von Insekten ernähren. Lichttolerante Räuber können von künstlicher Beleuchtung profitieren, da an Leuchtquellen sowohl bessere Jagdbedingungen herrschen als auch mehr Beute verfügbar ist. In der Folge findet eine verstärkte Vermehrung der jeweiligen Räuber statt. Lichtscheue Arten hingegen, die sich weder anpassen noch von der Beleuchtung profitieren, verschwinden. Konkurrenzschwächere Arten werden als Konsequenz verdrängt und es verändern sich Artengemeinschaften mit Nachfolgeeffekten für Ökosysteme. Insekten sind in fast allen Lebensräumen der Erde, auf Wiesen, in Gärten, im Wald und in Gewässern zu finden und erfüllen dort wesentliche Ökosystemfunktionen. Darunter fallen der Abbau von organischem Material, die Regulierung von Nährstoff- und Energieflüssen, die Bestäubung von Pflanzen, die Ausbreitung von Samen, die Regulierung von Schadinsekten und dadurch oft die Erhaltung der Biodiversität (GRUBISIC et al. 2018A). Der Verlust einzelner spezifischer Funktionen kann Konsequenzen für die Struktur von Lebensgemeinschaften und weiteren wichtigen Ökosystemprozessen nach sich ziehen und sich auch auf tagaktive Lebensgemeinschaften auswirken (FONTAINE et al. 2006, KNOP et al. 2017). Vegetationsveränderungen, beispielsweise hervorgerufen durch die Barrierewirkung künstlichen Lichts auf frugivore Vögel (LEVEY et al. 2005) und Fledermäuse (LEWANZIK & VOIGT 2014), können die Verbreitungsmuster von Samen und damit auch die Regenerationsfähigkeit von Wäldern beeinträchtigen. Bei den indirekten Auswirkungen besteht indes noch weiterer Forschungsbedarf. So ist beispielsweise unklar, wie sich künstliche Beleuchtungen auf die Samenverbreitung durch Singvögel auswirken.

Kasten 4: Ökosystemrelevante direkte Auswirkungen durch künstliche Beleuchtung auf Organismen und in der Folge indirekte Effekte auf Ökosystemebene.



2.2.5 Mögliche Beeinträchtigung des Menschen

Werden einzelne Arten oder Ökosystemleistungen bzw. -funktionen durch künstliches Licht beeinträchtigt, geht das zu Lasten der Lebensgrundlage zahlreicher Organismen und wirkt sich dadurch mittelbar auch auf den Menschen aus. Zur Erhaltung der für den Menschen lebensnotwendigen Ökosystemleistungen sind funktionierende Ökosysteme erforderlich. Diese können zwar in bestimmtem Umfang die Beeinträchtigungen durch einzelne Umweltstressoren auffangen, doch eine Schwächung durch mehrere Faktoren kann die Leistungen der Ökosysteme insgesamt vermindern oder Ökosystemfunktionen beeinträchtigen. Ein bewusster Umgang mit künstlichem Licht kann daher erheblich zum Schutz unserer Ökosysteme beitragen und wichtige ökologische Funktionen erhalten.

Der Mensch selbst ist evolutionsbiologisch gesehen tagaktiv mit einem hohem Adaptionspotenzial und ausgeprägten visuellen Anforderungen an seine Umgebung. Das höchste Risiko, den Tagesrhythmus durch falsche Lichtexposition zu verlieren, haben Menschen, die dauerhaft entgegen ihrer rhythmischen Veranlagung (Chronotyp) leben, z. B. durch Schichtarbeit oder häufige Jetlags. Künstliche Lichtexposition erfahren Menschen überwiegend in Innenräumen und durch Monitore und Displays. Trotzdem warnt die Amerikanische Medizinische Gesellschaft (AMA) vor zu hellem Straßenlicht durch moderne, hoch effiziente LED-Beleuchtungen.⁶ Die AMA empfiehlt LED-Straßenbeleuchtung mit geringem Blaulichtanteil zu nutzen, konkret werden Farbtemperaturen (correlated color temperature = cct) von weniger als 3000 Kelvin empfohlen. Die AMA beruft sich dabei auf die Publikation von FALCHI et al. (2011), die 4000 Kelvin LED als fünf Mal störender für unseren Schlafzyklus einschätzen als herkömmliche Straßenbeleuchtung, z. B. durch Natriumdampf-Hochdruckleuchten. Der Anstieg der Helligkeit im öffentlichen Raum wird mit reduziertem Schlaf, beeinträchtigter Tagesleistung und größerer Häufigkeit von Fettleibigkeit in Zusammenhang gebracht (OHAYON & MILESI 2016, KOO et al. 2016). Zudem wurde ein Zusammenhang zu neuronalen Erkrankungen wie Parkinson (ROMEO et al. 2013) und zu Prostata und Brustkrebs aufgezeigt (GARCIA-SAENZ et al. 2018). Konstante Beleuchtung in der Nacht kann Tumorwachstum begünstigen (BUKALEV et al. 2013, DAUCHY et al. 2014) und gleichzeitig werden schlechtere Wirkungen von tumorhemmenden Pharmaka in Tierversuchen attestiert (BLASK et al. 2014, DAUCHY et al. 2014).

Vor allem Lichteinflüsse in einem Spektralbereich zwischen 460 - 480 nm werden für zirkadiane Störungen verantwortlich gemacht (vgl. z. B. BRAINARD et al. 2001, BAILES & LUCAS 2013). Bei Nacht ist die Retina gegenüber diesem Spektrum besonders empfindlich. In hoher Intensität kann eine direkte Exposition, etwa durch direktes Leuchten mit einer LED-Taschenlampe in das Auge für einen Zeitraum länger als 10 Sekunden,⁷ sogar zu Schäden an der Netzhaut führen (siehe dazu auch BONMATI-CARRION et al. 2014). Weißes oder blaues Licht wird bei Laborratten als stärkerer Auslöser für ein erhöhtes Wachstum von immunrelevanten Zellen und auch für depressionsähnliche Verhaltensänderungen als rotes Licht diskutiert (BEDROSIAN et al. 2013). Allerdings ist der Forschungsstand derzeit noch nicht eindeutig. So konnten DAUCHY et al. (2015) nachweisen, dass Melatonin und der zirkadiane Stoffwechsel bei Laborratten auch mit rotem Licht (630 nm) in geringer Beleuchtungsstärke, wie beispielsweise durch Notlichtlampen in Krankenhäusern, unterdrückt werden kann. Wie hoch die Exposition von künstlichem Licht in der Nacht sein muss,

⁶ American Medical Association (Hrsg.) Report of the Council on Science and Public Health, CSAPH Report 2-A-16, 2016 (AMA Report; zuletzt abgerufen am 22.01.2019).

⁷ Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Licht emittierende Dioden (LEDs). Photobiologische Sicherheit. 1. Auflage. Dortmund 2017, Artikel 2079. DOI: 10.21934/baua:praxiskompakt20170606.

um gesundheitliche Einbußen bei Menschen zu verursachen, hängt mutmaßlich von der Prädisposition des Einzelnen sowie von der Lichtexposition während des Tages ab. Außerdem besteht noch Forschungsbedarf über die tatsächlichen Einflüsse von Straßenbeleuchtungen, die in Schlafzimmer hineinleuchten.

2.3 Zusammenfassung der Auswirkungen künstlichen Lichts

Künstliches Licht in der Nacht hat unterschiedliche Auswirkungen. Einige Organismen werden durch Beleuchtung angelockt, andere abgestoßen. Diese Verhaltensänderungen haben indirekte Auswirkungen auf die Lebensbedingungen in Ökosystemen. Aufgrund der Summe unterschiedlicher Veränderungen ist es bislang noch schwer einschätzbar, wie nachteilig sich die Veränderung von Lebensräumen durch künstliches Licht im Einzelnen auf die betroffenen Populationen auswirken. Mit besonders nachteiligen Auswirkungen ist bei sensiblen Organismen mit einer hohen Spezialisierung auf die Nachtnische und mit geringen Adaptationsmöglichkeiten zu rechnen. Zu diesen gehören nachtaktive Insekten, Amphibien und Fledermäuse. Durch die Verhaltensänderungen werden aber auch die Ökosystemleistungen von tagaktiven Organismen beeinträchtigt. Diese Beeinträchtigungen können sich wiederum kaskadenartig in Ökosystemen ausweiten und weitere Negativeffekte auslösen. Auch zirkadiane und saisonale Rhythmen werden durch Licht in der Nacht gestört. Vor allem der kurzweilige Blaulichtanteil von Außenbeleuchtungen, der durch den Trend zu weißer Straßenbeleuchtung rasant zunimmt, beeinflusst die zirkadianen und saisonalen Rhythmen höherer Wirbeltiere inklusive des Menschen. Verschiedene Studien weisen auf einen Zusammenhang zwischen erhöhter Exposition künstlichen Lichts während der Nachtzeit und Stoffwechselkrankheiten, neuronalen Erkrankungen sowie der Bildung von Tumorarten an Reproduktionsorganen hin. Es besteht ein dringender Forschungsbedarf, inwieweit der Mensch durch Außenraumbeleuchtungen in seinem Wohlbefinden und in seiner Gesundheit beeinträchtigt werden kann und welcher ökonomische Wert durch die Verschlechterung einer Wohnsituation durch Raumaufhellung aufgrund von Außenraumbeleuchtungen zugrunde gelegt werden könnte.

3 Teil **Rechtliche Anforderungen an Außenbeleuchtungen**

Außenbeleuchtungen unterliegen unterschiedlichen rechtlichen Anforderungen. Diese können sich aus dem Naturschutz-, Immissionsschutz-, Bauplanungs- und Verkehrssicherungsrecht ergeben. Da sich die Anforderungen und deren Voraussetzungen unterscheiden, werden die jeweiligen Pflichten getrennt dargestellt.

3.1 Naturschutzrechtliche Pflichten

Künstliches Licht hat vielfältige nachteilige Auswirkungen auf Tiere, Pflanzen und die Sichtbarkeit des natürlichen Nachthimmels. Das Naturschutzrecht enthält mehrere Schutzvorschriften, um derartige Auswirkungen zu unterbinden bzw. zu minimieren. Diese sind insbesondere die artenschutzrechtlichen Verbote des § 44 Abs. 1 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG), der allgemeine Schutz von Natur und Landschaft gem. §§ 13 ff. BNatSchG sowie der Schutz von Natura 2000-Gebieten nach § 34 Abs. 2 BNatSchG.

3.1.1 Artenschutzrechtliche Zugriffsverbote

Um empfindliche Arten zu schützen, enthält § 44 Abs. 1 BNatSchG als artenschutzrechtliches Instrument mehrere Verbotstatbestände. Unterschieden wird zwischen dem Verletzungs- und Tötungsverbot (nachfolgend Tötungsverbot) gem. § 44 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG, dem Störungsverbot gem. § 44 Abs. 1 Nr. 2 BNatSchG und dem sog. Lebensstättenschutz gem. § 44 Abs. 1 Nr. 3 BNatSchG. Diese werden nachfolgend einzeln dargestellt.

3.1.1.1 Artenschutzrechtliche Zugriffsverbote

Das artenschutzrechtliche Tötungsverbot ist in § 44 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG geregelt. § 44 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG untersagt, einem Exemplar einer besonders geschützten Art nachzustellen, es zu fangen, zu verletzen oder zu töten. Welche Tierarten zu den besonders geschützten Arten zählen, ergibt sich aus § 7 Abs. 2 Nr. 13 BNatSchG. Dazu gehören alle Fledermausarten, europäische Vogelarten nach der Vogelschutzrichtlinie⁸ und 41 Schmetterlingsarten.⁹ Darunter ist z. B. ein in Deutschland verbreiteter Nachtfalter, der Hecken-Wollfalter (*Eriogaster catax*), aber auch andere Insekten wie etwa Hornissen (*Vespa crabro*)¹⁰. Da nicht alle lichtempfindlichen Tierarten zu den besonders geschützten Arten zählen und der Schutz von lediglich national geschützten Arten durch § 44 Abs. 5 S. 5 BNatSchG wieder begrenzt wird,¹¹ ist der vom Tötungsverbot vermittelte Schutz eingeschränkt. Zudem ergeben sich Schwierigkeiten Beeinträchtigungen durch künstliches Licht artspezifisch nachzuweisen. Daraus resultieren Hürden, welche die Anwendung des artenschutzrechtlichen Tötungsverbotes insbesondere bei Insekten und vergleichbaren lichtempfindlichen Tiergruppen erschweren.

Ein Verstoß gegen das Tötungsverbot liegt vor, wenn sich die Tötung oder Verletzung als unausweichliche Konsequenz einer Handlung erweist. In diesem Sinne könnte die Errichtung oder der Betrieb einer Lichtanlage gegen das Tötungsverbot verstoßen. Dazu zählt – wie oben beschrieben – die störende Wirkung künstlichen Lichts, die den Tod lichtempfindlicher Tiere verursacht, etwa indem Insekten oder Käfer an die Lichtquelle angelockt wer-

⁸ Richtlinie 2009/147/EG v. 30.11.2009, ABIEG L 20/7, zuletzt geändert durch RL 2013/17/EU v. 13.5.2013, ABIEU L158/193.

⁹ Anhang IV lit. a Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie v. 21.5.1992 (sog. FFH-RL), ABIEG L 206/7, zuletzt geändert durch RL 2013/17/EU v. 13.5.2013, ABIEU 158/193.

¹⁰ Anlage 1 BArtSchV.

¹¹ Heugel, in: Lütkes/Ewer (Hrsg.), BNatSchG, 2. Aufl., 2018, § 44, Rn. 52.

den und dort durch Hitze, Erschöpfung oder Fressfeinde zu Tode kommen. Allerdings wird von einer Lichtanlage eine solche Tötung nicht unmittelbar hervorgerufen, wenn die Lichtimmissionen zu einer Verschlechterung des Habitats führen.¹² Das geschieht, wenn beispielsweise eine nächtliche Beleuchtung die Eignung eines Fledermaushabitats aufhebt. In diesen Fällen könnte stattdessen das Störungsverbot verletzt sein (siehe Kapitel 3.1.1.2).

Allerdings genügt nicht bereits die Tötung eines einzelnen Exemplars einer geschützten Art, um die Verbotswirkung auszulösen. Denn bei Außenbeleuchtungen – z. B. Straßenbeleuchtungen oder Lichtwerbeanlagen – handelt es sich in der Regel um Vorhaben (i. S. d. § 44 Abs. 5 S. 1 BNatSchG), auf welche die zusätzlichen Anforderungen des § 44 Abs. 5 S. 2 Nr. 1 BNatSchG anzuwenden sind: Demnach liegt kein Verstoß gegen das Tötungsverbot vor, wenn die beeinträchtigende Wirkung des künstlichen Lichts kein „signifikant erhöhtes“ Tötungsrisiko hervorruft und die gebotenen, fachlich anerkannten Schutzmaßnahmen angewendet wurden.

Signifikant erhöht sind die Tötungsrisiken, wenn Tiere betroffen sind, die aufgrund ihrer Verhaltensweisen im Vorhabenbereich ungewöhnlich stark von den Auswirkungen des künstlichen Lichts betroffen sein können und sich diese Risiken durch Vermeidungsmaßnahmen nicht verhindern lassen, so dass es aus naturschutzfachlicher Sicht zu einer deutlichen Steigerung des Tötungsrisikos kommt.¹³ In solchen Fällen ist eine naturschutzfachliche Einzelfallbewertung notwendig.¹⁴ Insgesamt bestehen erhebliche Schwierigkeiten, den Signifikanzansatz zu operationalisieren. Wird die Population durch die verursachte Beleuchtung aufgrund von Individuenverlusten beeinträchtigt, lässt sich in einem Umkehrschluss annehmen, dass dafür eine signifikante Erhöhung des Tötungsrisikos eine notwendige Bedingung sein muss,¹⁵ d. h. die Schwelle der signifikanten Erhöhung überschritten wurde. Ist die naturschutzfachliche Einzelfallbewertung von einer Behörde vorzunehmen, steht dieser eine Einschätzungsprärogative zu (siehe Kasten 5).¹⁶

¹² Huggins/Schlacke, Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 87, 96 f.

¹³ Dies., Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 91.

¹⁴ BVerwG, Urt. v. 09.07.2008 – 9 A 14/07, NVwZ 2009, 302, Rn. 91.

¹⁵ Bick/Wulfert, NVwZ 2017, 346, 349, die den mittelbaren Bezug herausarbeiten.

¹⁶ BVerwG, Urt. v. 13.05.2009 – 9 A 73/07, NuR 2009, 711, 718; BVerwG, Urt. v. 09.07.2008 – 9 A 14/07, NVwZ 2009, 302, 65 f.

Kasten 5: Die Einschätzungsprärogative

Die Gerichte weisen den (Genehmigungs-)Behörden eine Einschätzungsprärogative zu, wenn es an eindeutigen ökologischen Erkenntnissen fehlt und sich die jeweiligen Vorschriften daher nur erschwert anwenden lassen (vgl. BVerwG, Urt. v. 21.11.2013 - 7 C 40/11., NVwZ 2014, 524, Rn. 19); wenn also beispielsweise keine wissenschaftliche Eignigkeit besteht, wann Beleuchtungen signifikante Tötungsrisiken verursachen. In diesen Fällen wird die gerichtliche Kontrolldichte zurückgenommen und der Behörde eine Entscheidungsbefugnis eingeräumt. Die Gerichte überprüfen dann nur, ob die Behörde wissenschaftliche Standards beachtet und in vertretbarer Weise die Risiken, die sich aus dem Eingriff oder Vorhaben ergeben, ermittelt und anschließend bewertet hat (zur Methodik: KRATSCH, in: SCHUMACHER & FISCHER-HÜFTLE (Hrsg.), BNatSchG, 2. Aufl., 2011, § 44, Rn. 66 ff.). Für die Bewertung von Lichtimmissionen bedeutet das, dass die betroffene Behörde die hier im Leitfaden vorgestellten aktuellen Forschungsergebnisse für ihre Risikobewertung zu Grunde legen muss.

Ein Verstoß gegen das Tötungsverbot liegt indes nicht vor, wenn die gebotenen, fachlich anerkannten Schutzmaßnahmen ergriffen werden, die in Kapitel 4 beschrieben sind. Wann eine Maßnahme geboten ist, ist bislang nicht geklärt. Vieles spricht dafür, dass Schutzmaßnahmen nur dann geboten sind, wenn sie aus naturschutzfachlicher Sicht im konkreten Fall geeignet sind, die signifikanten Tötungsrisiken zu vermeiden.¹⁷

Werden diese Voraussetzungen nicht eingehalten, tritt die Verbotswirkung des § 44 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG ein. Errichtung und Betrieb der Beleuchtungsanlage sind dann zu untersagen, wenn keine Ausnahmegenehmigung oder Befreiung vorliegt. Zusammengefasst ist eine Beleuchtungsanlage gem. § 44 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG verboten, wenn

- lichtempfindliche Tiere, die einer besonders geschützten Art angehören, verletzt oder getötet werden können,
- diese Tiere aufgrund ihrer Verhaltensweisen, insbesondere ihrer Lichtempfindlichkeit, besonders stark von der Beleuchtung betroffen sind und
- keine Maßnahmen (wie in den Handlungsempfehlungen in Kapitel 4 beschrieben) ergriffen wurden, um nachteilige Auswirkungen zu vermeiden.

3.1.1.2 Artenschutzrechtliches Störungsverbot

Neben dem Tötungsverbot besteht ein artenschutzrechtliches Störungsverbot, das in § 44 Abs. 1 Nr. 2 BNatSchG geregelt ist. Von dem Störungsverbot sind allerdings nur europäische Vogelarten und die streng geschützten Arten erfasst, worunter die in Anhang IV der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-RL) gelisteten Arten zählen. Zudem ist das Verbot auf die Fortpflanzungs-, Aufzucht-, Mauser-, Überwinterungs- und Wanderungszeiten beschränkt. Eine Beleuchtungsanlage verursacht einen Verstoß, wenn die Störungen des künstlichen Lichts erheblich sind. Unter einer Störung ist jede nachteilige Einwirkung auf die psychische Verfassung eines Tieres zu verstehen, die sich in Angst-, Flucht-, oder Schreckreaktionen äußert.¹⁸ Erheblich ist die Störung, wenn sich der Erhaltungszustand der lokalen Population der betroffenen Art verschlechtert. Können lokale Populationen diese Auswirkungen – z. B. durch Migration – kompensieren, liegt keine erhebliche Störung

¹⁷ Dies ergibt sich aus der Entstehungsgeschichte des Wortlauts, vgl. Fellenberg, Stellungnahme zum Entwurf der BNatSchG-Novelle 2017, BT-Drs. 18/11939, S. 5.

¹⁸ Huggins/Schlacke, Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 102 m.w.N.

vor. Das dürfte auf häufige Arten, darunter die sog. „Allerweltsarten“ zutreffen, deren Populationen eine solche Ausdehnung haben, dass sie Störungen verkraften können.¹⁹ Dagegen ist die Erheblichkeit der Störung eher zu bejahen, wenn die betroffenen Individuen kleinen Populationen angehören.²⁰

Der von § 44 Abs. 1 Nr. 2 BNatSchG vermittelte Schutz ist daher selektiv und dürfte insbesondere für die Wanderungszeit lichtempfindlicher Tiere (z. B. Wanderfische, Kröten oder Zugvögel) sowie für Rückzugsgebiete von Fledermäusen bedeutsam sein.²¹ Liegt eine erhebliche Störung vor, kann ein Verstoß dadurch abgewendet werden, indem die Auswirkungen des künstlichen Lichts soweit reduziert werden, dass eine Verschlechterung des Erhaltungszustands durch Vermeidungsmaßnahmen verhindert wird.²² Dafür sind die in Kapitel 4 beschriebenen Handlungsempfehlungen umzusetzen. Dies erfordert für wandernde Arten insbesondere die Beseitigung von Lichtbarrieren (siehe Beeinträchtigung von Tieren und Lebensräumen, Kapitel 2.2.3).

3.1.1.3 Artenschutzrechtlicher Lebensstättenschutz

Ein weiteres Verbot (§ 44 Abs. 1 Nr. 3 BNatSchG) untersagt die Entnahme, Beschädigung oder Zerstörung von Fortpflanzungs- und Ruhestätten (sog. Lebensstätten) von wild lebenden Tieren besonders geschützter Arten (vgl. o.). Lebensstätten sind Orte, die für eine erfolgreiche Reproduktion einer Art benötigt werden und solche, zu denen sich Tiere zur Regeneration, etwa zur Rast, zum Schlafen oder zum Schutz zurückziehen.²³ Eine Beschädigung liegt vor, wenn die ökologische Funktion der Lebensstätte nicht mehr oder nur noch im eingeschränkten Umfang gegeben ist.²⁴ Ob das Verbot auch mittelbare Beeinträchtigungen – wie etwa durch Licht – untersagt, ist noch nicht höchstrichterlich entschieden. Vieles spricht für eine funktionale Betrachtungsweise,²⁵ sodass es nur auf die Beeinträchtigung der ökologischen Funktion ankommt und eine künstliche Lichtimmission folglich einen Verstoß verursachen kann. Gleiches gilt für das Zerstören, das als so wesentliche Beschädigung definiert ist, dass die Lebensstätte für ihren Zweck völlig unbrauchbar wird.²⁶ Inwieweit die Lebensstätten durch künstliches Licht ihre Funktion einbüßen, ist eine naturschutzfachliche Frage, deren Beantwortung von den Verhaltensweisen der jeweiligen Art abhängt.²⁷ Wird eine als relevant angesehene ökologische Funktion nachweislich beeinträchtigt, tritt die Verbotswirkung (des § 44 Abs. 1 Nr. 3 BNatSchG) nur dann nicht ein, wenn die Auswirkungen durch Vermeidungsmaßnahmen unterbunden werden oder die ökologische Funktion der Lebensstätte im räumlichen Zusammenhang weiterhin erfüllt wird (§ 44 Abs. 5 S. 2 Nr. 3 BNatSchG).

¹⁹ BVerwG, Urt. v. 12.03.2008 – 9 A 3/06, NuR 2008, 633, Rn. 258.

²⁰ Gellermann, in: Landmann/Rohmer (Hrsg.), Umweltrecht, § 44 BNatSchG, Rn. 12.

²¹ Vgl. dazu ausführlich Huggins/Schlacke, Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 102 ff.

²² Schütte/Gerbig, in: Schlacke (Hrsg.), GK-BNatSchG, 2. Aufl., 2017, § 44, Rn. 30 f.

²³ Schütte/Gerbig, in: Schlacke (Hrsg.), GK-BNatSchG, 2. Aufl., 2017, § 44, Rn. 30 f.

²⁴ Gellermann, in: Landmann/Rohmer (Hrsg.), Umweltrecht, § 44 BNatSchG, Rn. 20.

²⁵ So auch Kratsch, in: Schumacher/Fischer-Hüftle (Hrsg.), BNatSchG, 2. Aufl., 2011, § 44, Rn. 31; Heugel, in: Lütke/Ewer (Hrsg.), BNatSchG, 2. Aufl., 2018, § 44, Rn. 18; Gellermann, in: Landmann/Rohmer (Hrsg.), Umweltrecht, § 44 BNatSchG, Rn. 20.

²⁶ Louis, NuR 2009, 91, 94.

²⁷ BVerwG, Urt. v. 13.05.2009 – 9 A 73/07, NuR 2009, 711, 719; Kratsch, in: Schumacher/Fischer-Hüftle (Hrsg.), BNatSchG, 2. Aufl., 2011, § 44, Rn. 31.

3.1.2 Allgemeiner Schutz von Natur und Landschaft

Das Naturschutzrecht sieht (gem. §§ 13 ff. BNatSchG) einen allgemeinen Schutz von Natur und Landschaft als flächendeckenden Mindestschutz²⁸ vor (sog. Eingriffsregelung). Die Eingriffsregelung knüpft an eine erhebliche Beeinträchtigung der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts oder des Landschaftsbilds ein Rechtsfolgenregime, das vorrangig auf Vermeidung und nachrangig auf Ausgleich bzw. Ersatz der Beeinträchtigungen gerichtet ist. Eine erhebliche Beeinträchtigung bestimmt sich nach naturschutzfachlichen Gesichtspunkten und entscheidet sich insbesondere danach, ob die betroffenen Arten bzw. Lebensräume noch in annähernd gleicher Zahl und Qualität wie vor dem Eingriff vorhanden sind.²⁹ Die Erheblichkeit der Beeinträchtigungen durch künstliches Licht lässt sich wohl nur im Einzelfall ermitteln. Zu beachten ist, dass sich die Erheblichkeit wegen erhöhter Schädigungspotenziale aus der funktionalen Bedeutung einer Landschaft als Durchzugsgebiet für wandernde Tierarten ergeben kann.³⁰ Das ist insbesondere für Tierarten bedeutsam, die von künstlichem Licht während Migrations- und Dispersionsphasen beeinträchtigt werden. Liegt eine erhebliche Beeinträchtigung vor, ist diese gem. § 15 Abs. 1 BNatSchG durch Vermeidungsmaßnahmen abzuwenden (Vermeidungspflicht). Diese Pflicht zielt auf die möglichst schonende Verwirklichung des Vorhabens am gewählten Standort ab.³¹ Dies schließt die in Kapitel 4 genannten Maßnahmen mit ein. Dazu zählen unter anderem

- Reduzierung und Anpassung der Beleuchtungsstärken und Beleuchtungszeiten von Lichtquellen,
- Abschirmung der Leuchten zur Vermeidung von Lichtverschmutzung, insbesondere durch Abstrahlung nach oben und in die Horizontale,
- Einsatz von geeigneten Leuchtentypen mit entsprechender Beleuchtungsstärke und Spektralbereich sowie
- Ausführung von Bauarbeiten außerhalb von Brut- und Wanderzeiten.

Diese Maßnahmen genügen im Regelfall, um eine erhebliche Beeinträchtigung auszuschließen, weshalb es auf die nachrangigen Rechtspflichten des § 15 BNatSchG insoweit nicht ankommt. Sind Vermeidungsmaßnahmen nicht ausreichend oder unzumutbar, sind Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen zu ergreifen (§ 15 Abs. 2 BNatSchG). Insbesondere dürfte hierbei Schaffung und Erhalt von Habitaten bzw. Biotopen lichtempfindlicher Arten in Betracht kommen. Besonderheiten bei der Anwendung dieser Pflicht hinsichtlich künstlicher Beleuchtungen bestehen nicht.³²

²⁸ Kerkmann/Koch, in: Schlacke (Hrsg.), GK-BNatSchG, 2. Aufl., 2017, § 13, Rn. 8.

²⁹ BVerwG, Urt. v. 27.09.1990 – 4 C 44/87, NVwZ 1991, 364, 367; Fischer-Hüftle/Czybulka, in: Schumacher/Fischer-Hüftle (Hrsg.), BNatSchG, 2. Aufl., 2011, § 14, Rn. 31.

³⁰ Fischer-Hüftle/Czybulka, in: Schumacher/Fischer-Hüftle (Hrsg.), BNatSchG, 2. Aufl., 2011, § 14, Rn. 29.

³¹ BVerwG, Urt. v. 19.05.1998 – 4 C 11–96, NVwZ 1999, 528, 529; Ekardt/Hennig, NuR 2013, 694, 696; Kerkmann/Koch, in: Schlacke (Hrsg.), GK-BNatSchG, 2. Aufl., 2017, § 15, Rn. 5; Gassner/Heugel, Das neue Naturschutzrecht, 2010, Rn. 309.

³² Guter Überblick über Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen bei Klopfer, Umweltrecht, 4. Aufl. 2016, § 12, Rn. 211 ff.

Allerdings ist der Anwendungsbereich der Eingriffsregelung räumlich stark beschränkt. Im Ergebnis findet die Eingriffsregelung (§§ 13 ff. BNatSchG) nur bei Vorhaben im Außenbereich im Sinne des § 35 BauGB und bei planfeststellungsersetzenden Bebauungsplänen Anwendung (vgl. § 18 Abs. 2 BNatSchG). Vermeidung und Ausgleich von Eingriffen findet aber auch in der Bauleitplanung (s. Kapitel 3.3) Anwendung.³³

3.1.3 Schutz von Natura 2000-Gebieten

Nach dem Bundesnaturschutzgesetz gelten für geschützte Bestandteile von Natur und Landschaft besondere Schutzvorschriften. Hervorzuheben sind sog. Natura 2000-Gebiete. Das sind Vogelschutzgebiete und solche Gebiete, die nach der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-RL) von gemeinschaftlichem Interesse sind. In Deutschland gibt es derzeit 5.200 Natura 2000-Gebiete, die 15,5 % der terrestrischen Fläche Deutschlands einnehmen.³⁴

Zentrale Schutznorm für Natura 2000-Gebiete ist § 34 BNatSchG, die ein Verschlechterungsverbot enthält. Demnach darf ein Projekt (Errichtung oder Betrieb einer Beleuchtung, Lichtshow o. ä.)³⁵ die Erhaltungsziele oder den Schutzzweck maßgeblicher Bestandteile eines Schutzgebiets nicht erheblich beeinträchtigen.³⁶ Die Erhaltungsziele des Schutzgebiets werden bei der Unterschutzstellung angegeben und beziehen sich auf den Erhalt und auf die Wiederherstellung bestimmter Arten und Lebensräume (z. B. die Große Bartfledermaus (*Myotis brandtii*) oder Auenwälder). Der Erhaltungszustand ist als Gesamtheit der Einflüsse definiert, die sich langfristig auf die Verbreitung und die Größe der Populationen der betreffenden Arten auswirken.³⁷ Als Einflüsse sind sämtliche, d. h. auch mittelbare Auswirkungen des Projektes miteinzubeziehen,³⁸ worunter auch die Aufhellung der Nacht sowie die Verknappung der Nahrungsgrundlage für Vögel und Fledermäuse fällt, die etwa durch die Tötung von Insekten an Lichtquellen verursacht wird. Ob es zu einer Verschlechterung kommt, ist durch eine naturschutzfachliche Einzelfallbeurteilung zu ermitteln.³⁹ Eine Besonderheit des Verschlechterungsverbots gem. § 34 Abs. 2 BNatSchG ist, dass das Projekt nicht isoliert, sondern zusammen mit anderen Vorbelastungen und Einwirkungen zu prüfen ist. Dementsprechend müssen die Gesamtbelastungen und nicht nur die Projektauswirkungen bewertet werden.⁴⁰ Ist bei einer solchen Betrachtung zu erwarten, dass sich der Erhaltungszustand des Lebensraumes oder der Population einer Art durch das Projekt verschlechtert, liegt eine erhebliche Beeinträchtigung des Natura 2000-Gebiets vor.

Das Verschlechterungsverbot wird von einer Verträglichkeitsprüfung flankiert, die in § 34 Abs. 1 BNatSchG geregelt ist. Demnach sind Projekte, die Natura 2000-Gebiete erheblich beeinträchtigen können, einer Verträglichkeitsprüfung zu unterziehen. Um dies zu ermitteln, hat der Vorhabenträger eine Vorprüfung durchzuführen. Ergibt diese, dass Beeinträchti-

³³ Ausführlich Huggins/Schlacke, Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 180 ff. u. 204 f.

³⁴ <https://www.bfn.de/themen/natura-2000/natura-2000-gebiete.html> (zuletzt abgerufen am 13.03.2019).

³⁵ Der Projektbegriff ist wirkungsbezogen zu verstehen, vgl. nur BVerwG, Urte. v. 12.11.2014 – 4 C 34/13, NVwZ 2015, 596, Rn. 29.

³⁶ Möckel, in: Schlacke (Hrsg.), GK-BNatSchG, 2. Aufl., 2017, § 34, Rn. 51 ff.

³⁷ Ders., in: Schlacke (Hrsg.), GK-BNatSchG, 2. Aufl., 2017, § 7, Rn. 23.

³⁸ BVerwG, Urte. v. 09.07.2009 – 4 C 12/07, NVwZ 2010, 123, Rn. 11; Möckel, in: Schlacke (Hrsg.), GK-BNatSchG, 2. Aufl., 2017, § 34, Rn. 17; Erb, Untersuchungsumfang, 2013, S. 315.

³⁹ Huggins/Schlacke, Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 62 f.

⁴⁰ Allgemein Möckel, in: Schlacke (Hrsg.), GK-BNatSchG, 2. Aufl., 2017, § 34, Rn. 97 ff.; auf Licht bezogen Huggins/Schlacke, Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 64 ff.

gungen für die Erhaltungsziele oder den Schutzzweck nicht ohne vernünftige Zweifel ausgeschlossen werden können,⁴¹ sind Lichtanlagen prüfpflichtig. Eine Prüfpflicht kann für immobile und mobile Lichtanlagen sowie für Neu- und Änderungsvorhaben (z. B. Umrüstungen auf neue Beleuchtungstechnologien)⁴² bestehen. Dabei ist es nicht entscheidend, ob das Projekt im Schutzgebiet realisiert werden soll oder nicht. Entscheidend kommt es nur darauf an, ob das Projekt erhebliche Beeinträchtigungen im Schutzgebiet (mit-)auslösen kann. So können die Lichtimmissionen eines Hochhauses noch in 5 km Entfernung Anlock- und Schreckwirkungen erzeugen, sodass auch dann noch eine Prüfpflicht besteht.⁴³

Ergibt die Verträglichkeitsprüfung, dass eine erhebliche Beeinträchtigung der Erhaltungsziele oder des Schutzzweckes zu erwarten ist, kann das Projekt nur im Ausnahmefall zugelassen werden (§ 34 Abs. 3, 4 BNatSchG). Liegt keine abweichende Zulassung vor, verstößt das Projekt gegen § 34 Abs. 2 BNatSchG, sodass es zu untersagen ist.

3.2 Immissionsschutzrechtliche Pflichten

Neben dem Naturschutzrecht enthält auch das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) Pflichten, die beim Betrieb von Außenbeleuchtungen zu beachten sind. In der Regel sind Außenbeleuchtungen als Lichtanlagen nach dem BImSchG nicht genehmigungsbedürftig. Für diese gelten die sog. Betreiberpflichten des § 22 Abs. 1 S. 1 BImSchG. Hervorzuheben ist die Vermeidungspflicht und die Minimierungspflicht. Voraussetzung, damit diese Pflichten Anwendung finden, ist, dass von der Lichtanlage schädliche Umwelteinwirkungen ausgehen.

Einen Sonderfall stellen Beleuchtungen dar, die Teil einer immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen Anlage sind, z. B. Befeuerungen von mindestens 50 m hohen Windenergieanlagen oder die Beleuchtung eines Kraftwerkes mit mindestens 1 Megawatt Feuerungswärmeleistung.⁴⁴ Für diese gelten die über die Vermeidungspflicht hinausgehende Abwehrrpflicht und die Vorsorgepflicht nach dem Stand der Technik.⁴⁵

Nach der Abwehrrpflicht (§ 5 Abs. 1 Nr. 1 BImSchG) sind Lichtanlagen so zu errichten und zu betreiben, dass von diesen keine schädlichen Umwelteinwirkungen ausgehen. Dies schließt technische (z. B. UV-Filter) als auch nicht technische Maßnahmen (z. B. Beschränkung der Betriebszeiten) mit ein. Die Vorsorgepflicht (siehe Kasten 6) (§ 5 Abs. 1 Nr. 2 BImSchG) verlangt auch dann die Vornahme von Vermeidungsmaßnahmen nach dem Stand der Technik, wenn Unsicherheiten verbleiben, ob die von der Anlage hervorgerufenen Lichtimmissionen schädliche Umwelteinwirkungen verursachen.

⁴¹ St. Rspr. vgl. nur BVerwG, Ur. v. 29.09.2011 – 7 C 21/09, juris, Rn. 40.

⁴² Vgl. Huggins/Schlacke, Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 227 f.

⁴³ Dazu und zum vorstehenden vertiefend dies., Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 60 f.

⁴⁴ Die immissionsschutzrechtliche Genehmigungspflicht besteht, wenn die Hauptanlage in der Anlage 1 der 4. BImSchV aufgeführt ist. Lichtanlagen können für diese Hauptanlagen eine dienende Funktion haben und sind dann als Nebenanlage ebenfalls genehmigungspflichtig; dazu dies., Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 141 f.

⁴⁵ Siehe hierzu dies., Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 142 ff.

Kasten 6: Das Vorsorgeprinzip

Das Vorsorgeprinzip besagt, dass bereits die Entstehung von Umweltgefahren und Umweltschäden so weit wie möglich vermieden werden muss. Das Vorsorgeprinzip ist politische Handlungsmaxime (vgl. KLOEPFER, Umweltrecht, 4. Aufl. 2016, § 4, Rn. 22 ff.). Konkretisiert findet sich diese Maxime in der Möglichkeit wieder, einen vorsorgenden Umweltschutz in Bebauungsplänen durch Festsetzungen zu verfolgen. Das Vorsorgeprinzip ist vereinzelt gesetzlich verankert (z. B. § 5 Abs. 1 Nr. 2 BImSchG). Für die Anwendung von Rechtsnormen auf Beleuchtungssituationen hat das Vorsorgeprinzip eine (zumeist) indirekte Bedeutung. So sind die naturschutzrechtlichen Verschlechterungsverbote Ausdruck des Vorsorgeprinzips. Bedeutsamer ist aber das Vorsorgeprinzip für den Umgang mit Erkenntnislücken und wissenschaftlichen Unsicherheiten: Bestehen in der Abschätzung von Umweltauswirkungen solche Unsicherheiten, darf mit Prognosewahrscheinlichkeiten, Schätzungen und Analogien gearbeitet werden. Wie weit das Vorsorgeprinzip im Einzelnen reicht, hängt vom Schutzzweck des jeweiligen Gesetzes ab (SCHLACKE, Umweltrecht, 7. Aufl. 2019, § 3, Rn. 3).

3.2.1 Schädliche Umwelteinwirkungen

Die Vermeidungspflicht des § 22 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 BImSchG verpflichtet den Betreiber oder Errichter einer Lichanlage dazu, schädliche Umwelteinwirkungen, die von der Anlage ausgehen, nach dem Stand der Technik zu vermeiden. Lichtimmissionen sind nach der Definition des § 3 Abs. 1 BImSchG als schädliche Umwelteinwirkungen einzustufen, wenn sie nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen. Der Begriff der Allgemeinheit bezieht auch die nicht-menschliche Umwelt mit ein, sodass auch die in § 1 Abs. 1 BImSchG genannten Schutzgüter erfasst werden: Der Schutz von Mensch, Tieren und Pflanzen, Boden, Wasser, Atmosphäre sowie Kultur und sonstige Sachgüter.⁴⁶ Der insoweit weite Schutzbereich erfasst damit sämtliche nachteilige Auswirkungen künstlichen Lichts. Eine Gefahr geht von einer Lichanlage jedenfalls dann aus, wenn sie gegen die artenschutzrechtlichen Verbote verstößt (s. Kapitel 3.1.1) oder eine erhebliche Beeinträchtigung eines Natura 2000-Gebietes hervorruft (s. Kapitel 3.1.3).

Daneben verursachen Lichanlagen dann schädliche Umwelteinwirkungen, wenn mit der Anlage Auswirkungen verbunden sind, die einen erheblichen Nachteil hervorrufen. Nachteile sind die oben beschriebenen Auswirkungen künstlichen Lichts, wie etwa die durch Lichtimmissionen verursachte Tötung von Individuen (z. B. Insekten).

Die Erheblichkeit des Nachteils bestimmt sich durch eine Abwägung im Sinne einer gebietsspezifischen Unzumutbarkeit.⁴⁷ Abgewogen werden die in der räumlichen Umgebung betroffenen Nutzungsinteressen an der Lichtnutzung mit den Naturschutzinteressen bzw. gegenläufigen menschlichen Nutzungsinteressen. Hierbei ist die besondere Empfindlichkeit lichtempfindlicher Arten zu berücksichtigen. Dagegen können die von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz erarbeiteten Grenzwerte nach den Gebietstypen der Baunutzungsverordnung (BauNVO) nicht herangezogen werden, da diese nur die menschlichen Nutzungsinteressen austarieren und Naturschutzinteressen nicht mit einschließen.

⁴⁶ Führ, in: ders. (Hrsg.), GK-BImSchG, 2016, § 1, Rn. 166 ff.

⁴⁷ Ausführlich Huggins/Schlacke, Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 145 ff. m.w.N.; ähnlich Jarass, BImSchG, 12. Aufl., 2017, § 3, Rn. 53.

Bewertungskriterien der Abwägung sind somit die pauschalisierte Empfindlichkeit des Schutzguts (d. h. die Empfindlichkeit von Vögeln, Fledermäusen, Insekten o. ä.), die Störungsintensität (Beleuchtungsstärke, die Lichtfarbe und die Dauer der Lichtimmissionen) sowie die gebietsspezifische Bewertung der Umwelteinwirkungen (insbesondere die Nähe zu schützenswerten Naturräumen).⁴⁸

3.2.2 Vermeidungspflicht

Liegt eine Gefahr oder ein erheblicher Nachteil und damit eine schädliche Umwelteinwirkung vor, so muss der Betreiber gem. § 22 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 BImSchG Vermeidungsmaßnahmen nach dem Stand der Technik ergreifen. Hierbei handelt es sich um technische Maßnahmen zur Lichtsteuerung, Lichtlenkung sowie der Wahl der Leuchtmittel. Nicht zu den technischen Maßnahmen gehören die Standortwahl der Lichtanlage sowie die Betriebseinstellung bzw. -beschränkung. Die hier im Leitfaden vorgeschlagenen technischen Vorkehrungen (Kapitel 4) entsprechen dem allgemeinen Stand der Technik und sind daher im Sinne des § 22 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 BImSchG anwendbar. Dazu gehören insbesondere

- die Vermeidung von Lichtemissionen in Bereiche (Abstrahlwinkel), in denen sie keinem Beleuchtungszweck dienen (Wahl der Abstrahlungsgeometrie),
- die Vermeidung von Lichtemissionen in Zeiten, in welchen kein Beleuchtungszweck vorhanden ist (Beleuchtungsstärkesteuerung),
- die Vermeidung von überdimensionierten Beleuchtungen, die über das erforderliche Maß hinausgehen (Wahl der Beleuchtungsstärke) und
- die Wahl eines Lampentyps, dessen spektrale Zusammensetzung des Lichts eine möglichst geringe Anlockwirkung entfaltet (Wahl der Lichtfarbe).⁴⁹

Die Vermeidungspflicht wird durch den Verhältnismäßigkeitsgrundsatz begrenzt. Verhältnismäßig sind Maßnahmen, die geeignet, erforderlich und angemessen sind. Die Maßnahmen sind geeignet und bei schädlichen Umweltauswirkungen der Lichtimmissionen auch erforderlich. Eine Maßnahme ist nicht mehr angemessen, wenn sie im krassen Missverhältnis zum angestrebten Erfolg steht. Im Rahmen der Angemessenheit ist aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten, die schädlichen Umwelteinwirkungen zu unterbinden, im Regelfall zu erwarten, dass verhältnismäßige Maßnahmen zur Auswahl stehen.⁵⁰ Daher stellt die Anforderung, verhältnismäßige Vermeidungsmaßnahmen auszuwählen, keine besondere Hürde dar.

3.2.3 Minimierungspflicht

Über die Vermeidungspflicht hinaus enthält § 22 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 BImSchG eine Minimierungspflicht. Danach sind schädliche Umweltauswirkungen künstlichen Lichts, die nicht durch technische Vorkehrungen nach dem Stand der Technik vermieden werden können, auf ein Mindestmaß zu begrenzen. Minimierungsmaßnahmen betreffen die Standortauswahl der Lichtanlage sowie Betriebseinstellungen und Betriebseinschränkungen. Beispiele sind Halbnacht- oder Nachtabschaltungen von Beleuchtungsanlagen und Abschaltungen während der Migrationszeit lichtempfindlicher Tiere, etwa während des Vogelzuges. Welche Minimierungsmaßnahmen zu welchem Ausmaß angewendet werden müssen, ist im

⁴⁸ Zu den Kriterien im Einzelnen Huggins/Schlacke, Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 146 ff.

⁴⁹ Dies., Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 165 f.

⁵⁰ Dies., Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 168 f.

Rahmen einer Abwägung zu ermitteln,⁵¹ die das Mindestmaß bestimmt. Hierbei sind die Naturschutzinteressen, die Interessen der Nachbarschaft und der Allgemeinheit ebenso zu berücksichtigen wie der Aufwand für die Minimierungsmaßnahmen.⁵² Für die Abwägung ist besonders auf die spezifische Gebietsprägung zu achten.⁵³ Dementsprechend fällt die Abwägung umso eher zugunsten der Naturschutzinteressen aus, wenn sich in der Nähe wertvolle Biotope, Ökosysteme oder Habitate empfindlicher Tiere befinden.

3.2.4 Schutzlücken

Allerdings weisen die Betreiberpflichten des § 22 Abs. 1 S. 1 BImSchG eine nicht unbedeutende Schutzlücke auf. Lichtanlagen, die nicht gewerblichen Zwecken dienen und die nicht im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden, sind von den Betreiberpflichten ausgenommen (§ 22 Abs. 1 S. 3 BImSchG). Zum einen sind dies privat genutzte Lichtanlagen wie Haus- und Gartenbeleuchtungen. Zum anderen trifft das auf gemeindlich betriebene Straßenbeleuchtungen zu, da sie vorrangig der öffentlichen Daseinsvorsorge und keinem wirtschaftlichen Zweck dienen. Solange der Gesetzgeber diese Schutzlücke nicht schließt, gelten für gemeindlich betriebene Straßenbeleuchtungen daher nur die naturschutzrechtlichen Anforderungen.

Schwieriger ist die Beurteilung von Straßenbeleuchtungen, die von privaten Unternehmen unterhalten und als wirtschaftlich verwertbare Leistung angeboten werden. Für die Frage, ob die Anlage im Rahmen einer wirtschaftlichen Unternehmung Verwendung findet (d. h. betrieben wird), ist entscheidend, wer Anlagenbetreiber ist und die Steuerungsfähigkeit innehat. Das ist grundsätzlich die Gemeinde, nicht der private Auftragnehmer. Wird allerdings die Straßenbeleuchtung nach dem Betreiber- oder Öffentlich-Private-Partnerschaft-Modell betrieben,⁵⁴ bei welchen das Unternehmen eine Pauschalvergütung erhält und das wirtschaftliche Risiko trägt, liegt eine wirtschaftliche Unternehmung vor.⁵⁵ Deshalb findet die Ausnahmeregelung des § 22 Abs. 1 S. 3 BImSchG bei diesen Modellen keine Anwendung, sodass in diesen Fällen die vorstehenden Vermeidungs- und Minimierungspflichten zu beachten sind.

Ferner entstehen Schwierigkeiten bei der Anwendung der Schutzvorschriften. Sie ergeben sich daraus, dass spezifische gesetzliche Regelungen fehlen und auch keine untergesetzlichen Konkretisierungen wie eine TA Licht, Rechtsverordnung oder Verwaltungsvorschriften existieren. Gleichzeitig fehlen in Teilen wissenschaftliche Nachweise, die das Herausbilden eines unbestrittenen Stands der Wissenschaft erschweren. Dies macht Einzelfallbewertungen erforderlich. Die dafür notwendige finanzielle und fachliche Ausstattung ist bei Vorhabenträgern und Behörden jedenfalls nicht ausreichend vorhanden, weshalb ein beachtliches Vollzugsdefizit besteht. Zudem bereitet der Umstand Probleme, dass subjektive Sicherheitsbedenken gegen reduzierte Beleuchtungsniveaus in der Regel statistisch nicht zu belegen sind (MARCHANT 2017).

⁵¹ Couzinet, Zulässigkeit von Immissionen, 2007, S. 428 f.

⁵² Jarass, BImSchG, 12. Aufl., 2017, § 22, Rn. 39.

⁵³ BVerwG, Beschl. v. 26.08.1988 – 7 B 124/88, NVwZ 1989, 257.

⁵⁴ Zu den Modellen Ringwald/Weichel, in: Ringwald/Rönitzsch/Riedel (Hrsg.), Praxishandbuch Öffentliche Beleuchtung, 2013, 93 ff.

⁵⁵ Huggins/Schlacke, Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 16

3.3 Bauplanerische Gestaltungsmöglichkeiten

Neben den naturschutz- und immissionsschutzrechtlichen Pflichten bietet das Bauplanungsrecht die Möglichkeit, Anforderungen an Außenbeleuchtungen zu konkretisieren und dadurch die Nutzung künstlichen Lichts zu steuern. Wichtiges Instrument des Bauplanungsrechts sind Bebauungspläne, die im Baugesetzbuch (BauGB) geregelt sind. Bebauungspläne sind Pläne, die von Gemeinden erlassen werden, um die bauliche Gestaltung und die möglichen Nutzungsarten eines bestimmten Teils des Gemeindegebiets zu steuern.

3.3.1 Festsetzungsoptionen der Gemeinde

Im Rahmen dieser Pläne kann die Gemeinde sogenannte Festsetzungen erlassen. Festsetzungen sind Regelungen, die die Art und Weise, wie eine Grundfläche bebaut werden darf, regelt. Die Möglichkeiten, Festsetzungen zu treffen, sind in § 9 Abs. 1 BauGB abschließend aufgezählt.⁵⁶ § 9 Abs. 1 Nr. 24 BImSchG ermächtigt die Gemeinde bauliche oder technische Vorkehrungen zum Schutz, Vermeidung oder Minderung von schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstiger Gefahren im Sinne des Bundesimmissionsschutzgesetzes festzusetzen. Unter technischen Vorkehrungen sind auch anlagenbezogene Maßnahmen zu fassen.⁵⁷ Die Schutzmaßnahmen der Handlungsempfehlungen (s. Kapitel 4) sind technische Vorkehrungen, wenn sie die technische Ausführung der Beleuchtungsanlage betreffen.

3.3.2 Pflicht der Gemeinde zur Konfliktbewältigung

Die Gemeinde hat zudem nicht nur die Möglichkeit die Auswirkungen von Licht mit Hilfe von Festsetzungen zu steuern. Sie kann, wenn sie Bebauungspläne aufstellt oder ändert, auch dazu verpflichtet sein. Das hängt davon ab, ob eine erhebliche Beeinträchtigung durch künstliches Licht prognostiziert wird und ob im nachgelagerten Verwaltungsverfahren (i. d. R. Baugenehmigungsverfahren) eine Bewältigung dieser erheblichen Beeinträchtigungen zu erwarten ist.⁵⁸ Bei Außenbeleuchtungen ist eine spätere Bewältigung der Auswirkungen häufig nicht möglich. Die Beleuchtungsanlagen verursachen durch das Zusammenwirken mehrerer Anlagen (sog. Kumulation) eine erheblich nachteilige Auswirkung auf Fauna, Flora und den Menschen. Beispielsweise entstehen Barrierewirkungen für Insekten oder Amphibien erst durch eine durchgängige Beleuchtung. Das nachgelagerte Verfahren kann aber die aus dem Zusammenwirken entstehenden Probleme nicht sachgerecht lösen, da die Anlagen entweder nicht genehmigungspflichtig sind oder nur einzeln und damit losgelöst voneinander betrachtet werden. In diesen Fällen verlangt das Gebot der Konfliktbewältigung von der Gemeinde, bei der Aufstellung oder Änderung eines Bebauungsplans die nachteiligen Auswirkungen künstlichen Lichts planerisch zu bewältigen,⁵⁹ etwa in dem die Handlungsempfehlungen als verbindliche Festsetzungen in den Bebauungsplan aufgenommen werden.

⁵⁶ Mitschang/Reidt, in: Battis/Krautzberger/Löhr (Hrsg.), BauGB, 13. Aufl., 2016, § 9, Rn. 2.

⁵⁷ Huggins/Schlacke, Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 184 ff.

⁵⁸ Vgl. BVerwG, Urt. v. 12.09.2013 – 4 C 8/12, NVwZ 2014, 69, Rn. 17.

⁵⁹ Jarass/Kment, BauGB, 2. Aufl., 2017, § 1, Rn. 89; ausführlich Huggins/Schlacke, Schutz von Arten vor Glas und Licht, 2019, S. 210 ff.

3.4 Sicherheit durch Licht?

Außenbeleuchtungen werden vielfach positiv konnotiert: Gemeinhin werden Beleuchtungen für Fußgänger- und Fahrradwege sowie für Straßen als erforderliche Sicherheitsmaßnahme wahrgenommen. Eine genaue Ausdifferenzierung der Beleuchtungspflichten existiert jedoch nicht. Nachfolgend wird erst der Einfluss durch Licht auf die Sicherheit dargestellt und dann die Verkehrssicherungspflichten für die Träger öffentlicher Beleuchtungen erläutert.

3.4.1 Soziale Sicherheit

Die öffentliche Beleuchtung, vor allem die Straßenbeleuchtung, dient dazu, Objekte oder Personen während der Dämmerungs- und Nachtzeiten erkennbar zu machen. Insbesondere im Straßenverkehr ist es erforderlich, etwaige Hindernisse möglichst frühzeitig wahrzunehmen, um die Gefahr einer Kollision zu vermeiden. Darüber hinaus dient die Straßenbeleuchtung der wirtschaftlichen, kulturellen und gesellschaftlichen Belebung.⁶⁰ Beleuchtungen können das Gefühl der Sicherheit erhöhen und damit Aktivitäten im Außenraum ermöglichen oder attraktiver machen. Daneben wird die öffentliche Beleuchtung mit dem Schutz vor Straftaten in Verbindung gebracht. Allerdings konnte ein positiver Einfluss öffentlicher Beleuchtung auf die Sicherheit vor Straftaten nicht festgestellt werden (STEINBACH et al. 2015). Vielmehr lässt sich beobachten, dass Straßenbeleuchtungen Angsträume verhindern und somit der sozialen Sicherheit dienen.⁶¹ Entsprechend ist die öffentliche Beleuchtung der öffentlichen Daseinsvorsorge zuzurechnen, zu der die Gemeinde zwar berechtigt, aber nicht verpflichtet ist. Insbesondere ist die Gemeinde nicht dazu verpflichtet, für eine flächendeckende, d. h. allgemeine Straßenbeleuchtung zu sorgen. Ausnahmen bestehen lediglich für Bayern (Art. 51 Abs. 1 Bayerisches Straßen- und Wegegesetz (BayStrWG)) und Baden-Württemberg (§ 41 Abs. 1 S. 1 Straßengesetz Baden-Württemberg (StrG BW)), die Gemeinden unter dem Vorbehalt der (finanziellen) Zumutbarkeit zur Straßenbeleuchtung verpflichten, sowie in Berlin (§ 7 Abs. 5 Berliner Straßengesetz (BerlStrG)), wo eine Straßenbeleuchtung in geschlossenen Ortschaften, soweit sie erforderlich ist, verpflichtend ist.

3.4.2 Straßenverkehrssicherungspflichten

Daneben stellt sich die Frage, ob und inwieweit die Gemeinde eine Straße zu Verkehrssicherungszwecken zu beleuchten hat. Die Straßenverkehrssicherungspflichten beruhen auf dem allgemeinen Grundsatz, dass derjenige, der eine Gefahrenlage schafft, verpflichtet ist, die Entstehung von Schäden im Rahmen des Erforderlichen und Zumutbaren zu verhindern.⁶² Für den Straßenverkehr gilt zunächst, dass der Verkehrsteilnehmer sich den Straßenverhältnissen anpassen und die Straße so hinnehmen muss, wie sie sich ihm erkennbar darbietet.⁶³ Dem Gefahrenpotenzial der Dunkelheit entgegenzuwirken ist die Pflicht des Verkehrsteilnehmers,⁶⁴ der sein Fahrzeug bzw. Fahrrad (gem. § 17 Straßenverkehrsverordnung (StVO) i. V. m. §§ 49a ff., 67 Straßenverkehrs-Zulassungsverordnung (StVZO)) zu beleuchten hat. Deshalb bestehen regelmäßig keine Beleuchtungspflichten, wenn die Ver-

⁶⁰ OVG Koblenz, Urt. v. 26.09.1985 – 1 A 89/84, NJW 1986, 953; Bauer, in: Kodal (Hrsg.), Straßenrecht, 7. Aufl., 2010, § 43, Rn. 43.

⁶¹ Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Lichtkonzept Berlin, 2015, S. 60 ff.

⁶² Sauthoff, Öffentliche Straßen, 2. Aufl. 2010, Rn. 999; bzgl. der Pflicht zur Beleuchtung OLG Hamm, Urt. v. 09.11.2001 – 9 U 252/98, Juris, Rn. 16 f.

⁶³ BGH, Urt. v. 21.06.1979 – III ZR 58/78, VersR 1979, 1055; Scheidler, NZV 2011, 422, 423 f.; für Fußgänger OLG München, Urt. v. 14.10.1993 – 1 U 2811/93, juris, Rn. 24.

⁶⁴ Bauer, in: Kodal (Hrsg.), Straßenrecht, 7. Aufl., 2010, § 43, Rn. 45.2.

kehrsteilnehmer bei zweckgerechter Benutzung der Straße und Anwendung der gebotenen Aufmerksamkeit etwaige Schäden selbst abwenden können.⁶⁵ Eine Pflicht zur Gefahrenvorsorge besteht aber dann, wenn besondere Gefahrenstellen bestehen, wie Baustellen, bekannte Unfallschwerpunkte, schwer wahrnehmbare Sperrpfosten oder Fußgängerüberwege.⁶⁶ Die Gefahrenvorsorge kann dabei durch eine Beleuchtung oder eine andere Warnmaßnahme (Reflektoren o. ä.) erfolgen. Eine weitergehende Verpflichtung aus der Straßenverkehrssicherungspflicht besteht indes nicht.

3.4.3 Technische Normen

Für die Straßenbeleuchtung existieren Industrienormen, die konkretisieren, wie in welcher Verkehrssituation (Kurve, Kreuzung etc.) zu beleuchten ist. So legt die DIN EN 13201 fest, welches Helligkeitsminimum in der jeweiligen Situation einzuhalten ist. Das wirft die Frage auf, ob die Vorgaben dieser technischen Normen wie der DIN EN 13201 für den Betreiber der Straßenbeleuchtung rechtlich verbindlich ist.

Die Grundlagen der Normen, die sich mit natürlicher und künstlicher Lichtstrahlung befassen sowie mit anliegenden Fachgebieten im Bereich Lampen, Leuchten und Zubehör, werden national durch den DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL) erarbeitet. Der Normenausschuss stellt sicher, dass die Normen den Stand der Technik wiedergeben und die nationalen Standpunkte und Interessen aller an der Lichttechnik in Deutschland interessierten Kreise in Europäischen oder internationalen Normen berücksichtigt werden.⁶⁷ Der Normenausschuss gibt damit Empfehlungen für Mindestanforderungen an Beleuchtungen im öffentlichen Raum vor, die von privaten Vereinigungen erarbeitet werden. Insoweit fehlt es mangels demokratischer Legitimation bereits an der Normsetzungsbefugnis.⁶⁸ Das heißt, DIN-Normen können keine eigenständig geltenden rechtlichen Pflichten erzeugen.⁶⁹ Sie legen lediglich die technischen Voraussetzungen fest, die notwendig sind, um bereits bestehenden rechtlichen Anforderungen zu genügen. Insbesondere geben sie den derzeitigen Stand der Technik wieder. Wie gezeigt, besteht mit wenigen Ausnahmen keine Pflicht für eine flächendeckende, d. h. allgemeine Straßenbeleuchtung. Auch eine punktuelle Beleuchtung ergibt sich nur im Ausnahmefall aus den Verkehrssicherungspflichten. Nämlich dann, wenn eine Gefahrenstelle überraschend auftritt, die der Verkehrsteilnehmer auch dann nicht rechtzeitig erkennen kann, wenn er sein Verhalten an die Dunkelheit anpasst.

Während der Ansatz der Differenzierung nach Helligkeitsstandards in der DIN EN 13201 einer überzeugenden Logik folgt und eine gute Grundlage bildet, eine uniforme Außenbeleuchtung im öffentlichen Raum zu gewährleisten, fehlt bis heute eine interdisziplinär wissenschaftlich-empirisch gesicherte Basis, damit Beleuchtungsstärkeniveaus und ihre Anwendung in der kommunalen Praxis allen Anforderungen genügen. Die empfohlenen Be-

⁶⁵ BGH, Urt. v. 08.04.1970 – III ZR 167/68, NJW 1970, 1126; Schumacher, Handbuch der Kommunalhaftung, 5. Aufl. 2015, S. 294 ausführliche Kritik zur Annahme, dass eine hellere Beleuchtung als Unfallvorsorge geeignet sei, vgl. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Lichtkonzept Berlin, 2015, S. 63 ff.

⁶⁶ Instruktiv OLG Hamm, Urt. v. 03.02.2009 – 9 U 101/07, NJW-RR 2010, 33, Rn. 17; OLG Hamm, Urt. v. 17.01.2006 – 9 U 102/05, Juris, Rn. 8; OLG Hamm, Urt. v. 09.11.2001 – 9 U 252/98, Juris, Rn. 17; Schumacher, Handbuch der Kommunalhaftung, 5. Aufl. 2015, S. 393; in Bezug auf Fußgängerwege ist die Beleuchtung vorgeschrieben, vgl. § 26, Rn. 15 VwV StVO.

⁶⁷ DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL): DIN Normenausschuss (zuletzt abgerufen am 10.05.2019)

⁶⁸ Vgl. Eifert, in: Schoch (Hrsg.), Besonderes Verwaltungsrecht, 15. Aufl., 2018, § 5, Rn. 83.

⁶⁹ St. Rspr. BGH, Urt. v. 03.06.2008 – VI ZR 223/07, NJW 2008, 3775, Rn. 18; BGH, Urt. v. 13.03.2001 – VI ZR 142/00, NJW 2001, 2019, 2020; Wagner, MüKo BGB, 7. Aufl., 2017, § 823, Rn. 447 f. m.w.N.; deutlich Ringwald/Engel, in: Ringwald/Rönitzsch/Riedel (Hrsg.), Praxishandbuch Öffentliche Beleuchtung, 2013, S. 77, 84 f.; Greger, in: Greger/Zwickel (Hrsg.), Haftungsrecht des Straßenverkehrs, 5. Aufl., 2014, § 13, Rn. 101.

leuchtungsstärken basieren auf Anforderungen der menschlichen visuellen Wahrnehmungen für das Reaktionsoptimum. Durch Aufhellung des Infrastrukturuntergrundes sollen Kontraste hergestellt werden, um die Erkennung und Reaktionen auf Gefahren für motorisierte Verkehrsteilnehmer zu optimieren. Die empfohlenen Mindestwerte der Norm basieren auf veralteter Technik und es fehlen in den Normungen eindeutige Beleuchtungsstärkemaximalwerte für heute im Einsatz befindliche Technik, wie LED-Straßenbeleuchtungen,⁷⁰ die ökologische und chronobiologische nachteilige Auswirkungen durch die Umgebungsaufhellung berücksichtigen. FOTIOS & GIBBONS (2018) argumentieren, dass den derzeitigen Beleuchtungsempfehlungen der Normungen veraltete Beleuchtungstechniken zugrunde liegen und fordern daher die Mindestanforderungen im Praxistest mit modernen Leuchtmitteln neu zu ermitteln.

Die Vorgaben der DIN EN 13201 stellen keine eigenständigen rechtlich verbindliche Pflichten dar, sodass ein Unterschreiten der Mindestwerte der Beleuchtungsstärke allein keinen Rechtsverstoß verursacht. Vielmehr kann eine reduzierte Helligkeit aus Gründen des Naturschutzes rechtlich erforderlich sein (s. o.). Zusammenfassend genügt die Straßenbeleuchtung den Anforderungen der Verkehrssicherungspflichten, wenn die Beleuchtung Gefahrenlagen so ausleuchtet oder anderweitig entgegenwirkt, dass ein Verkehrsteilnehmer, der sein Verhalten an die Dunkelheit anpasst, rechtzeitig reagieren kann und damit etwaige Schäden selbst abwenden kann. Weitergehende Verpflichtungen bestehen nicht.

⁷⁰ Zu dem fehlenden wissenschaftlichen Nachweis bestimmter Helligkeitsniveaus Fotios/Gibbons, *Lighting Research & Technology* 2018, 154, 161 f.

4 Teil Handlungsempfehlungen

Künstliches Licht verursacht nachteilige Auswirkungen auf Flora und Fauna sowie auf den Menschen. Zum Schutz vor diesen Auswirkungen bestehen, zumindest in Teilen, rechtliche Pflichten. Derzeit genügen Außenbeleuchtungen nur selten diesen Anforderungen, weil die durch Lichtimmissionen hervorgerufenen Beeinträchtigungen in der Öffentlichkeit kaum bekannt sind und daher häufig unbeachtet bleiben. Folge dessen sind Belästigungen des Menschen, Schäden an Biotopen und Ökosystemen und Beeinträchtigungen von Nachtlandschaften und der Sichtbarkeit des Sternenhimmels.

Für die mangelnde Umsetzung gibt es mehrere Gründe. Zunächst scheinen Beleuchtungen gesellschaftlich vor allem positiv wahrgenommen zu werden, weshalb eine bewusste Abwägung der möglichen Vor- und Nachteile künstlicher Beleuchtung im Außenbereich nur bedingt stattfindet. Zudem beruht die Feststellung nachteiliger Auswirkungen künstlichen Lichts auf neueren Forschungsergebnissen, weshalb bei der Durchsetzung der rechtlichen Pflichten (noch) ein Vollzugsdefizit zu verzeichnen ist. In diesem Sinne besteht auch ein Informationsdefizit über die Auswirkungen überdimensionierter Beleuchtungen, z. B. wenn aus vermeintlichen Sicherheitsgründen Parkplätze, Plätze und Straßen weit über das empfohlene Maß beleuchtet werden.

Um diesen Defiziten Abhilfe zu schaffen, werden nachfolgend Handlungsempfehlungen vorgestellt. Diese Empfehlungen entstanden im Rahmen des F&E-Projektes „Analyse der Auswirkungen künstlichen Lichts auf die Biodiversität, Bestimmung von Indikatoren für die Beeinträchtigung und Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Vermeidung negativer Effekte im Rahmen von Eingriffen“ (FKZ 3514 82 1700). Grundlage für die Handlungsempfehlungen war die interdisziplinäre und internationale Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern und Praktikern im Rahmen einer EU COST Aktion ES1204 „Loss of the Night Network“ (LoNNe)⁷¹. Die EU hat eine Neuaufgabe der Kriterien für umweltfreundliche öffentliche Beschaffung von Straßenbeleuchtungen und Verkehrssignalen herausgegeben.⁷² Diese Empfehlungen sind 2019 erschienen und enthalten ähnliche Kriterien, wie die hier dargestellten Handlungsempfehlungen zur Gestaltung umweltverträglicher Beleuchtungsanlagen. Das Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz⁷³ und der NABU⁷⁴ haben ebenfalls Leitfäden für nachhaltige Außenbeleuchtung erarbeitet, welche die ökologischen Auswirkungen künstlicher Beleuchtungen berücksichtigen. Im Europäischen Ausland sind aus Österreich⁷⁵, Luxemburg⁷⁶, der Schweiz⁷⁷ sowie speziell des Kantons Solothurn⁷⁸ weitere Leitfäden in deutscher Sprache verfügbar.

⁷¹ COST – Initiative für wissenschaftliche Zusammenarbeit in Europa. Finanzierungsorganisation für die Vernetzung von Wissenschafts- und Technologieforschungsinitiativen in ganz Europa und weitere Vertragsstaaten (an der COST Aktion ES1204 LoNNe beteiligten sich Institute aus 18 Mitgliedstaaten (<http://www.cost-lonne.eu>, zuletzt abgerufen am 10.05.2019)).

⁷² EU green public procurement criteria for road lighting and traffic lighting: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/revision-eu-green-public-procurement-criteria-road-lighting-and-traffic-signals> (zuletzt abgerufen am 10.05.2019).

⁷³ Broschüre Nachhaltige Außenbeleuchtung des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Broschüre Außenbeleuchtung (zuletzt abgerufen am 10.05.2019)

⁷⁴ NABU: Kommunale Lichtplanung (zuletzt abgerufen am 25.02.2019).

⁷⁵ Oberösterreichische Umweltschutz: G'scheites Licht (zuletzt abgerufen am 10.05.2019).

⁷⁶ Leitfaden „Gutes Licht“ im Außenraum für das Großherzogtum Luxemburg: (zuletzt abgerufen am 10.05.2019).

⁷⁷ BUWAL 2005 (zuletzt abgerufen am 03.06.2019)

⁷⁸ Amt für Umwelt Solothurn, Informationen für Bauherren, Planer und Gemeinden: Checkliste Lichtplanung (zuletzt abgerufen am 10.05.2019).

Durch die Kriterien dieser Leitfäden können das „rechte Maß“ für eine Beleuchtung gefunden und chronobiologische und ökologische Störwirkungen minimiert werden. Das Vorkommen besonders geschützter Arten mit bekanntem Anforderungsprofil an die Beleuchtung (zum Beispiel Fledermäuse in Gemäuern von Kirchen und anderen Landmarken) erfordert eine strenge Umsetzung der Handlungsempfehlungen. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird in den meisten Leitfäden eine Einteilung in Umweltzonen vorgenommen. Der vorliegende Leitfaden verzichtet auf eine solche Einteilung weitestgehend, da auch in Gebieten, in denen keine Nachweise für streng geschützte Arten vorliegen, die Handlungsempfehlungen für den allgemeinen Schutz der Insektenfauna und der Nachlandschaften umzusetzen sind. Mit anderen Worten: Der vorliegende Leitfaden enthält Handlungsempfehlungen, die den flächendeckenden Schutz der Umwelt durch umweltverträgliche Lichtnutzung bezwecken.

4.1 Anforderungsprofile als Voraussetzung für Lichthanlagen

Eine Neuinstallation bzw. der Betrieb der Beleuchtung erfordert eine schlüssige Begründung. Dies erfolgt durch ein Anforderungsprofil, aus dem sich ergibt, für welchen Zweck wie beleuchtet werden soll. Das Anforderungsprofil sollte die Parameter Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte, beleuchtete Fläche, Abstrahlungsgeometrie, Farbspektrum und ggf. Beleuchtungsstärkeregelung separat festlegen. Die Parameter sind anhand objektiver Kriterien zu bestimmen: Zum Beispiel durch Besucherzahlen touristischer Einrichtungen, Nutzungszahlen von Infrastrukturen oder Gefahrenpunkte wie Fußgängerübergänge oder bekannte Unfallschwerpunkte. Abweichungen von den Handlungsempfehlungen (wenn beispielsweise Beschilderungen oder Gebäude von unten nach oben beleuchtet werden und damit Lichtemissionen in den oberen Halbraum riskiert werden) müssen sachlich gerechtfertigt sein. Von den verschiedenen technischen Anwendungsmöglichkeiten ist diejenige zu wählen, die die geringsten nachteiligen Auswirkungen hervorruft. Eine über dieses Anforderungsprofil hinausgehende Beleuchtung ist ineffizient und für die biologische Vielfalt schädigend, verursacht zusätzliche Kosten und kann rechtswidrig sein.

4.2 Beleuchtungsstärke

Die Wahrnehmung von Helligkeiten wird physikalisch durch die Beleuchtungsstärke in der Maßeinheit Lux (lx) quantifiziert, welche die Lichtintensität beschreibt mit der ein Bereich ausgeleuchtet wird. Typische Beleuchtungsstärken sind in Tabelle 3 gelistet. Die Helligkeit einer Fläche wird weiterhin in der Maßeinheit der Leuchtdichte mit Candela/Quadratmetern (cd/m^2) angegeben. Sie wird maßgeblich für die Bewertung der Erkennbarkeit von Objekten auf Straßen oder auf Werbeschildern genutzt. Anhand der Leuchtdichte als Maßeinheit für die Helligkeitswahrnehmung einer Fläche wird auch das Rückstrahlpotenzial der zu beleuchtenden Oberfläche berücksichtigt, z. B. durch farbliche Unterschiede des Bodenbelags oder vorherrschende Witterungsbedingungen.

Tabelle 3: Typische nächtliche Beleuchtungsstärken für verschiedene natürliche und künstliche Beleuchtungsszenarien (nach HÖLKER et al. 2018 und SEIDELMANN 1992)

Lichtverhältnisse	Beleuchtungsstärke (lx)	Literaturquelle
Unbeleuchtete, bewölkte Nacht	< 0,0006 - 0,0001	JECHOW et al. (2016, 2018), SEIDELMANN (1992)
Sternenklare mondlose Nacht, natürlicher Himmel	0,0006 - 0,0009	HÄNEL et al. (2018)
Vollmond	0,05 - 0,3	KYBA et al. (2017c)
Straßenbeleuchtung	8	BENNIE et al. (2018)
Bürobeleuchtung	500	BAuA - Technischer Arbeitsschutz
Bedeckter Wintertag	3.500 - 6.000	DIN 5034 Tageslicht in Innenräumen. Teil 2: Grundlagen. Beuth, Berlin 1985.
Mindestanforderung für dentale Behandlungsleuchten	15.000	ISO 9680 Zahnheilkunde – Behandlungsleuchten
Klarer Himmel	20.000 - 130.000	SEIDELMANN (1992)

4.2.1 So viel wie nötig und so wenig wie möglich

Welche Beleuchtungsstärke situationsbedingt angemessen und erforderlich ist, ergibt sich einerseits durch den Bedarf und andererseits anhand der möglichen nachteiligen Folgen einer überdimensionierten Beleuchtung. Dabei ist zu beachten, dass eine überdimensionierte Beleuchtung rechtswidrig sein kann, insbesondere wenn die Lichtimmissionen naturschutzrechtlich geschützte Lebensräume oder Arten erheblich beeinträchtigen (s. Kapitel 3). In diesen Fällen besteht in der Regel eine Pflicht zur Vermeidung, die durch die Reduktion der Beleuchtungsstärke auf das für den Beleuchtungszweck notwendige Minimum erfüllt werden kann.

Daher gilt für Außenbeleuchtungen der Leitsatz: „So viel wie nötig und so wenig wie möglich“. Diese Beschränkung der Beleuchtungsstärke auf das notwendige Maß dient nicht nur der Vermeidung nachteiliger Auswirkungen, sondern führt gleichermaßen zu Energie- und Kosteneinsparungen.

Anforderungen für die Straßenbeleuchtung ergeben sich durch die erforderliche Kontrastierung, um die visuelle Wahrnehmung von Gefahrenpunkten zu erleichtern. Anhand der Leuchtdichte als Maßeinheit für die Helligkeitswahrnehmung einer Fläche wird die potenzielle Sichtbarkeit von Objekten vor einem Untergrund berücksichtigt. Dabei kann das Rückstrahlpotenzial der zu beleuchtenden Oberfläche, z. B. durch farbliche Unterschiede des Bodenbelags oder vorherrschende Witterungsbedingungen helfen, die Anforderungen an die Beleuchtungsstärke gering zu halten. Deshalb sollte die Kontrastbildung durch Verwendung von Reflektoren oder Unterschiede der Straßenoberflächen unterstützt werden, z. B. durch farbliche Absetzung von Fußgänger- oder Fahrradwegen.

FALCHII et al. (2011) empfehlen aus dem gleichen Grund eine maximale Beleuchtungsstärke für einzelne Verwaltungsgebiete festzulegen. Eine Festlegung kann über regionale Lichtkonzepte oder Masterpläne erfolgen (KÜSTER et al. 2017). Es müssen aber die Beleuchtungsstärken für öffentliche, gewerbliche und private Beleuchtungsanlagen gleichermaßen festgelegt werden, damit es zu keiner Störwirkung kommt (siehe Kapitel 2.2). Ein solches umfassendes kommunales Beleuchtungskonzept wurde 2018 in Fulda im Rahmen

der Bewerbung als erste zertifizierte deutsche Sternenstadt entwickelt.⁷⁹

4.2.2 Begrenzung beleuchteter oder selbst leuchtender Flächen

Grundsätzlich ist bei Lichtplanungen zu berücksichtigen, dass Licht durch Reflexion am beleuchteten Objekt zu einer störenden Lichtimmission bzw. Blendung führen kann. Daher ist neben der Beleuchtungsstärke auch die Leuchtdichte zu berücksichtigen.

Lichtquellen, die lokal eine größere Beleuchtungsstärke abstrahlen als die vorherrschende Straßenbeleuchtung, beeinträchtigen die Wahrnehmung durch die ständige und ungewollte Ablenkung der Blickrichtung zur Lichtquelle hin. Bei einem großen Unterschied der Leuchtdichte der Lichtquelle zur Umgebungsleuchtdichte löst das eine ständige Adaptation des Auges aus. Diese Störwirkung wird psychologische Blendung genannt. Die psychologische Blendung von Leuchtreklamen oder Lichtquellen von Sport- und Freizeitanlagen ist aufgrund ihrer Störwirkung auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Für die Störwirkung sind die Leuchtdichte der Blendlichtquelle, die Umgebungsleuchtdichte und der Abstrahl- oder Raumwinkel, vom Betroffenen (Immissionsort) aus betrachtet, maßgebend.⁸⁰

Moderne Lichtmanagementsysteme erlauben es, die Emissionen einzelner Leuchten an die örtlichen, tageszeitlichen, saisonalen und witterungsbedingten Gegebenheiten anzupassen. Ziel der Lichtmanagementsysteme sollte sein, einen geeigneten Kontrast, mit dem ein Objekt gegenüber seiner Umgebung erscheint, mit möglichst geringer Beleuchtungsstärke bzw. Leuchtdichte herzustellen. Dieses Ziel zu erreichen, wird erschwert, wenn sehr hohe Leuchtdichten den Kontrast und damit die Erkennbarkeit von dunklen Objekten reduzieren. Um dies auszugleichen, werden die Beleuchtungsstärken häufig stetig gesteigert. Anstatt die Beleuchtungsstärken zu erhöhen, ist es sinnvoller, die maximalen Leuchtdichten der jeweiligen Lichtquellen zu reduzieren (LANG 2013).

Bei beleuchteten oder selbstleuchtenden Flächen kann eine zu hohe Leuchtdichte ein Sicherheitsrisiko durch Blendung verursachen. Aufgrund der fortschreitenden technologischen Entwicklungen sind heutzutage Leuchtdichten von über zehn Millionen cd/m^2 technisch möglich.⁸¹ Von der Strahlenschutzkommission (2006) wird ein Grenzwert von 730 cd/m^2 für eine für das Auge noch annehmbare, das heißt blendungsfreie Betrachtung einer Lichtquelle angegeben.⁸² Daher muss eine flächige Lichanlage oder eine beleuchtete Fläche diesen Grenzwert in jedem Falle unterschreiten.

In Lichtkonzepten sollte seitens der Gemeinde ein Grenzwert festgelegt werden. Der Lichtmasterplan der Stadt Luzern begrenzt Dachreklamen beispielsweise auf maximal 110 cd/m^2 .⁸³ Ebenso werden im „Werbekonzept Stadtbild Berlin“ zur Blendungsbegrenzung maximal 500 cd/m^2 als noch tolerable Leuchtdichte zugelassen. Dieser Maximalwert wird

⁷⁹ Auszeichnung der Stadt Fulda als erste Sternenstadt durch die International Dark Sky Association am 07.02.2019: (zuletzt abgerufen am 10.05.2019).

⁸⁰ Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (2012) https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/lichthinweise-2015-11-03mit-formelkorrektur_aus_03_2018_1520588339.pdf (zuletzt abgerufen am 10.05.2019).

⁸¹ Oberösterreichischer Energiesparverband (Hrsg.), Straßenbeleuchtung mit LED, 2015, abrufbar unter: (zuletzt abgerufen am 10.05.2019).

⁸² Jahresbericht der Strahlenschutzkommission 2006, abrufbar unter: https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2006/Blendung_Lichtquellen.pdf?__blob=publicationFile (zuletzt abgerufen am 10.05.2019).

⁸³ Stadt Luzern (Hrsg.), Plan Lumière, 2006, abrufbar unter <https://www.stadtluzern.ch/dokumentebilder/publikationen/26158> (zuletzt abgerufen am 10.12.2018).

abhängig von der jeweiligen Gebietsart, Hintergrundhelligkeit, Uhrzeit und den farbigen bzw. bewegten Lichtquellen auf bis zu 14 cd/m² begrenzt.⁸⁴ Regionale Gesetze Italiens (z. B. Abruzzen, Latium, Lombardei) und das nationale Gesetz Sloweniens limitieren flächige Beleuchtungen auf 1 - 2 cd/m², um vor nachteiligen Auswirkungen der Lichtimmissionen zu schützen. Während diese niedrigen Grenzwerte für empfindliche Ökosysteme und besonders schützenswerte Natur und Landschaften empfehlenswert sind, würde eine solch strenge Begrenzung in städtischen Bereichen jegliche Beschilderung untersagen. Verkehrsbeschilderung und Sicherheitsmarkierungen weisen Leuchtdichten von 3 - 300 cd/m² auf.⁸⁵ Ab 100 cd/m² können maximale Sehschärfen erreicht werden.⁸⁶ Empfohlen wird daher, einen Grenzwert von 50 - 100 cd/m² für Flächen unter 10 m² und 2 - 5 cd/m² für größere Flächen möglichst nicht zu überschreiten und höhere Leuchtdichten von bis zu 300 cd/m² nur in begründeten Einzelfällen zu installieren, z. B. wenn das Erkennen wichtiger Details erforderlich ist. Dadurch werden die Umweltauswirkungen begrenzt und städtische Lichtnutzungen bleiben weiterhin gewährleistet.

4.2.3 Straßenbeleuchtungen: Wahl der niedrigsten Beleuchtungsklasse

Für Straßenbeleuchtungen schlägt die DIN EN 13201-5 in ihrer neuesten Auflage als Begrenzung die Mittelwerte der jeweiligen darüber liegenden Klassen vor (in Bezug auf die rechtlich unverbindlichen Referenzwerte der Ökodesignverordnung)⁸⁷. Wenn Neuinstallationen und Beleuchtungsumrüstungen normgerecht durchgeführt werden sollen, sollte sich die Beleuchtungsstärke an der niedrigsten Beleuchtungsklasse der Norm (DIN EN 13201-2) orientieren, die zur Erfüllung der jeweiligen Beleuchtungssituation noch geeignet ist (siehe Tabelle 4). Zudem ist die Beschränkung durch die Mittelwerte der jeweiligen darüber liegenden Klasse einzuhalten. Für die Wahl der Beleuchtungsklasse definiert die Norm DIN 13201-1 Beleuchtungssituationen, die sich nach der Anzahl der Fahrzeuge im Verkehrsfluss und der Leuchtdichte der Umgebung bestimmt. Für die Wahl der niedrigsten geeigneten Beleuchtungsklasse ist notwendig, das Verkehrsaufkommen und die Umgebungsleuchtdichte in den beleuchtungsrelevanten Tag- bzw. Nachtzeiten zu bestimmen. Das bedeutet, dass die Klassen tageszeitlich und saisonal variieren können. Wenn zum Beispiel ein Verkehrsaufkommen von über 7000 Fahrzeugen pro Tag ermittelt wurde, ist nicht auszuschließen, dass die Fahrzeuge nur zu Stoßzeiten fahren und nach 20:00 Uhr nur noch wenige Fahrzeuge die Straße nutzen. Bei einer unflexiblen Festsetzung der Beleuchtungsklasse würde über den gesamten Zeitraum der Dunkelphase so beleuchtet, wie das für den zu Stoßzeiten vorkommenden Verkehr erforderlich wäre. Durch eine Begrenzung der Umgebungsleuchtdichte (z. B. durch eine Herabsetzung der Beleuchtungsstärke von Lichtwerbeanlagen) kann ebenfalls die Straßenbeleuchtungsklasse normgerecht verringert werden. Eine zeitliche Begrenzung der Umgebungsleuchtdichte (z. B. durch zeitliche Begrenzung der gewerblichen Beleuchtung, wie sie die französische Verordnung zur Begrenzung der

⁸⁴ Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin, Stadtbild Berlin, 2014, abrufbar unter: https://www.stadtentwicklung.berlin.de/staedtebau/baukultur/werbekonzept/download/werbekonzept_handbuch.pdf (zuletzt abgerufen am 10.12.2018).

⁸⁵ Jahresbericht der Strahlenschutzkommission 2006, abrufbar unter: https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2006/Blendung_Lichtquellen.pdf?__blob=publicationFile (zuletzt abgerufen am 10.12.2018).

⁸⁶ Strahlenschutzkommission (2006), Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren. S. 7: https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2006/Blendung_Lichtquellen.pdf (zuletzt abgerufen am 03.04.2019).

⁸⁷ VO (EG) Nr. 245/2009 v. 18.03.2009, ABIEU L 76/17.

Lichtverschmutzung und des Energieverbrauchs vorsieht)⁸⁸ könnte auch eine zeitliche Herabsetzung der Beleuchtungsklasse beispielsweise nach der gewerblichen Herabsenkung der Beleuchtungsstärke ermöglichen.

Tabelle 4: Beleuchtungsklassen nach DIN EN 13201-2 (2016)⁸⁹. Die Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten werden nach Formeln der EN 13201-3 und 4 berechnet.

Klasse	Beschreibung	Empfehlungen		
M	Straßen mit mittleren bis höheren Fahrgeschwindigkeiten	Fahrbahnleuchtdichte (cd/m²)		
M1		2,0		
M2		1,5		
M3		1,0		
M4		0,75		
M5		0,5		
M6		0,3		
C	Straßen des motorisierten Verkehrs, auch Fußgänger- und Radverkehr bei - Konfliktzonen, - Einkaufsstraßen - komplexe Straßenkreuzungen - Kreisverkehrsplätzen - Aufstellräumen vor Kreuzungen	Beleuchtungsstärke horizontal berechnet (lx)		
C0		50		
C1		30		
C2		20		
C3		15		
C4		10		
C5		7,5		
P	Fußwege, Radwege, Standstreifen und anderen Flächen, die getrennt von oder entlang der Fahrbahn von Verkehrswegen, Anwohnerstraßen, Fußgängerzonen, Parkplätzen, Schulhöfen usw. liegen	Beleuchtungsstärke horizontal (lx)	Mindestanforderungen horizontal (lx)	Beleuchtungsstärke vertikal (lx)*
P1		15	5	3
P2		10	3	2
P3		7,5	2,5	1,5
P4		5	1,5	1
P5		3	1	0,6
P6		2	0,6	0,4
P7		unbestimmt		
* Zusätzliche Anforderungen, wenn Gesichtserkennung notwendig				

In der Norm für die Berechnung der Leuchtdichte und der Beleuchtungsstärke ist ein Wartungsfaktor (MF) einberechnet, der den Abfall der Beleuchtungsstärke durch Verschleiß und Verschmutzung einer Anlage berücksichtigt. Der Wartungsfaktor errechnet sich nach den Herstellerangaben der Leuchtmittel über Lebensdauer und Verschmutzungseinfluss, die jedoch keine transparent nachvollziehbaren Daten enthalten (SANDERS & SCOTT 2009).

Problematisch ist zudem, dass die Minimalwerte für Beleuchtungsniveaus in den P-Klassen nicht dem aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisstand entsprechen. Insbesondere die Farbwiedergabeeigenschaften der Beleuchtung hinsichtlich der Straße und an Fahrzeugen

⁸⁸ Verordnung vom 25. Januar 2013 über die Nachtbeleuchtung von Nichtwohngebäuden zur Begrenzung der Lichtverschmutzung und des Energieverbrauchs: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000027003910&dateTexte=&categorieLien=id> (zuletzt abgerufen am 26.03.2019).

⁸⁹ Vgl. <https://www.strassenbeleuchtung.de/index.php/technik/35-normen-din-en/89-din-en-13201> (zuletzt abgerufen am 09.04.2019).

wurden technisch optimiert, weshalb die Beleuchtungsminimalwerte der DIN EN 13201, die noch auf älteren Technologien basieren, dringend überarbeitet werden müssen (FOTIOS & GIBBONS 2018). Wenn die Beleuchtung eine hohe Farbwiedergabe ermöglicht, z. B. durch weiße LED, kann die Beleuchtungsstärke entsprechend des Farbwiedergabeindex verringert werden.

FOTIOS & GOODMAN (2012) empfehlen, die niedrigste empfohlene Beleuchtungsstärke anzuwenden sowie auch alle darüber liegenden Klassen je nach Farbwiedergabeindex des installierten Leuchtmittels zu reduzieren. Folglich können Kommunen, die von Natriumdampf-Hochdrucklampen (Farbwiedergabeindex von 40) auf moderne, weiße LED-Straßenbeleuchtung (Farbwiedergabeindex von 90) umrüsten, beispielsweise auf Anwohnerstraßen (Klasse P4) statt mit einer durchschnittlichen Beleuchtungsstärke von 5 lx nur mit 2,9 lx und auf Geh- und Radwegen (P6) statt mit 2 lx nur mit 1 lx beleuchten, ohne dass sich die Sichtverhältnisse verschlechtern.

Darüber hinaus kann es empfehlenswert sein, die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit in ökologisch sensiblen Bereichen, wie an Gewässern und Brücken, auf unter 30 km/h zu beschränken, um den Verkehr zu reduzieren und um möglichst geringe Beleuchtungsstärkeklassen festlegen zu können.

4.2.4 Vermeidung von ansteigenden Helligkeitsniveaus durch effiziente Beleuchtung

Bei der Umrüstung alter Beleuchtungsanlagen auf neue, effiziente Lichtanlagen sind mögliche Rebound-Effekte zu beachten (KYBA et al. 2014). Unter Rebound-Effekt wird verstanden, wenn infolge geringerer Kosten für die einzelne Leuchte z. B. mehr Leuchten angeschafft und installiert werden und es damit zu einer Erhöhung der Beleuchtungsstärke aufgrund höherer Lichtströme, längerer Brenndauer und im gewerblichen und privaten Bereich zu einer höheren Leuchtpunktdichte kommt. Dadurch wird der Einsparungseffekt der effizienten Leuchten vermindert, aufgehoben oder sogar in einen höheren Energieverbrauch umgekehrt. Es ist daher dringend zu empfehlen, dies in die Planung miteinzubeziehen und nach Umrüstungsmaßnahmen auf effizientere Beleuchtungsmittel von Außenbeleuchtungen den tatsächlichen Stromverbrauch in einem zeitlich weitgefassten Rahmen (beispielsweise 5 Jahre) zu überprüfen und die Beleuchtungsstärke mit dem Zustand vor der Umrüstung zu vergleichen.

Die Konvertierung blauer Lichtanteile in weißen LEDs zu bernsteinfarbenen Farbspektren kann zulasten der Farbwiedergabe und Energieeffizienz gehen. Das bedeutet kaltweiße Leuchtmittel mit hohem Blaulichtanteil werden oft als effizienter eingestuft, sie erreichen eine hohe Lumenzahl pro elektrischer Leistung (Energieumsatz in einer bestimmten Zeitspanne). Energie und CO² werden aber erst eingespart, wenn in eine entsprechende Beleuchtungsstärkeregelungstechnologie investiert wird. Wird auf eine Investition in eine Beleuchtungsstärkeregelung verzichtet, bietet eine effizientere Leuchte nur eine höhere Leistung, das bedeutet sie leuchtet heller. Im Ergebnis kann eine aus Effizienzgründen empfohlene Leuchte die Umwelt stärker beeinträchtigen, als eine weniger effiziente Leuchte. Um die potenzielle Leistungsreduzierung einer effizienten Lichtanlage zu erreichen, sollte eine Investition in eine Beleuchtungsstärkeregelungstechnologie durch die kommunale Förderrichtlinie vorgeschrieben werden (siehe dazu auch nächstes Kapitel 4.2.5).

4.2.5 Zeitliche Beleuchtungsstärkesteuerung

Als Konsequenz des Grundsatzes „so viel wie nötig, so wenig wie möglich“ sollte die Beleuchtungsstärke an die Verkehrsnutzungszeiten angepasst sein. Das Anforderungsprofil muss Informationen darüber enthalten, welche maximale Beleuchtungsstärke benötigt wird, ab wann sie reduziert und bzw. oder die Beleuchtung ganz ausgeschaltet werden kann. Eine stufenweise Nachtabenkung könnte beispielsweise die Beleuchtung um 22:00 Uhr auf 50 Prozent der Beleuchtungsstärke und nach Mitternacht auf 30 Prozent absenken. Befragungen der Bevölkerung nach Einführung einer Nachtabenkung der Beleuchtung um 50 Prozent in Wien ergaben, dass diese unbemerkt blieb, solange keine direkte Vergleichsmöglichkeit existierte (POSCH 2013).

LED-Beleuchtungen ermöglichen es, einzelne Lichtanlagen zeitlich und örtlich individuell zu steuern und dadurch Einsparungseffekte zu maximieren sowie – wichtiger noch – nachteilige Auswirkungen zu begrenzen. Allerdings wird der Großteil des Einsparungspotenzials allein durch Umrüstungen alter Technologien auf effiziente LED-Beleuchtung realisiert. Das ist dann problematisch, wenn sich die Investitionskosten in eine Beleuchtungsstärkeregelung aufgrund der relativ geringen Energieeinsparungen finanziell nicht lohnen. Hier zeigt sich, dass Kostengesichtspunkte allein nicht genügen, um eine fachlich geeignete Beleuchtungsanlage bzw. -technologie auszuwählen. Dieses Problem lässt sich beheben, indem die zeitliche und/oder örtliche Beleuchtungssteuerung in Förderungsprogrammen verbindlich vorgeschrieben werden. Wenn der Um- oder Neubau von Beleuchtungsanlagen auf moderne, effiziente Leuchtmittel zur Erzielung von Energieeinsparung gefördert wird, muss das Ziel einer Förderung sein, die Beleuchtungsstärkesteuerung auf das von der Infrastrukturauslastung erforderliche Minimum und damit die Umweltbelastungen durch Lichtimmissionen zu reduzieren. Daher sollte zum Schutz vor den nachteiligen Auswirkungen des Lichts die Anwendung einer Beleuchtungsstärkesteuerung auf das notwendige Maß in den Förderrichtlinien vorgeschrieben werden.

Das Erfordernis einer Beleuchtungsstärkesteuerung gilt unabhängig von der verwendeten Beleuchtungstechnologie, da eine Steuerung der Beleuchtungsstärke auch für Gasentladungslampen möglich ist. In diesem Sinne ist die vergleichsweise günstige Investition in eine Steuerung zur stufenweisen Nachtabenkung von Gasentladungslampen zu empfehlen. Dadurch können Energieeinsparungen erzielt werden, die mit einer Umrüstung auf eine LED-Beleuchtung ohne Beleuchtungsstärkesteuerung vergleichbar ist.

4.2.6 Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen für die Beleuchtungsstärke

- Als Grundsatz gilt: So viel wie nötig, so wenig wie möglich.
- Für jegliche Beleuchtungsanlagen ist ein Anforderungsprofil zu erstellen, aus dem sich der Bedarf und die situationsbedingte Beleuchtungsstärke ergeben.
- Indirekte Beleuchtung, z. B. durch Reflektortechnik und farbliche Untergründe für einen höheren Kontrast von Gefahrenpunkten und Verkehrsregelungen, müssen vorrangig genutzt werden, um die Beleuchtungsstärke gering zu halten.
- Es werden regionale oder kommunale Beleuchtungskonzepte empfohlen, die die Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte öffentlicher und gewerblicher Beleuchtungsanlagen begrenzen.

- Für den Schutz von besonders schützenswerten Nachtschaften werden für beleuchtete oder selbstleuchtende Flächen maximale Leuchtdichten von 1 - 2 cd/m² empfohlen, in urbanen Bereichen sollten die maximale Leuchtdichte von 50 - 100 cd/m² für kleinere Flächen unter 10 m² und 2 - 5 cd/m² für größere Flächen eingehalten werden.
- Für die Beleuchtung von Straßen muss der Bedarf ebenfalls durch ein Anforderungsprofil ermittelt werden. Der Bedarf muss anhand des tatsächlichen zeitlichen Verkehrsaufkommens belegbar sein und schützende Maßnahmen (z. B. die Verkehrsberuhigung durch Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit) müssen in ökologisch sensiblen Bereichen, z. B. in der Nähe von Gewässern oder Naturschutzbereichen, Vorrang vor einer Beleuchtungsstärkeerhöhung haben.
- Wenn nach der technischen Norm DIN 13201 beleuchtet wird, dann sollten die jeweils niedrigsten Beleuchtungsklassen der Norm gewählt werden und die Begrenzung der Beleuchtungsstärke durch die jeweilige darüber liegende Klasse eingehalten werden.
- Eine zeitliche und örtliche Beleuchtungsstärkesteuerung nach Bedarf muss im Anforderungsprofil dargestellt und sollte bei einer Förderung moderner, effizienter Beleuchtungsanlagen vorausgesetzt werden.



Abbildung 14: Illustration von zu starker Straßenbeleuchtung (links) und regulierter Straßenbeleuchtung (rechts). Illustrationen von Rainer Stock im Auftrag des „Loss of the Night Netzwerks“ (EUCOST-Aktion ES1204) © 2016.

4.3 Abstrahlungsgeometrie

Mit der Abstrahlungsgeometrie wird die räumliche Verteilung des Lichts einer Leuchte beschrieben. Die Abstrahlungsgeometrie kann anhand von Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) definiert und kalkuliert werden. Eine LVK gibt die räumliche Verteilung der Lichtstärke einer Leuchte in Winkeln an. Anhand der LVK einer Leuchte kann bestimmt werden, ob sie Flächen tief, breit oder asymmetrisch beleuchtet (Abbildung 15). Während ein Winkel von 0° die Fläche direkt unterhalb der Lichtquelle bezeichnet, sind bei 90° die von der Lichtquelle horizontal befindlichen Flächen gemeint (Abbildung 16). Die Lichtstärken werden in der

Einheit Candela pro Kilolumen (cd/klm) angegeben. Diese Lichtstärken werden in der DIN EN 13201 in Lichtstärkeverteilungsklassen nach G1 bis G6 eingeteilt (Tabelle 5).

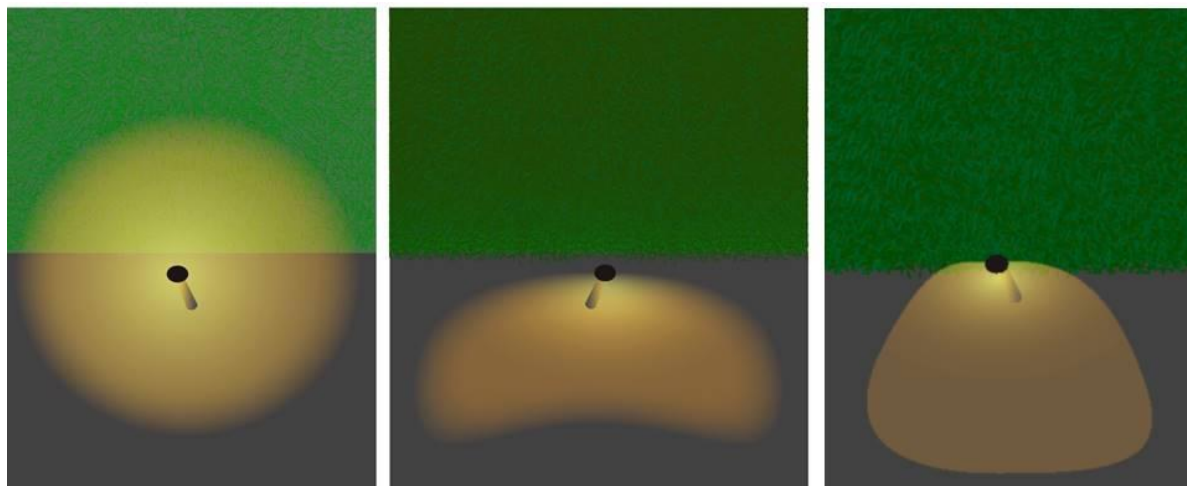


Abbildung 15: Beispiele für Lichtverteilungskurven. Links: symmetrisch. Mitte: asymmetrisch breit. Rechts: Asymmetrisch tief. Illustriert von Catherine Perez Vega.

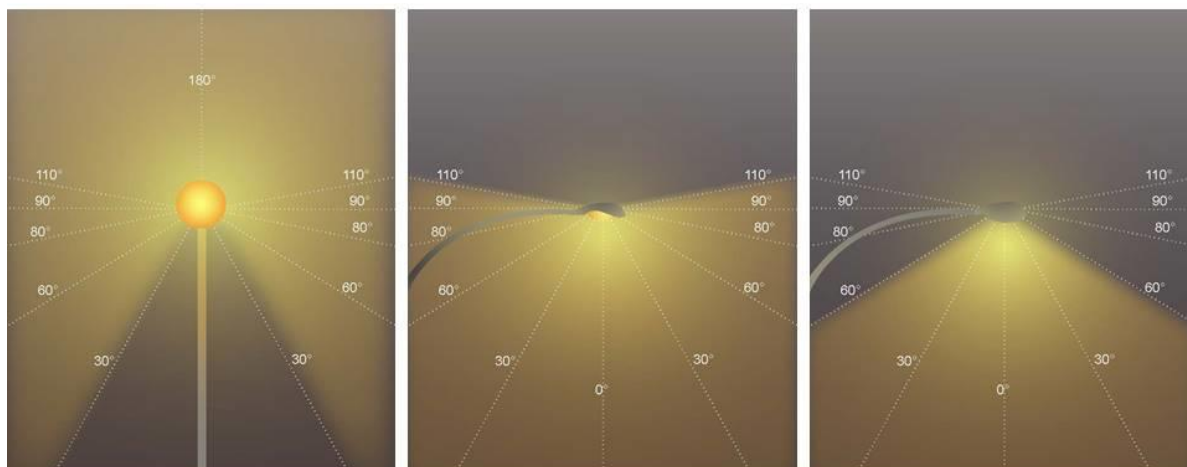


Abbildung 16: Räumliche Lichtverteilungen von Straßenleuchten in Winkeln. Links: Kugelleuchte, Mitte: Kofferleuchte, rechts: Kofferleuchte mit Vollabschirmung (full cut off). Illustriert von Catherine Perez Vega.

Tabelle 5: Lichtstärkeverteilungsklassen nach EN 13201-2, 2003.

Lichtstärkeklasse (Gamma Winkel)	Maximale Lichtintensität in cd/klm (Winkel α)			
	70°	80°	90°	95°
G1	keine	200	50	keine
G2	keine	150	30	keine
G3	keine	100	10	keine
G4	500	100	10	0
G5	350	100	10	0
G6	350	100	0	0

^a Jede Richtung des Winkels von der nach unten gerichteten Senkrechten der Leuchte, in welche die Leuchte installiert ist.

Zudem kann das Verhältnis zwischen dem insgesamt emittierten Licht der Leuchte im installierten Zustand und dem Teil, der in den Himmel abgegeben wird, prozentual berechnet werden (sog. upward light ratio = ULR). Die Abstrahlung in den Himmel setzt sich aus den Lichtemissionen zusammen, die direkt oder durch Reflektion in den oberen Halbraum der Leuchte abgegeben werden (LiTG-Publikation 12.3 2011, CIE Publication 150). Diese Lichtemissionen in den oberen Halbraum werden von Leitfäden für die gute fachliche Praxis, z. B. durch die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) oder den britischen Lichtexpertenverband (Institution of Lighting Professionals (ILP), je nach Umgebung und Nutzungsart der Beleuchtung unterschiedlichen Zonen zugeordnet. In jeder Zone sind bestimmte Maximalwerte vorgesehen, wie viel Licht anteilig in den oberen Halbraum abgegeben werden darf (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Zoneneinstufung nach CIE (2017) und ILP (2011) mit unterschiedlichen Werten für nach oben abgestrahlte Emission (ULR) aller Leuchten einer Lichanlage.

Zonen	ULR (%) CIE	ULR (%) ILP	Umweltbereich	Lichtumgebung
drfE0*	--	0	Kernzone Schutzgebiete	Ohne künstliche Beeinträchtigung
E1	0	0	Pufferzone Schutzgebiet	Kaum künstliche Beeinträchtigung
E2	2,5	2.5	Ländlich	Wenig künstliche Beeinträchtigung
E3	5	5	Peri-urban	Mittlere bis starke Beeinträchtigung
E4	5	15	urban	Starke Umgebungsbeeinträchtigung

*Umweltzone, nur beschrieben in der ILP (2011)

Eine weitere Möglichkeit, die Abstrahlungsgeometrie einer Leuchte genauer zu definieren, sind die sogenannten „Backlight-Uplight-Glare“ (BUG) Kriterien.⁹⁰ Dieses Bewertungssystem wurde in den USA von der International Dark Sky Association (IDA) und der Illuminating Engineering Society (IES) entwickelt. Die BUG-Kriterien unterteilen Lichtemissionen einer Leuchte in drei Zonen: In den Bereich vor der Leuchte, hinter der Leuchte und oberhalb der Leuchte. Diese Bereiche können in weitere Unterzonen eingeteilt werden. Die Kriterien erlauben es, die einzelnen Winkel der Abstrahlung einer Leuchte genauer zu differenzieren und zu bewerten, so dass nicht nur das nach oben abstrahlende Licht bewertet werden kann, sondern auch unerwünschte Strahlung in Wohn- und Lebensräume oder in die Augen von Verkehrsteilnehmern (physiologische Blendung).

4.3.1 Voll abgeschirmte Leuchten für Infrastrukturbeleuchtung

Insbesondere innerhalb und in der Nähe von Schutzgebieten und Gewässern müssen die strengsten Kriterien für Lichtemissionen angewendet werden (z. B. E 0 = 0 % ULR, Tab. 6). So z. B. untersagt die französische Verordnung zur Begrenzung der Lichtverschmutzung ab Januar 2020 in Schutzgebieten jegliche Abstrahlung auf Gewässer.⁹¹ Geschützte Landschaftsbestandteile, aber auch die außerorts gelegene Normallandschaft können durch

⁹⁰ Backlight, Uplight, and Glare (BUG) Ratings - Illuminating Engineering Society 2011, Addendum A; (zuletzt abgerufen am 24.01.2019).

⁹¹ Verordnung vom 27. Dezember 2018 über die Vermeidung, Verminderung und Begrenzung der Lichtverschmutzung: <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2018/12/27/TREP1831126A/jo/texte> (zuletzt abgerufen am 26.03.2019).

urbane Lichtglocken beeinträchtigt werden, die durch atmosphärische Reflektion sehr weit in ländliche Gebiete hineinreichen (DURISCOE et al. 2014, KYBA et al. 2015). Eine vollabgeschirmte Leuchte kann noch in über 40 km bis zu 90 Prozent der Himmelsaufhellung verringern im Vergleich zu einer Leuchte mit nur 2 % URL (ohne Einberechnung von Abschirmungen durch Gebäude oder Vegetation). Jegliche Reduzierung der ULR verringert den Einfluss der Leuchten auf die Himmelshelligkeit.⁹² Daher ist auch in urbanen Gebieten die Regulierung des noch oben abstrahlenden Lichtes möglichst auf null Prozent zu begrenzen. Urbane Siedlungen bieten zudem Lebensraum für Wildtiere und -pflanzen, die durch vermeidbare Lichtimmissionen beeinträchtigt werden können. Weiterhin ist der Schutz von Wohnräumen vor belästigenden Lichtimmissionen in dichten Siedlungsgebieten für das Wohlbefinden der Menschen ein wachsendes Bedürfnis.

Aus diesen Gründen wird für alle Umweltzonen empfohlen, Lichtanlagen mit voll abgeschirmten Leuchten zu verwenden. Zumindest für Verkehrsflächen sollten diese ausschließlich verwendet werden. Die Leuchten sollten eine gerade und keine gewölbte Glasabdeckung haben, damit eine Abstrahlung in den oberen Halbraum (ULR = 0 %) und in die Horizontale verhindert wird. Bestenfalls wird eine Abstrahlungsgeometrie ohne Lichtemission in flachen Winkeln gewählt (z. B. durch eine Beschränkung der Lichtmenge im Bereich zwischen 10° und 20° unterhalb der Horizontalen nach der Lichtstärkeverteilungsklasse G 6, vgl. Tab. 5). Diese technischen Vorkehrungen gewährleisten die derzeit fachlich geeignetste Straßenbeleuchtung nach dem Stand der Technik, um die nachteiligen Auswirkungen künstlichen Lichts zu begrenzen.

Das Einhalten der Richtwerte der Lichtstärkeverteilungsklassen und der empfohlenen ULR-Werte ist allerdings für eine geeignete Außenbeleuchtung allein nicht ausreichend: Weder der ULR-Wert einer Leuchte noch die Lichtstärkeverteilungsklasse berücksichtigen den Einfluss der verwendeten Leuchtdichte (siehe S. Kapitel 4.2). Abstrahlungen in unerwünschte Bereiche (z. B. in den oberen Halbraum) können nicht nur durch die direkte Lichtemission der Leuchte, sondern auch durch die Reflexion (z. B. von der Fahrbahn) erzeugt werden. Hohe Leuchtdichten können bei restriktiver Lichtstärkeverteilungsklasse sogar einen begünstigenden Effekt auf Lichtglocken haben, indem das emittierte Licht auf einen kleinen Bereich konzentriert und durch Reflektion des Untergrunds in die Atmosphäre gestreut wird. Die CIE (2017) führte deshalb den UFR (upward flux ratio) für die Berechnung der Reflexion des Untergrundes ein.

Zudem genügen die derzeit geltenden Grenzwerte zum Schutz vor Blendungen und Abstrahlungen in den oberen Halbraum nicht dem Schutz von Fluginsekten: Denn weder die vorgeschriebene Begrenzung der Raumaufhellung noch die der Himmelsaufhellung reduziert die Lichtimmissionen, die auf die Flughöhe von Insekten zwischen 5,4 und 1,7 Metern Höhe anfallen (SONEIRA 2013). Ein umweltverträgliches Leuchtendesign, das nachteilige Auswirkungen auf lichtempfindliche Arten vermeidet, muss daher die Abstrahlung und die Leuchtdichte auch innerhalb dieser Flughöhe auf ein Minimum begrenzen. Es fehlen deshalb Lichtstärkeverteilungsklassen, die auch mit den naturschutzfachlichen Anforderungen vereinbar sind. Eine Begrenzung der Lichtverteilungskurve und eine Anpassung der Beleuchtungsstärke sind dafür erforderlich.

⁹² Kinzey (2017): An Investigation of LED Street Lighting's Impact on Sky Glow (zuletzt abgerufen am 03.06.2019).

4.3.2 Objektbestrahlung von oben nach unten

Eine weitere Herausforderung stellen Objektbeleuchtungen dar, die typischerweise von unten angeleuchtet werden. Objektbeleuchtungen sollten möglichst in einem von oben nach unten gerichtetem Winkel installiert werden (Abbildung 17). Ist das nicht möglich, hat die Beleuchtung so zu erfolgen, dass keine Bereiche abseits der Objektgrenzen (z. B. das Dach) beleuchtet werden. Es stehen technische Möglichkeiten zur Verfügung, Objektgrenzen, Ausflugslöcher von Wildtieren (z. B. Fledermäuse und Vögel) oder Fenster in Gebäuden exakt auszusparen. Eine davon stellt die GOBO-Projektionsbeleuchtung (Graphical optical blackout) dar, die mithilfe eines Linsensystems durch eine eingebaute Schablone eine vorgegebene Fläche bzw. Umrisse als Schattenprojektion passgenau beleuchtet. Für die Form der Schablone kann ein Dia mit dem Umriss der Gebäudestruktur genutzt werden.

Grundsätzlich sollte aber auf eine großflächige Beleuchtung von Objekten und Landmarken weitestgehend verzichtet werden. Insbesondere in Kerngebieten und in Pufferzonen von besonders geschützten Landschaftsbestandteilen muss auf eine Beleuchtung von Objekten – beispielsweise Denkmäler oder Kirchen – gänzlich verzichtet werden.

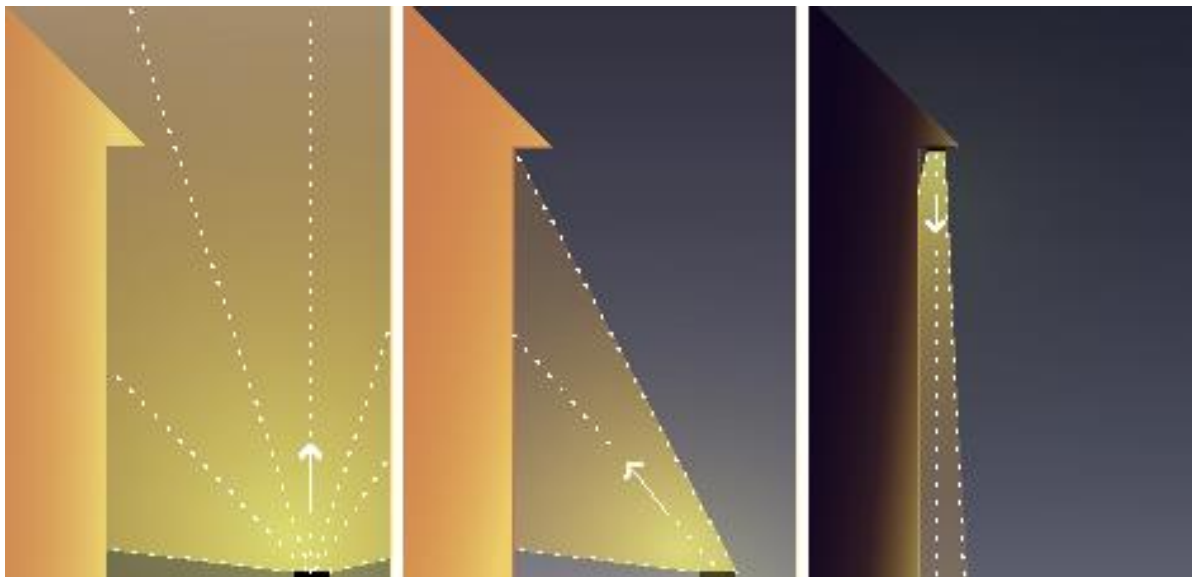


Abbildung 17: Empfehlungen für die Anstrahlung von Gebäuden und Objekten. Strahler müssen gezielt das Objekt beleuchten und nicht über die Objektgrenzen hinweg strahlen. Es sollte möglichst von oben nach unten beleuchtet werden. Links: Bodenstrahler, der in alle Richtungen strahlt, verursacht Lichtverschmutzung. Mitte: die Objektanstrahlung bleibt in den Grenzen des Objektes. Rechts: Optimal sind Objektstrahler von oben nach unten zu richten. Illustration von Catherine Perez Vega.

4.3.3 Begrenzung der Lichtemissionen aus Innenraum- und Gewächshausbeleuchtungen

Durch die Emissionen aus Innenraum- und Gewächshausbeleuchtungen können ebenfalls erhebliche nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt ausgehen. Die aus dem Gebäudeinneren dringenden Lichtemissionen sind deshalb zu minimieren. Als geeignete Maßnahmen kommen Jalousien und Fensterbehänge in Betracht. Diese können zudem die Kosten für die Klimatisierung verringern, indem die Abwärme der Leuchten für die Innenraumwärme der Anlage (z. B. Gewächshäuser) genutzt wird (OOSTER VAN'T et al. 2008). In den Niederlanden sind seit 2014 Begrenzungen von Lichtemissionen von Gewächshausbeleuchtungen verbindlich vorgeschrieben (SABELIS 2013): Die Lichtquelle muss zur Seite zu 95 Prozent und nach oben (ULR) zu 98 Prozent abgeschirmt werden, wenn das Gewächshaus

eine Fläche über 2500 m² hat und nächtliche Zusatzbeleuchtungen angewendet werden.⁹³ Bei der Planung von Gebäuden und Räumen mit größeren Fensterflächen ist nach Einbruch der Dunkelheit eine Abschirmung der Innenraumbeleuchtung empfehlenswert und in der Planungsphase zu berücksichtigen.

4.3.4 Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen für die Abstrahlungsgeometrie

- Erforderliche Lichtverteilungskurven und Leuchtdichten der Beleuchtungsanlagen müssen im Rahmen eines Anforderungsprofils ermittelt und begründet werden.
- Lichtemissionen, die in den oberen Halbraum und in die Horizontale emittiert werden, sind zu reduzieren oder ganz zu vermeiden.
- Die Abstrahlungsgeometrie sollte in möglichst steilen Winkeln von oben nach unten gestaltet werden und möglichst geringe Leuchtdichten aufweisen.
- Abstrahlungen in flachen Winkeln und insbesondere in Abstrahlwinkeln > 70° sollten nur erfolgen, wenn dies besondere sachliche Gründe erfordern.
- Lichtemissionen aus Innenräumen sind zu berücksichtigen und weitestgehend abzudecken. Insbesondere Lichtemissionen aus Gewächshausbeleuchtungen und Innenraumbeleuchtung mit größeren Fensterflächen.
- Die Einhaltung der guten Praxis ist durch ein verbindlich vorzuschreibendes Monitoring nachzuweisen.



Abbildung 18: Illustration von einer Kugelleuchte, ohne Begrenzung des nach oben gerichteten Lichtes (ULR) (links) und abgeschrägter Straßenleuchte, die nur den Infrastrukturbereich mit Gehweg beleuchtet, ohne Abstrahlung auf Wohnräume oder Habitate (rechts). Illustrationen von Rainer Stock im Auftrag des „Loss of the Night“ Netzwerks LoNNe (EU-COST-Aktion ES1204) © 2016.

⁹³ Niederländische Verordnung des Umweltmanagements Artikel 3.56, abrufbar unter: https://wetten.overheid.nl/BWBR0022762/2019-01-01/#Hoofdstuk3_Afdeling3.5_Paragraaf3.5.1_Artikel3.56 (zuletzt abgerufen am 01.03.2019).

4.4 Lichtfarbe

Leuchtmittel werden je nach der Zusammensetzung der emittierten Wellenlängen nach Lichtfarben unterschieden, die als korrelierte Farbtemperatur (CCT) in Kelvin gemessen wird. Je mehr Licht im längeren Wellenlängenbereich emittiert wird, desto „wärmer“ (d. h. rötlicher) erscheint das Licht; ist das emittierte Licht überwiegend kurzwellig, wirkt das Licht „kälter“ (d. h. bläulicher). Man unterscheidet daher „kaltweißes“ (über 5500 K), „neutralweißes“ (5500 - 3000 K) oder „warmweißes“ (unter 3000 K) Licht (THEISS 2000).

Das Farbspektrum bezeichnet die Zusammensetzung des emittierten Lichts und wird in Wellenlängen gemessen. In Abhängigkeit der Wellenlängen erscheint das Licht für das menschliche Auge in unterschiedlicher Farbe. Violett und Blau werden zwischen 380 bis 490 nm Wellenlänge, Grün und Gelb zwischen 490 und 585 nm und Orange-Rot zwischen 585 und 750 nm wahrgenommen. Zudem emittieren viele Leuchtmittel auch ultraviolette Licht (UV-A: 315 bis 380 nm), das zwar für den Menschen nicht sichtbar ist, aber von vielen Tierarten – insbesondere von Insekten, Vögeln und Fledermäusen – visuell wahrgenommen werden kann.

4.4.1 Wahl der Lichtfarbe für die Straßenbeleuchtung

Das zu wählende Farbspektrum der Beleuchtung hängt von dem Anforderungsprofil ab: Eine gute Farbwiedergabe im Verkehr ist zur Erkennung von Verkehrssignalen und der Farbkodierung von Verkehrszeichen von Bedeutung. LED-Farbtemperaturen unter 1800 Kelvin können eine geringere Farbwiedergabe zur Folge haben, das heißt einzelne Farben können schlechter unterschieden werden. Die Genauigkeit der Farberkennung nimmt mit steigender Farbtemperatur zu. Wenn die Farbtemperatur über 3000 Kelvin liegt, steigt die Farberkennung des menschlichen Auges auf 100 Prozent. Allerdings reduziert sich bei nebeligen Bedingungen das Potenzial der Farberkennung je größer der Blauanteil des Lichtspektrums ist. Zudem ist die Dunkeladaptation des menschlichen Auges bei höheren Farbtemperaturen bzw. einem höheren Blauanteil eingeschränkt. Daher empfehlen JIN et al. (2015) für Straßenbeleuchtungen eine Farbtemperatur von 3000 Kelvin, die eine hohe Farbwiedergabe und eine geringe Streuung zu nebeligen Bedingungen ermöglicht sowie noch eine relativ gute Dunkeladaptation des menschlichen Auges erlaubt. Moderne LED zeigen aber auch mit geringeren Farbtemperaturwerten schon erstaunlich hohe Farbwiedergabewerte, die eine solche Limitierung auf weiße LED nicht mehr erfordert.⁹⁴

Lichtemissionen außerhalb des für den Menschen wahrnehmbaren Spektrums, wie UV-Strahlung (< 380 nm) und IR-Strahlung (> 700 nm), können von einigen Organismen wie Insekten oder Vögeln wahrgenommen werden und verursachen nachteilige Auswirkungen auf diese Organismen. Sie sollten daher vermieden werden, gegebenenfalls indem sie vollständig ausgefiltert werden.

4.4.2 Vermeidung zu hoher Blaulichtanteile

Bezüglich der nachteiligen Auswirkungen gilt der Grundsatz: Umso breiter das Farbspektrum von Leuchten, desto mehr Organismen können potenziell beeinträchtigt werden. Wird das Spektrum eingeschränkt, stellt sich die Frage, welche Farben die geringsten Auswirkungen auf Flora, Fauna und Mensch verursachen und daher zu bevorzugen sind. Organismen reagieren unterschiedlich und teilweise konträr auf unterschiedliche Farbspektren (SCHROER & HÖLKER 2017). Die Wahrnehmung von Licht und die Beeinträchtigungen unterschiedlicher Organismen durch unterschiedliche Farbspektren des Lichtes sind sehr

⁹⁴ DoE: Snapshot Outdoor Area Lighting (zuletzt abgerufen 03.06.2019)

divers und bislang sind noch viele Zusammenhänge unerforscht. Daher kann eine verallgemeinerungsfähige Definition nicht getroffen werden, die bestimmt, welches Farbspektrum die geringsten Auswirkungen hervorruft. Allerdings gibt es mehr Hinweise auf nachteilige Auswirkungen durch kaltweiße Leuchtmittel, die ein breites Farbspektrum und einen relativ hohen Anteil kurzer Wellenlängen (d. h. blauen Lichts) emittieren, als über Lichtemissionen, die überwiegend längere Wellenlängen emittieren (LONGCORE et al. 2018, DONNERS et al. 2018).

Kaltweißes Licht – mit einem hohen blauen Lichtanteil (Wellenlänge von unter 490 nm) – sollte während des Abends und der Nacht weitestgehend vermieden werden, da Lichtemissionen mit hohem Blauanteil mehr Organismen stärker beeinträchtigen können. Lichtemissionen von Außenbeleuchtungen sollten daher allgemein und zwingend innerhalb und in der Nähe von Natur- und Landschaftsschutzgebieten eine korrelierte Farbtemperatur (CCT) von maximal 3000, bestenfalls von maximal 2400 Kelvin aufweisen. Aus diesem Grund sind für Schutzgebiete und nicht gesetzlich geschützte aber naturschutzfachlich wertvolle Gebiete folgende Leuchtmittel empfehlenswert: Natriumdampf-Niederdrucklampen, Natriumdampf-Hochdrucklampen mit Beleuchtungsstärkeregulierung und LED mit möglichst geringem Blaulichtanteil, wie beispielsweise schmalbandige Amber oder PC Amber LED.

Schwierigkeiten bereitet der Umstand, dass sich aus der Lichtfarbe nicht die exakte Zusammensetzung der emittierten Wellenlängen ableiten lässt. Außerdem ist anhand der Lichtfarbe nicht zu erkennen, ob ein breites Spektrum unterschiedliche Wellenlängen oder nur einzelne Wellenlängen emittiert. Daraus folgt, dass die Lichtfarbe lediglich ein Näherungswert darstellt, der aus Praktikabilitätsgründen ein sinnvolles Unterscheidungsmerkmal bildet. Für die Beschaffung umweltfreundlicher öffentlicher Straßenbeleuchtungen und Verkehrssignalen empfiehlt die EU statt der Farbtemperatur die Nutzung des spektralen G-Index. Dieser Index ist ein Maß für die Menge an blauem Licht pro Lumen (Menge des Lichtstroms). Je kleiner der G-Index⁹⁵, desto mehr blaues, violettes oder ultraviolettes Licht emittiert eine Lampe im Verhältnis zu ihrer Gesamtleistung (GALADÍ-ENRÍQUEZ 2018).

Es ist weiterhin zu beachten, dass das Farbspektrum nur ein Faktor von mehreren ist, der das Ausmaß nachteiliger Auswirkungen bestimmt. Das Farbspektrum ist lediglich für die maximale spektrale Empfindlichkeit der jeweiligen Art bedeutend. Es bedeutet aber nicht, dass Organismen auf andere Farbspektren gänzlich unempfindlich reagieren. Deshalb ist eine korrekte Farbwahl allein noch keine ausreichende Schutz- bzw. Vermeidungsmaßnahme. Stattdessen müssen neben der Lichtfarbe auch geeignete Beleuchtungsstärken und Abstrahlungswinkel gewählt werden.

⁹⁵ JRC Report: Revision of the EU Green Public Procurement Criteria for Road Lighting and traffic signals, S. 67 (zuletzt abgerufen 01.03.2019).

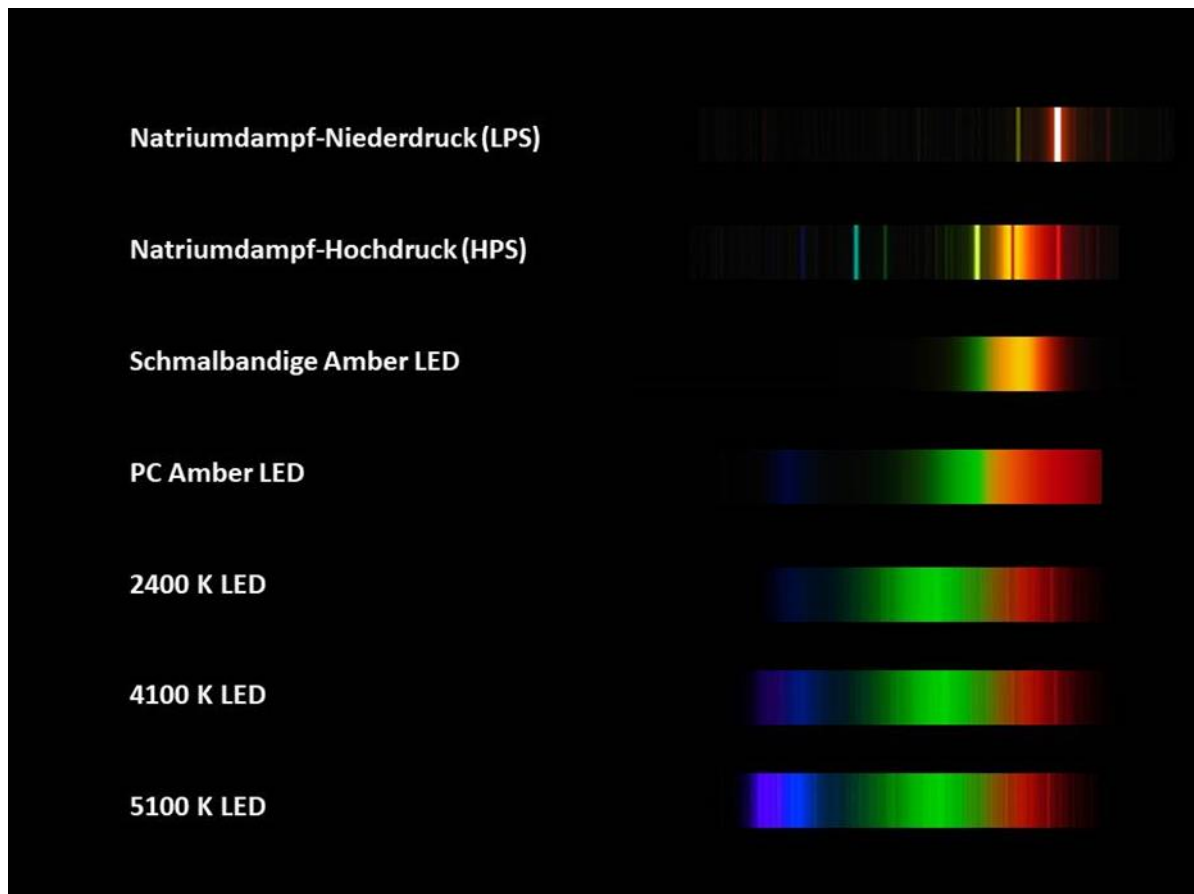


Abbildung 19: Lichtspektren unterschiedlicher Leuchtmittel, Natriumdampf-Niederdruck (LPS), Natriumdampf-Hochdruck (HPS) und LEDs mit unterschiedlichen Farbtemperaturen. Abbildungen der Spektren von Flagstaff Darksky Coalition (<http://www.flagstaffdarkskies.org/for-wonks/lamp-spectrum-light-pollution>).

4.4.3 Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen für geeignete Lichtfarben

- Das Anforderungsprofil einer Beleuchtungsanlage muss den Bedarf für die Farberkennung begründen.
- UV- und IR-Emissionen sind für die visuelle Wahrnehmung des Menschen irrelevant. Diese Emissionen sind gänzlich zu vermeiden, da vor allem UV-Emissionen von vielen Organismen (darunter Insekten, Vögel, Reptilien und einigen Säugetiere) wahrgenommen werden und die Organismen beeinträchtigen.
- Für Beleuchtungsanlagen in und in der Nähe von Natur- und Landschaftsschutzgebieten ist der Blaulichtanteil der Lichtemissionen so weit wie möglich zu reduzieren. Hierfür sind Leuchtmittel wie Natriumdampf-Niederdruckleuchten oder PC Amber LED zu empfehlen.
- Für LED-Neuinstallationen der Straßenbeleuchtung werden Farbtemperaturen von 3000 Kelvin oder weniger empfohlen. Diese neutralweiße Lichtfarbe erlaubt eine gute Farberkennung auch bei nebeligen Bedingungen und ermöglicht eine bessere Dunkeladaptation des Auges als kaltweißere Lichtfarben.
- Neben der Lichtfarbe müssen eine geeignete Abstrahlungsgeometrie und Beleuchtungsstärke gewählt werden.



Abbildung 20: Illustration der Lichtfarbe. Eine kaltweiße Straßenbeleuchtung mit hohem Blauanteil (links) und warmweiße bis bernsteinfarbene Beleuchtung mit geringen Blauanteil (rechts). Illustrationen von Rainer Stock im Auftrag des „Loss of the Night“ Netzwerks LoNNe (EU-COST-Aktion ES1204) © 2016.

4.5 Planungs- und Entscheidungskriterien

Es ist sinnvoll, die Entscheidungskriterien für die Genehmigung zur Errichtung oder Umrüstung von Beleuchtungsanlagen transparent und öffentlich zur Verfügung zu stellen. So hat beispielsweise das Amt für Umwelt im Kanton Solothurn in der Schweiz für die Bauplanung der Gemeinden anschauliche Informationsmaterialien zur Vermeidung unnötiger Lichtemissionen zusammengestellt.⁹⁶ Bauanträge, die Außenbeleuchtungen vorsehen, müssen diese Anlagen verorten und beschreiben. Die Genehmigung wird erteilt, wenn naturschutzfachliche Anforderungen an die Beleuchtung erfüllt werden. Das beinhaltet das Vorliegen einer Begründung für die Beleuchtung und deren Parameter, die Wahl einer geeigneten Abstrahlungsgeometrie und Beleuchtungsstärke sowie die temporäre Begrenzung der Beleuchtung. Beleuchtungsanlagen sollten in jeglichen Umweltkontexten, in der Stadt bis in ländliche Gebiete hinein, in Genehmigungsverfahren von Bauanträgen geprüft werden. Die Entscheidung über eine Genehmigung oder mögliche Kompensationsmaßnahmen sollte sich an den regionalen, landschaftlichen Gegebenheiten, den vorkommenden empfindlichen Arten, den Beleuchtungskonzepten und den örtlichen Vorgaben orientieren.

4.5.1 Vernetzung von Lebensräumen

Gebiete mit natürlich dunklen Nächten sind für das Funktionieren von Ökosystemen und damit für den Erhalt der Artenvielfalt wichtig (vgl. KRONFELD-SCHOR et al. 2013, AZAM et al. 2015, HÖLKER et al. 2018, GRUNSVEN VAN et al. 2017). Diese Gebiete sollten als Lichtschutzgebiete unter rechtlichen Schutz gestellt werden. Neben dem Erhalt und der Erweiterung von Lichtschutzgebieten ist zu empfehlen, Gebiete mit natürlich dunklen Nächten in die Lebensraumnetze und in den Biotopverbund zu integrieren und zu vernetzen (u. a. RECK et al. 2017, MAQ⁹⁷). Um

⁹⁶ Amt für Umwelt Kanton Solothurn: Checkliste Licht (zuletzt abgerufen am 04.03.2019).

⁹⁷ Merkblatt zur Anlage von Querungshilfen für Tiere und zur Vernetzung von Lebensräumen an Straßen (MAQ) Überarbeitung der Ausgabe 2008 der FGSV unter Einbeziehung des Merkblattes zum Amphibienschutz an Straßen (MAmS), Ausgabe 2000 des BMVBS.

Lebensräume auch vor der Barrierewirkung von Lichtimmissionen zu schützen, sind entsprechende Entscheidungskriterien während der Planungsphase von Infrastrukturvorhaben (insbesondere Straßenbeleuchtungen, aber auch der Planung von Tank- und Rastanlagen) und räumlichen Planungen (z. B. Bebauungsplänen) sowie bei der Prognose nachteiliger Auswirkungen und der Bestimmung von Vermeidungs- und Kompensationsmaßnahmen zu berücksichtigen.

Kriterien für Lichtschutzgebiete, die dem Schutz der natürlichen Nachthimmelshelligkeit des Kulturguts Nachthimmel dienen, werden durch die International Dark Sky Association formuliert.⁹⁸ Die Einteilung von Schutzgebieten in Zonen kann ein wichtiges Hilfsmittel sein, besonders, wenn sich innerhalb des Schutzgebiets Besuchereinrichtungen oder Siedlungen befinden. Das Zonierungskonzept sieht ein abgestuftes Schutzkonzept von Kern- und Pufferzonen vor. In Kernzonen sollten keine künstlichen Beleuchtungen betrieben werden dürfen. Die Kernzone wird von einer ausgedehnten Pufferzone geschützt, in der künstliches Licht nur in geringer Intensität und mit optimaler Abstrahlungsgeometrie zu verwenden ist (z. B. in Besucherzentren, Campingplätzen oder Ortschaften). Auf eine Objektbestrahlung (z. B. von historischen Bauwerken oder auch Privathäusern) ist in Kern- und Pufferzonen gänzlich zu verzichten. In den Pufferzonen können Ausnahmen für die Illumination von Landmarken vereinbart werden, wenn die Vernetzung von Lebensräumen und der Schutz vorkommender gefährdeter dämmerungs- und nachtaktiver Arten sichergestellt werden kann. Dies erfordert die Kenntnis der vorkommenden, heimischen Wildtiere und die Schutzbedürfnisse ihrer Lebensräume sowie der geleisteten ökologischen Dienstleistungen (Ökosystemleistungen).

Als Maßnahmen für den Schutz aquatischer Lebensräume kommen eine Beleuchtungsstärkereduzierung, zeitliche Begrenzungen der Beleuchtung und Abschirmung von Lichtanlagen auf Brückenbauwerken und Uferpromenaden, sowohl in ländlichen als auch in innerstädtischen Bereichen, in Betracht. Insbesondere im Rahmen der Initiative "Blaues Band Deutschland" zur Renaturierung von Bundeswasserstraßen für den Natur- und Gewässerschutz sind auch Maßnahmen zu ergreifen, um flächenverbundene Lichtschutzzonen zu entwickeln und der rasant zunehmenden Zerschneidung von Lebensräumen durch Infrastrukturentwicklung und Beleuchtungen entgegenzuwirken. Der Eingriffsregelung entsprechend muss vorrangig die Vermeidung von Lichtimmissionen in empfindlichen Bereichen erfolgen und nur wenn dies nicht möglich ist, muss ein Ausgleich oder Ersatz geleistet werden.

4.5.2 Anforderungen an private Außenbeleuchtungen

Für private Außenbeleuchtungen gelten die gleichen Handlungsempfehlungen wie für öffentliche Außenbeleuchtungsanlagen. Der Schutz vor den Auswirkungen künstlichen Lichts erfordert Maßnahmen, die eine geeignete Lichtfarbe, Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte, Abschaltungseinrichtung und Abstrahlungsgeometrie umfassen. Bei gewerblichen Beleuchtungen, insbesondere Lichtwerbungen, droht bei der Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte ein Wetttrüben, wenn versucht wird, die eigene Beleuchtung von anderen abzuheben. Zum Schutz davor dürfen gewerbliche und private Leuchtpunkte und -flächen die Beleuchtungsmaxima der vorherrschenden Infrastrukturklasse, die sich an der Umgebungsbeleuchtung orientiert, nicht überschreiten. Entsprechend sind nicht nur die Empfehlungen der CIE zur Begrenzung der physiologischen Blendung einer Schwellenwertüberschreitung von 15 Prozent einzuhalten, sondern auch die psychologische Blendung. Das bedeutet, dass

⁹⁸ Ein Überblick über international anerkannte Lichtschutzgebiete (zuletzt abgerufen am 26.01.2019).

Beleuchtungsstärkemaxima der vorherrschenden Beleuchtungsklasse der Umgebung Beachtung finden (z. B. nach DIN EN13201-5 (2016) der Mittelwert der jeweils höheren Klasse; siehe Tab. 4).

Wird die öffentliche Beleuchtung eingeschränkt, kann das in der Folge zu einer erhöhten Neuinstallation privater Außenbeleuchtungen führen, wenn die Anlieger die reduzierte Beleuchtungsstärke oder -zeiten als unzureichend empfinden. Dieser Entwicklung sollte durch geeignete Umweltbildungsmaßnahmen entgegengewirkt werden (s. Kap. 4.5.3).

4.5.3 Umweltbildung

Ein bewusster Umgang mit künstlichem Licht setzt die Kenntnis der nachteiligen Auswirkungen und ihrer Vermeidung voraus. Daher wird empfohlen, den Leitfaden für gute Beleuchtungspraxis als festen Bestandteil in die Umweltbildung aufzunehmen.

Zum Beispiel wurde die Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt (NBS) entwickelt, um gleichermaßen Schutz, nachhaltige Nutzung und soziale Aspekte der Erhaltung der biologischen Vielfalt in der Bevölkerung zu vermitteln. Mittlerweile wurde im Rahmen des NBS ein Aktionsprogramm zum Insektenschutz⁹⁹ erarbeitet, das auch Maßnahmen zum Schutz der Biodiversität durch fachlich geeignete Beleuchtungslösungen enthält. Lichtimmissionschutz ist für die Erhaltung der Biodiversität ein relevanter Faktor und leistet damit einen wichtigen Beitrag für viele Schwerpunkte der NBS.

Nicht nur der Betrieb künstlicher Beleuchtungen ruft nachteilige Auswirkungen auf natürliche Ressourcen und Lebensräume hervor. Auch die Herstellung und Entsorgung von Leuchtmitteln kann, ohne dass dies für den Verbraucher ersichtlich ist, mit nachteiligen Auswirkungen verbunden sein. Um dem Verbraucher bewusste Kaufentscheidungen zu ermöglichen, müssen relevante Informationen transparent kommuniziert werden. Dazu gehört, dass Umweltbelastungen durch Produktion und Entsorgung deklariert sowie wissenschaftliche Nachweise über die Lebensdauer von Produkten erbracht werden. Hierzu könnte sich ein Labelsystem eignen, das umweltschonende Beleuchtungsprodukte mit nur geringen Umwelt- und Gesundheitsbeeinträchtigungen kennzeichnet.

4.5.4 Verhalten in Konfliktfällen

Beleuchtungsumrüstungen und –Neuinstallationen führen oft zu Konflikten, wenn die veränderten Beleuchtungssituationen Erwartungen enttäuschen oder mit Beeinträchtigungen der persönlichen Lebensgestaltung verbunden sind. Diese Konflikte sind meist hoch komplex und eine Lösung erscheint oft nur durch rechtliche oder politische (d. h. durchsetzbare) Entscheidungen möglich, denn sie entstehen oft aus sozialen Prozessen, deren Argumente und Akteure sich grundsätzlich stark unterscheiden und situationsbedingte Lösungen benötigen. MEIER (2019) beschreibt anhand von Beleuchtungskonflikten ein Modell, um diese Konflikte zu analysieren und Lösungswege aufzuzeigen. Dabei wird der Konflikt nach seiner Ausgangssituation (Beleuchtungsfunktion, technischer Leuchtentyp und Art des Konfliktauslösers – z. B. Einrichtung einer Halbnachtschaltung oder Umrüstung auf neue Leuchten) beschrieben. Weiterhin werden die Verteidiger und Kläger gelistet und in einem dritten Schritt Perspektiven gegenübergestellt, darunter negative und positive Aspekte der Beleuchtungssituation und mögliche Maßnahmen zur Lösung des Konflikts. Dabei ist besonders wichtig, dass die Konfliktauslöser so reflektiert werden, wie sie die Akteure wahrnehmen, unabhängig von wissenschaftlichen Nachweisen über die tatsächlichen Auswirkungen. Denn der Konflikt liegt meist in der unterschiedlichen

⁹⁹ Aktionsprogramm Insektenschutz, <https://www.bmu.de/publikation/aktionsprogramm> (zuletzt abgerufen am 24.09.2019)

Interpretation der Realität. Werden die Argumente der Akteure für oder gegen die Beleuchtung gegenübergestellt, kann aus einem Abgleich ersichtlich werden, welche Beleuchtungsdetails den Kläger stören und welche Maßnahmen eine Lösung herbeiführen können.

4.5.5 Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen für Entscheidungs- und Planungskriterien

- Entscheidungs- und Planungskriterien sind transparent zu gestalten und öffentlich zur Verfügung zu stellen.
- Unterschiedliche Lebensräume haben jeweils eigene Schutzbedürfnisse. Dementsprechend ist ein abgestuftes Schutzkonzept zu verwenden. Die strengsten Kriterien sind auf Kernzonen geschützter Gebiete anzuwenden. In den umgebenden Pufferzonen ist künstliches Licht nur in geringer Intensität und mit optimaler Abstrahlungsgeometrie zu verwenden. Aber auch in Normallandschaften und urbanen Gegenden, einschließlich Innenstädten sind erhebliche nachteilige Auswirkungen künstlichen Lichts zu vermeiden oder zu reduzieren.
- Die Vernetzung von Lebensräumen muss auch lichtplanerisch umgesetzt werden, insbesondere müssen Gebiete in Gewässernähe mit einem erhöhten Schutz vor Lichtimmissionen versehen werden.
- Auf private bzw. gewerbliche Außenbeleuchtungen sind die gleichen Handlungsempfehlungen wie für öffentliche Beleuchtungsanlagen anzuwenden.
- Um die Akzeptanz und Umsetzung der Kriterien im privaten und gewerblichen Bereich zu steigern, sind Umweltbildungsmaßnahmen erforderlich, in dessen Rahmen über Umweltbelastungen von Leuchtmitteln durch Produktion, Anwendung und Entsorgung aufgeklärt wird.
- Für den Umgang mit Beleuchtungskonflikten wird eine analytische Darstellung der Beleuchtungssituation und der möglichen Perspektiven nach MEIER (2019) empfohlen, die negative und positive Aspekte der Beleuchtungssituation gegenüberstellt, um mögliche Maßnahmen zur Lösung des Konflikts zu visualisieren.

Anhang

Glossar

Abstrahlungsgeometrie ist die physikalische Ausrichtung der Lichtverteilung durch eine Leuchte, die anhand des Leuchtschirms, Reflektoren und der Leuchtausrichtung geformt wird.

Beleuchtungsstärke ist der gesamte auf eine bestimmte Fläche einfallende Lichtstrom. Zur Bemessung der Beleuchtungsstärke werden Beleuchtungsstärkemesser (Luxmeter) eingesetzt. Die Maßeinheit ist Lux (lx). In der Radiometrie entspricht dies der Bestrahlungsstärke (Strahlungsstromdichte), angegeben in Watt pro Quadratmeter (W/m^2).

Candela ist die physikalische Größe der Lichtstärke, die Einheit wird mit cd angegeben. Eine gewöhnliche Haushaltskerze hat eine Lichtstärke von etwa 1 cd.

Effizienz bei Beleuchtung bezeichnet die Lichtausbeute. Diese wird in Lumen pro Watt (lm/W) angegeben.

Farbspektrum oder auch das Lichtspektrum ist der für den Menschen sichtbare Teil des elektromagnetischen Wellenspektrums. Das Farbspektrum teilt sich nach der Wellenlänge der Photonenstrahlung in Farben von Violett bis Blau (390 - 490 nm), Grün bis Gelb (490 - 585 nm) und Orange bis Rot (600 - 700 nm) ein.

Farbtemperatur ist ein Maß, um den Farbeindruck einer Lichtquelle quantitativ zu bestimmen. Die Farbtemperatur ist als die Temperatur eines schwarzen Körpers, eines Planckschen Strahlers, definiert. Mit äquivalenter Farbtemperatur einer Lichtquelle bezeichnet man die Temperatur, die ein schwarzer Körper haben müsste, um den gleichen Farbeindruck wie die Lichtquelle zu erzeugen. Die Temperatur wird in Kelvin angegeben.

Farbwiedergabeindex (engl. = colour rendering index) ist ein Wert, der angibt, wie weit die Farbwiedergabe der Lichtquelle von kontinuierlichen Spektren thermischer Lichtquellen (z. B. einer Glühlampe) oder vom Tageslicht abweicht. Je schmaler die Wellenlängenbereiche sind, die Lichtquellen abstrahlen, umso geringer ist die Farbwiedergabe.

Fluoreszenz ist die spontane Emission von Licht kurz nach der Anregung eines Materials durch elektronische Übergänge. Dabei ist das emittierte Licht in der Regel energieärmer als das vorher absorbierte.

Gasentladungsleuchten sind Lampen, die Gasentladung für die Strahlung nutzen. Diese wird durch Stromdurchgang durch Gase erzeugt. Als Füllgase der Leuchten werden Edelgase oder Metaldämpfe verwendet. Bei der Entladung wird Strahlung abgegeben. Das Strahlungsspektrum und damit die Lichtfarbe sind von dem jeweiligen Füllgas abhängig.

Glühlampen bestehen aus einem Sockel einschließlich der elektrischen Stromzuführungen im Quetschfuß und einem Glaskolben, der den Glühfaden und dessen Halterung vor der Außenumgebung abschirmt. Der elektrische Leiter besteht aus einem leitenden Faden (oft Wolfram), der durch elektrischen Strom aufgeheizt und dadurch zum Leuchten angeregt wird. Die Glühlampe ist sehr ineffizient (ca. 10 - 20 Lumen/Watt verglichen mit bis zu 150 Lumen/Watt für weiße LEDs). Innerhalb der EU wurden Energieeffizienzanforderungen an Glühlampen gestellt, die zu einem faktischen Herstellungs- und Vertriebsverbot von Glühlampen führte.

Halogen-Metall dampflampen sind eine Weiterentwicklung der Quecksilberdampflampen. Sie beruhen auf dem gleichen Prinzip, sind aber durch Zusätze von Halogenverbindungen und seltenen Erden in ihrer Farbwiedergabe und Lichtausbeute optimiert. Als Startfunken dienen die Gase Xenon oder Neon. Lichtausbeuten von bis zu 120 lm/W können je nach Farbwiedergabeeigenschaften erreicht werden. Neben Natriumdampf und den LED gehören die Halogen-Metall dampflampen zu den effizienteren Lampen.

Leuchtdichte beschreibt die Helligkeit, wie sie dem Auge auf einer Fläche erscheint. Die Leuchtdichte einer angestrahlten Fläche (z. B. Straße) wird von der Beleuchtungsstärke und der Reflexionscharakteristik der Fläche bestimmt. Bei hellen Flächen mit hohem Reflexionsgrad wird mit geringerer Beleuchtungsstärke die gleiche Leuchtdichte wie bei einer dunkleren Fläche mit höherer Beleuchtungsstärke erreicht. Helle Straßenoberflächen können daher mit geringerer Lichtmenge beleuchtet werden, um den gleichen Helligkeitseindruck zu erhalten. Andererseits hängt die Reflektivität und damit (bei konstanter Beleuchtungsstärke) die Leuchtdichte einer Fläche von vielen Faktoren ab, wie z. B. dem Blickwinkel, der Rauigkeit des Materials oder ob die Fläche trocken oder nass ist. Gemessen wird die Leuchtdichte in cd/m^2 mit Leuchtdichtemessgeräten, die meist ein kleines Messfeld haben und daher besonders empfindlich sein müssen.

Leuchtdiode kurz LED (light-emitting diode) ist eine lichtemittierende Diode, auch Lumineszenz-Diode genannt. Sie enthält ein lichtemittierendes Halbleiter-Bauelement, das durch elektrischen Stromfluss eine für den Menschen sichtbare Strahlung, Infrarot- oder auch Ultraviolettstrahlung mit einer vom Halbleitermaterial und deren Dotierung abhängigen Wellenlänge abgibt (Dotierung bezeichnet das Einbringen von Fremdstoffen in eine Schicht oder das Grundmaterial der Halbleitertechnik). Für Beleuchtungszwecke werden üblicherweise weiße oder bernsteinfarbene LEDs verwendet. Für weiße LED wird meist eine schmalbandige blaue LED entweder mit nur einem breitbandigen gelben Leuchtstoff oder mit einer Kombination aus grünem und rotem Leuchtstoff kombiniert. Die Lumineszenzschicht wandelt große Anteile des blauen oder ultravioletten Lichts in gelbliches Licht um. Seltener werden ultraviolette-LED mit mehreren Leuchtstoffen in weißes Licht umgewandelt. Dieses aus UV-LED resultierende weiße Licht hat einen sehr hohen Farbwiedergabeindex. LED Lichtquellen werden je nach Art und Anteil der Leuchtstoffbeimischungen in den Farbtemperaturen „kaltweißes“ (über 5500 K), „neutralweißes“ (5500 - 3300 K) oder „warmweißes“ (unter 3000 K) unterteilt (THEISS 2000). Phosphor konvertierte (engl. = phosphor converted) amber LED (pc amber LED) bestehen aus blauen LEDs, die von einer Phosphor-Kapsel umgeben sind. Die Phosphorhülle reduziert den Blaulichtanteil, sie konvertiert das Licht in einen Bernstein-Farbtönen mit 1800 - 2300 K um, der einer Natrium-Hochdrucklampe farblich ähnelt, aber eine bessere Farbwiedergabe hat.

Leuchtmittel (Lampen) unterscheidet man prinzipiell in thermische und nicht-thermische Lichtquellen. Thermische Strahler beziehen die Energie für die Lichtemission aus der thermischen Bewegung ihrer Teilchen, wie z. B. Kerzenflammen, Glühdraht oder die Sonne. Das Spektrum einer thermischen Lichtquelle ist kontinuierlich, es treten alle Wellenlängen auf. Nicht-thermische Lichtquellen haben ein Linien- oder ein Bandenspektrum, d. h. es werden nur bestimmte Wellenlängen abgestrahlt. Beispiele sind Gasentladungsröhren, Leuchtdioden. Linienspektren sind oft charakteristisch für bestimmte Stoffe, wie beispielsweise Natrium oder Quecksilber.

Leuchtstofflampen beruhen auf einem ähnlichen Prinzip wie Metalldampflampen. Sie werden mit Niederdruck betrieben und tragen an der inneren Glasoberfläche einen fluoreszierenden Leuchtstoff. UV-Emissionen können durch spezielle Glassorten und Leuchtstoffe verringert werden. Leuchtstofflampen können eine Effizienz von 100 - 120 lm/W erreichen.

Licht ist der für das menschliche Auge sichtbare Teil (400 - 700 nm) des gesamten Spektrums der elektromagnetischen Strahlung. Längere Wellenlängen, d.h. Infrarotstrahlung (IR) wird nicht als visueller Reiz über die Retina aufgenommen, sondern als Wärme über die Haut. Ultraviolette Strahlung kann von Insekten, Vögeln und Reptilien nicht aber vom Menschen visuell wahrgenommen werden. Auch Säugetiere können oft UV-Strahlung wahrnehmen, über die Bedeutung dieser Wahrnehmungsform herrscht aber noch Unklarheit (DOUGLAS & JEFFERY 2014).

Lichtausbeute ist der Quotient aus dem von der Lichtquelle abgegebenen Lichtstrom und der von ihr aufgenommenen Leistung. Die Lichtausbeute wird mit lm/W berechnet. Je größer ihr Wert, desto größer ist der Lichtstrom pro gegebenen Strahlungsfluss der Lichtquelle; d. h. desto heller ist die Lichtquelle bei gleichem Stromverbrauch.

Lichtstärke ist der in einen bestimmten Raumwinkelbereich abgestrahlte Lichtstrom mit der Einheit Candela (cd). Die Bezeichnung Candela ist von „Kerze“ abgeleitet, die üblicherweise eine Lichtstärke von 1 cd haben, das entspricht 1 lm/m². Die radiometrische Größe hierfür ist die Strahlungsstärke (Strahlstärke, Strahlungsintensität), angegeben in Watt pro Steradian (W/sr).

Lichtstrom ist die gesamte von einer Lichtquelle in alle Richtungen abgestrahlte Lichtleistung, gemessen in Lumen (lm). Der Lichtstrom ist der Strahlungsstrom, der von der spektralen Empfindlichkeit des tagsichtigen menschlichen Auges (photopisches Sehen) bestimmt ist. Die radiometrische Entsprechung dieser Größe ist der Strahlungsfluss (Strahlungsleistung), angegeben in Watt (W). Eine klassische 25 W Glühlampe liefert 220 lm. Den gleichen Lichtstrom erreicht eine LED-Lampe bereits mit 2 W (Stand 2017).

Lichtverteilungskurve (LVK) beschreibt die räumliche Verteilung der Lichtstärke einer Leuchte in Winkeln gemessen anhand der senkrechten Achse, die von dem Leuchtmittel nach unten führt. Lichtstärkeverteilungskurven werden in der Regel in Polarkoordinaten dargestellt. Darin sind die Werte der Lichtstärke bei genormten Betriebsbedingungen der Leuchte dargestellt. Die Lichtstärken werden auf 1.000 Lumen der in der Leuchte betriebenen Leuchtmittel bezogen und in der Einheit Candela pro Kilolumen (cd/klm) angegeben.

Lumen (lateinisch für Licht, Leuchte) ist die physikalische Einheit des Lichtstroms. Das Einheitenzeichen ist lm.

Lumineszenz ist ein physikalisches System, das eine von außen zugeführte Energie ganz oder teilweise nicht in thermische Energie umsetzt, sondern die Energie absorbiert und in einen angeregten Zustand versetzt und Licht emittiert (inklusive Strahlung außerhalb des sichtbaren Bereichs). Die Bezeichnung Lumineszenz bezeichnet entweder den Prozess (das Phänomen) oder die ausgesandte Strahlung.

Lux ist eine Maßeinheit für die Beleuchtungsstärke. Es ist eine Empfängergröße, die den Abstand der Fläche von der Lichtquelle und den Winkel zu ihr berücksichtigt. Eine klare helle Vollmondnacht hat beispielsweise Werte zwischen 0,05 - 0,5 lx.

Magnitude/Quadratbogensekunde ist eine astronomische Einheit, welche die Sichtbarkeit der Sterne in Bezug auf die Fläche des Himmels bewertet. Die Einheit ist mag/arcsec².

Metall dampflampen sind Gasentladungslampen, in denen Metallatome durch Stoßvorgänge mit Elektronen angeregt werden und Energie in Form von Licht abgeben. Eine Metall dampflampe besteht aus einem Glaskolben, in den eine kleine Menge Metall sowie ein Edelgas gefüllt werden und einem Vorschaltgerät, das eine Spule zur Begrenzung des elektrischen Stroms und ein Zündgerät enthält. Das Edelgas dient dem Aufbau eines Funkens zwischen den beiden in den Kolben hineinreichenden Elektroden und hilft den Stromfluss zwischen den Elektroden aufrechtzuerhalten. Das für den Lampentyp spezielle Metall verdampft und leuchtet in seinem charakteristischen Spektrum. Das Zündgerät sorgt für eine hohe Spannung, um den ersten Funken zu erzeugen, danach kann die Lampe mit Wechselstrom im Bereich um 80 V bis 100 V abhängig vom Lampentyp und der Füllung betrieben werden. Die Drosselspulen hindern die Lampen daran, zu überladen und dadurch zu platzen.

Natriumdampf-Hochdrucklampe (engl. = high pressure sodium, HPS) besitzt mit 150 lm/W eine hohe Lichtausbeute. Für die Straßenbeleuchtung sind Leistungen von 50 bis 150 Watt üblich. Diese Lichtquellen werden meist mit Natriumamalgam betrieben, das durch Zugabe von bestimmten Edelgasen (meist Xenon) einen höheren Blau-Anteil und damit eine bessere Farbwiedergabe erzielt.

Natriumdampflampen sind Lichtquellen, die auf beschriebener Gasentladung beruhen, wie sie für Metall dampflampen typisch ist. Die Natriumdampflampen benötigen keinen fluoreszierenden Leuchtstoff, weil die Gasentladung selbst sichtbares Licht erzeugt.

Natriumdampf-Niederdrucklampe (engl. = low pressure sodium, LPS) gehören mit bis zu 200 lm/W zu den effizientesten elektrischen Lichtquellen. Sie sind in ihrer Effizienz mit LED vergleichbar. Allerdings strahlen LPS monochromatisches Licht um die 589 nm Wellenlänge aus und benötigen ein deutlich größeres Entladungsgefäß als Natrium-Hochdrucklampen. Meist ist dieses Entladungsgefäß als U-förmiges Rohr in einem Glaskolben verbaut.

Neonröhren sind Gasentladungsröhren, zwischen deren Elektroden durch Anlegen einer hohen Spannung eine Glimmentladung zündet. Die Emission wird durch Sekundärelektronenemission von im Kathodenfall beschleunigten positiven Ionen erzeugt, die auf die Kathode prallen. Rote Neonröhren waren die ersten Leuchtröhren, die Neon als Füllgas enthielten. Andere Farben werden durch unterschiedliche Gase oder eine Leuchtstoff-Innenbeschichtung wie bei Leuchtstofflampen erreicht. Die Kathode dieser Lampen ist unbeheizt, deshalb werden sie auch als Kaltkathoden-Fluoreszenzlampen (engl. = cold cathode fluorescent lamp) kurz CCFL bezeichnet. Die Gas Mischung der Fluoreszenzlampen

besteht aus Argon und Quecksilber und emittiert vorrangig ultraviolettes Licht, das durch den Leuchtstoff in die gewünschte Lichtfarbe umgewandelt wird. Häufig finden Leuchtröhren bei Leuchtreklamen Anwendung. Sie werden aber derzeit zunehmend durch LED abgelöst.

Quecksilberdampflampen haben mit 50 lm/W eine sehr geringe Effizienz. Obwohl die Quecksilberdampfleuchte seit 2015 aufgrund der Effizienzanforderungen der Ökodesignrichtlinie vom Markt genommen wurde, ist sie noch in vielen Kommunen installiert. Die Lampen sind mit Quecksilberdampf und einem Edelgas, meist Argon, gefüllt. Das Edelgas erleichtert die Zündung. Frühere Lampen erzeugten ein blaugrünes Licht, später wurde der im Quecksilberspektrum fehlende Rotanteil durch einen Leuchtstoff auf der Innenseite des Außenkolbens erzeugt und auf diese Weise der Farbwiedergabeindex erhöht.

Spektraler G-Index ist eine Variable, die entwickelt wurde, um die Menge an kurzwelligem Licht in einer sichtbaren Lichtquelle im Verhältnis zu ihrer Gesamtemission zu quantifizieren – ein Maß für die Menge an blauem Licht pro Lumen. Je kleiner der G-Index, desto mehr blaues, violettes oder ultraviolettes Licht emittiert eine Lampe im Verhältnis zu ihrer Gesamtleistung.

ULR / ULOR (engl. upward light ratio / upper light output ratio) ist eine Maßeinheit, die in Prozent den Anteil der Abstrahlung einer Leuchte in den oberen Halbraum angibt.

Wirkungsgrad gibt das Verhältnis zwischen der elektrischen Leistungsaufnahme und des abgegebenen Lichtstroms in Lumen an. Thermisch abgestrahlte Energie sowie Energieverluste durch Vorschaltgeräte oder optische Komponenten gehen zu Lasten des Wirkungsgrades.

Literaturverzeichnis

- AUBÉ, M., ROBY, J. & KOCIFAJ, M. (2013). Evaluating potential spectral impacts of various artificial lights on melatonin suppression, photosynthesis, and star visibility. *PLoS ONE*, 8(7), e67798. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067798>
- AUBRECHT, T. G., WEIL, Z. M. & NELSON, R. J. (2014). Dim light at night interferes with the development of the short-day phenotype and impairs cell-mediated immunity in Siberian hamsters (*Phodopus sungorus*). *Journal of Experimental Zoology*, 321(8), 450-456. <https://doi.org/10.1002/jez.1877>
- AZAM, C., KERBIRIOU, C., VERNET, A., JULIEN, J. F., BAS, Y., PLICHARD, L., ... LE VIOL, I. (2015). Is part-night lighting an effective measure to limit the impacts of artificial lighting on bats? *Global Change Biology*, 21(12), 4333-4341. <https://doi.org/10.1111/gcb.13036>
- AZAM, C., LE VIOL, I., JULIEN, J.-F., BAS, Y. & KERBIRIOU, C. (2016). Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program. *Landscape Ecology*, 31(10), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0417-3>
- BAILES, H. J. & LUCAS, R. J. (2013). Human melanopsin forms a pigment maximally sensitive to blue light ($\lambda_{\max} \approx 479$ nm) supporting activation of G(q/11) and G(i/o) signalling cascades. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280, 20122987. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.2987>
- BAKER, B. J. & RICHARDSON, J. M. L. (2006). The effect of artificial light on male breeding-season behaviour in green frogs, *Rana clamitans melanota*. *Canadian Journal of Zoology*, 84(10), 1528-1532. <https://doi.org/10.1139/z06-142>
- BATTIS, U., KRAUTZBERGER, M., LÖHR, R.-P. (HRSG.) (2016). *Baugesetzbuch – Kommentar*, 13. Aufl. (zit. Bearbeiter, in: Battis, U. /, M. & /R.-P.)
- BEDROSIAN, T. A., VAUGHN, C. A., GALAN, A., DAYE, G., WEIL, Z. M. & NELSON, R. J. (2013). Nocturnal light exposure impairs affective responses in a wavelength-dependent manner. *Journal of Neuroscience*, 33(32), 13081-13087. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5734-12.2013>
- BENNIE, J., DAVIES, T. W., CRUSE, D., BELL, F. & GASTON, K. J. (2018). Artificial light at night alters grassland vegetation species composition and phenology. *Journal of Applied Ecology*, 55(1), 442-450. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12927>
- BENNIE, J., DAVIES, T. W., CRUSE, D., BELL, F. & GASTON, K. J. (2018). Artificial light at night alters grassland vegetation species composition and phenology. *Journal of Applied Ecology*, 55(1), 442-450. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12927>
- BICK, U. & WULFERT, K. (2017). Der Artenschutz in der Vorhabenzulassung aus rechtlicher und naturschutzfachlicher Sicht, *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht (NVwZ)* 2017, 346-355.
- BLASK, D. E., DAUCHY, R. T., DAUCHY, E. M., MAO, L., HILL, S. M., GREENE, M. W., ... DAVIDSON, L. (2014). Light exposure at night disrupts host/cancer circadian regulatory dynamics: Impact on the Warburg effect, lipid signaling and tumor growth prevention. *PLoS ONE*, 9(8), e102776. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102776>
- BONMATI-CARRION, M. A., ARGUELLES-PRIETO, R., MARTINEZ-MADRID, M. J., REITER, R., HARDELAND, R., ROL, M. A. & MADRID, J. A. (2014). Protecting the melatonin rhythm through circadian healthy light exposure. *International Journal of Molecular Sciences*, 15(12), 23448-500. <https://doi.org/10.3390/ijms151223448>

- BRAINARD, G. C., HANIFIN, J. P., GREESON, J. M., BYRNE, B., GLICKMAN, G., GERNER, E. & ROLLAG, M. D. (2001). Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *Journal of Neuroscience*, 21(16), 6405-6412. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.21-16-06405.2001>
- BRÜNING, A. & HÖLKER, F. (2015). Künstliches Licht an Gewässern – Auswirkungen und Lösungsansätze. *Fauna Focus*, 24, 1-12.
- BUCHANAN, B. W. (1998). Low-illumination prey detection by Squirrel Treefrogs. *Journal of Herpetology*, 32(2), 270-274. <https://doi.org/10.2307/1565308>
- BUCHANAN, B. W. (2006). Observed and potential effects of artificial night lighting on anuran amphibians. In C. RICH & T. LONGCORE (HRSG.), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* (pp. 192-220). Washington: Island Press.
- CABRERA-CRUZ, S. A., SMOLINSKY, J. A. & BULER, J. J. (2018). Light pollution is greatest within migration passage areas for nocturnally-migrating birds around the world. *Scientific Reports*, 8(1), 4-11. <http://doi.org/10.1038/s41598-018-21577-6>
- CATHEY, H. M. & CAMPBELL, L. E. (1975). Security lighting and its impact on the landscape. *Journal of Arboriculture*, 1(1), 181-187.
- CHANEY, W. R. (2002). Does Night Lighting Harm Trees? *Forestry and Natural Resources*, FAQ 17, 1-4. Retrieved from <http://www.ces.purdue.edu/extmedia/FNR/FNR-FAQ-17.pdf>
- CIE 150 (2017). Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations, 2nd edition. DOI: 10.25039/TR.150.2017.
- COUZINET, D. (2007). Die Zulässigkeit von Immissionen im anlagenbezogenen Immissionsschutzrecht – Verfassungsrechtliche Vorgaben an das vom Einzelnen hinzunehmende Immissionsmaß und einfach-rechtliche Ausgestaltung im Bundes-Immissionsschutzgesetz. Diss., Universität Tübingen (zit. Couzinet, Zulässigkeit von Immissionen).
- DA SILVA, A. & KEMPENAERS, B. (2017). Singing from North to South: latitudinal variation in timing of dawn singing under natural and artificial light conditions. *Journal of Animal Ecology*, 86(6), 1286-1297. <http://doi.org/10.1111/1365-2656.12739>
- DACKE, M., NILSSON, D., SCHOLTZ, C. H., BYRNE, M. & WARRANT, E. J. (2003). Insect orientation to polarized moonlight. *Nature*, 424(6944), 33
- DAUCHY, R. T., WREN, M. A., DAUCHY, E. M., HOFFMAN, A. E., HANIFIN, J. P., WARFIELD, B., ... BLASK, D. E. (2015). The influence of red light exposure at night on circadian metabolism and physiology in Sprague-Dawley rats. *Journal of the American Association for Laboratory Animal Science*, 54(1), 40-50. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25651090>.
- DAUCHY, R. T., XIANG, S., MAO, L., BRIMER, S., WREN, M. A., YUAN, L., ... HILL, S. M. (2014). Circadian and melatonin disruption by exposure to light at night drives intrinsic resistance to tamoxifen therapy in breast cancer. *Cancer Research*, 74(15), 4099-4110. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-13-3156>
- DEGENRING, F. (2015). On Behalf of the Dark? Functionalizations of Light Pollution in Fiction. *Dark Nights, Bright Lights: Night, Darkness, and Illumination in Literature*, 50, 201.
- DESOUHANT, E., GOMES, E., MONDY, N. & AMAT, I. (2019). Mechanistic, ecological, and evolutionary consequences of artificial light at night for insects: review and prospective. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 167(1), 37-58. <https://doi.org/10.1111/eea.12754>

- DOMINONI, D. M. & PARTECKE, J. (2015). Does light pollution alter daylength? A test using light loggers on free-ranging European blackbirds (*Turdus merula*). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 370(1667), 20140118. <http://doi.org/10.1098/rstb.2014.0118>
- DONATELLO, S., RODRÍGUEZ, R., QUINTERO, M. G. C., JRC, O. W., VAN TICHELEN, P., VAN, V. & HOOF, T. G. V. (2019). Revision of the EU Green Public Procurement Criteria for Road Lighting and traffic signals. Publications Office of the European Union, EUR 29631 EN, doi:10.2760/372897, JRC115406.
- DONNERS, M., GRUNSVEN, R. H. A. VAN, LONGCORE, T., GROENENDIJK, D., VAN, F., BIKKER, J. W. & VEENENDAAL, E. (2018). Colors of attraction: Modeling insect flight to light behavior. *Journal of Experimental Zoology A*, 329(8-9), 434-440. <https://doi.org/10.1002/jez.2188>
- DOUGLAS, R. H. & JEFFERY, G. (2014). The spectral transmission of ocular media suggests ultraviolet sensitivity is widespread among mammals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1780), 20132995–20132995. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2995>
- DURISCOE, D. M., LUGINBUHL, C. B. & ELVIDGE, C. D. (2014). The relation of outdoor lighting characteristics to sky glow from distant cities. *Lighting Research and Technology*, 46, 35-49. <https://doi.org/10.1177/1477153513506729>
- DUTTA, H. (2018). Insights into the impacts of three current environmental problems on amphibians. *European Journal of Ecology*, 4, 15-27.
- DWYER, R. G., BEARHOP, S., CAMPBELL, H. A. & BRYANT, D. M. (2013). Shedding light on light: benefits of anthropogenic illumination to a nocturnally foraging shorebird. *Journal of Animal Ecology*, 82(2), 478-485. <http://doi.org/10.1111/1365-2656.12012>
- EISENBEIS, G. (2006). Artificial night lighting and insects: attraction of insects to street-lamps in a rural setting in Germany. IN C. RICH & T. LONGCORE (HRSG.), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* (pp. 191-198). Island Press.
- EISENBEIS, G. & HASSEL, F. (2000). Zur Anziehung nachtaktiver Insekten durch Straßenlaternen—eine Studie kommunaler Beleuchtungseinrichtungen in der Agrarlandschaft Rheinhessens. *Natur und Landschaft*, 4, 145-156.
- EKARDT, F. & HENNIG, B. (2013). Chancen und Grenzen von naturschutzrechtlichen Eingriffsregelungen und Kompensationen. *Natur und Recht*, 35(10), 694-703.
- ENEZI, J. AL, REVELL, V., BROWN, T., WYNNE, J., SCHLANGEN, L. & LUCAS, R. (2011). A “melanopic” spectral efficiency function predicts the sensitivity of melanopsin photoreceptors to polychromatic lights. *Journal of Biological Rhythms*, 26(4), 314-323. <https://doi.org/10.1177/0748730411409719>
- ERB, M. (2013). Untersuchungsumfang und Ermittlungstiefe in Umweltprüfungen: eine Untersuchung im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfung, Strategischer Umweltprüfung und FFH-Verträglichkeitsprüfung unter besonderer Berücksichtigung des Konfliktfelds Windenergie-Vogelschutz. Diss. Universität Trier. Erich Schmidt Verlag.
- FALCHI, F., CINZANO, P., ELVIDGE, C. D., KEITH, D. M. & HAIM, A. (2011). Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2714-2722. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.029>
- FFRENCH-CONSTANT, R. H., SOMERS-YEATES, R., BENNIE, J., ECONOMOU, T., HODGSON, D., SPALDING, A. & MCGREGOR, P. K. (2016). Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1833), 20160813.

- FONTAINE, C., DAJOZ, I., MERIGUET, J. & LOREAU, M. (2006). Functional diversity of plant-pollinator interaction webs enhances the persistence of plant communities. *PLoS Biology*, 4(1), 0129-0135. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040001>
- FOTIOS, S. & GOODMAN, T. (2012). Proposed UK guidance for lighting in residential roads. *Lighting Research and Technology* 44(1), 69-83. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1477153511432678>
- FOTIOS, S. & GIBBONS, R. (2018). Road lighting research for drivers and pedestrians: The basis of luminance and illuminance recommendations. *Lighting Research and Technology*, 50(1), 154-186. <https://doi.org/10.1177/1477153517739055>
- FRENZ, W. & MÜGGENBORG, H.-J. (HRSG.) (2016). Bundesnaturschutzgesetz – Kommentar. Erich Schmidt Verlag, 2. Aufl. (zit. Bearbeiter, in: Frenz/Müggenborg (Hrsg.), BNatSchG).
- FÜHR, M. (HRSG.). (2016). Gemeinschaftskommentar Bundes-Immissionsschutzgesetz. Carl Heymanns Verlag. (zit. Bearbeiter, in: Führ (Hrsg.), GK-BlmSchG).
- GALADÍ-ENRÍQUEZ, D. (2018). Beyond CCT: The spectral index system as a tool for the objective, quantitative characterization of lamps. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 206, 399-408. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.12.011>
- GARCIA-SAEZ, A., SÁNCHEZ DE MIGUEL, A., ESPINOSA, A., VALENTIN, A., ARAGONÉS, N., LLORCA, J., ... & TARDÓN, A. (2018). Evaluating the association between artificial light-at-night exposure and breast and prostate cancer risk in Spain (MCC-Spain study). *Environmental Health Perspectives*, 126(4). <http://doi.org/10.1289/EHP1837>
- GASSNER, E. & HEUGEL, M. (2010). Das neue Naturschutzrecht. Beck Verlag.
- GASTON, K. J., DUFFY, J. P. & BENNIE, J. (2015). Quantifying the erosion of natural darkness in the global protected area system. *Conservation Biology*, 29(4), 1132-1141. <https://doi.org/10.1111/cobi.12462>
- GASTON, K. J. (2018). Lighting up the nighttime. *Science*, 362(6416), 744-746. <http://doi.org/10.1126/science.aau8226>
- GEFFEN VAN, K. G., ECK VAN, E., DE BOER, R. A., GRUNSVEN VAN, R. H. A., SALIS, L., BERENDSE, F. & VEENENDAAL, E. M. (2015). Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth. *Insect Conservation and Diversity*, 8(3), 282-287. <http://doi.org/10.1111/icad.12116>
- GREGER, R. & ZWICKEL, M. (2014). Haftungsrecht des Straßenverkehrs: Handbuch und Kommentar. Walter de Gruyter, 5. Aufl.
- GRUBISIC, M., SINGER, G., BRUNO, M. C., VAN GRUNSVEN, R. H. A., MANFRIN, A., MONAGHAN, M. T. & HÖLKER, F. (2017). Artificial light at night decreases biomass and alters community composition of benthic primary producers in a sub-alpine stream. *Limnology and Oceanography*, 62(6), 2799-2810. <https://doi.org/10.1002/lno.10607>
- GRUBISIC, M., GRUNSVEN VAN, R. H. A., KYBA, C. C. M., MANFRIN, A. & HÖLKER, F. (2018A). Insect declines and agroecosystems: does light pollution matter? *Annals of applied Biology*, 173(2), 180-189. <https://doi.org/10.1111/aab.12440>
- GRUBISIC, M., SINGER, G., BRUNO, M. C., VAN GRUNSVEN, R. H. A., MANFRIN, A., MONAGHAN, M. T. & HÖLKER, F. (2018B). A pigment composition analysis reveals community changes in pre-established stream periphyton under low-level artificial light at night. *Limnologia*, 69, 55-58. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2017.10.004>

- GRUNSVEN VAN, R. H. A., DONNERS, M., BOEKEE, K., TICHELAAR, I., GEFFEN VAN, K. G., GROENENDIJK, D., ... VEENENDAAL, E. M. (2014). Spectral composition of light sources and insect phototaxis, with an evaluation of existing spectral response models. *Journal of Insect Conservation*, 18(2), 225-231. <https://doi.org/10.1007/s10841-014-9633-9>
- GRUNSVEN VAN, R. H. A., CREEMERS, R., JOOSTEN, K., DONNERS, M. & VEENENDAAL, E. M. (2017). Behaviour of migrating toads under artificial lights differs from other phases of their life cycle. *Amphibia-Reptilia*, 38(1), 49-55. <https://doi.org/10.1163/15685381-00003081>
- GRUNSVEN VAN, R. H. A., JÄHNICHEN, D., GRUBISIC, M. & HÖLKER, F. (2018). Slugs (Arionidae) benefit from nocturnal artificial illumination. *Journal of Experimental Zoology A*, 329(8-9), 429-433. <https://doi.org/10.1002/jez.2170>
- GUETTÉ, A., GODET, L., JUIGNER, M. & ROBIN, M. (2018). Worldwide increase in artificial light at night around protected areas and within biodiversity hotspots. *Biological Conservation*, 223, 97-103. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.04.018>
- HADJIKHANI, N. & TOOTELL, R. B. (2000). Projection of rods and cones within human visual cortex. *Human Brain Mapping*, 9(1), 55-63. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0193\(2000\)9:1%3C55::AID-HBM6%3E3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0193(2000)9:1%3C55::AID-HBM6%3E3.0.CO;2-U)
- HALLMANN, C. A., SORG, M., JONGEJANS, E., SIEPEL, H., HOFLAND, N., SCHWAN, H., ... DE KROON, H. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *Plos ONE*, 12(10), e0185809. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>
- HÄNEL, A., POSCH, T., RIBAS, S. J., AUBÉ, M., DURISCOE, D., JECHOW, A., ... & SPOELSTRA, H. (2018). Measuring night sky brightness: methods and challenges. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 205, 278-290.
- HÖLKER, F., MOSS, T., GRIEFAHN, B., KLOAS, W. & VOIGT, C. C. (2010A). The dark side of light: a transdisciplinary research agenda for light. *Ecology and Society*, 15(4), 13.
- HÖLKER, F., WOLTER, C., PERKIN, E. K. & TOCKNER, K. (2010B). Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology and Evolution*, 25(12), 681-682. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007>
- HÖLKER, F. & TOCKNER, K. (2013). Der Einfluss von künstlichem Licht in der Nacht auf Gewässerökosysteme. IN T. POSCH, F. HÖLKER, T. UHLMANN & A. FREYHOFF (HRSG.), *Das Ende der Nacht* (pp. 174-189). Weinheim: Wiley-VCH.
- HÖLKER, F., WURZBACHER, C., WEIßENBORN, C., MONAGHAN, M. T., HOLZHAUER, S. I. J. & PREMKE, K. (2015). Microbial diversity and community respiration in freshwater sediments influenced by artificial light at night. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 370, 20140130. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0130>
- HÖLKER, F., JECHOW, A., SCHROER, S. & GESSNER, M. O. (2018). Nächtliches Licht und Lichtverschmutzung in und um Gewässer. In M. HUPFER, W. CALMANO, H. FISCHER & H. KLAPPER (HRSG.), *Handbuch Angewandte Limnologie: Grundlagen - Gewässerbelastung - Restaurierung - Aquatische Ökotoxikologie - Bewertung - Gewässerschutz*. Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527678488>
- HOQUE, M. (1990). An analysis of fatal bicycle accidents in Victoria (Australia) with a special reference to nighttime accidents. *Accident Analysis and Prevention*, 22(1), 1-11.
- HUGGINS, B. & SCHLACKE, S. (2019). *Schutz von Arten vor Glas und Licht: Rechtliche Anforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten*. Springer Berlin.

- HÜMER, P., KÜHLTREIBER, H. & TARMANN, G. (2011). Anlockwirkung moderner Leuchtmittel auf nachtaktive Insekten einer Feldstudie in Tirol (Österreich). In Wissenschaftliches Jahrbuch der Tiroler Landesmuseen 4, 110-135.
- IKENO, T., WEIL, Z. M. & NELSON, R. J. (2014). Dim light at night disrupts the short-day response in Siberian hamsters. *General and Comparative Endocrinology*, 197, 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2013.12.005>
- ISHIBASHI, Y., HONRYO, T., SAIDA, K., HAGIWARA, A., MIYASHITA, S., SAWADA, Y., ... KURATA, M. (2009). Artificial lighting prevents high night-time mortality of juvenile Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis*, caused by poor scotopic vision. *Aquaculture*, 293(3-4), 157-163. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.04.029>
- JARASS, H. D. (HRSG.) (2017). Bundes-Immissionsschutzgesetz – Kommentar. Beck Verlag, 12. Aufl. (zit. Bearbeiter, BImSchG).
- JARASS, H. D. & KMENT, M. (HRSG.) (2017). Baugesetzbuch. Beck Verlag, 2. Aufl. (zit. Bearbeiter, BauGB).
- JECHOW, A., HÖLKER, F., KOLLÁTH, Z., GESSNER, M. O., KYBA, C. C. M. (2016). Evaluating the summer night sky brightness at a research field site on Lake Stechlin in northeastern Germany. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 181, 24-32. <https://arxiv.org/abs/1602.04537>
- JECHOW, A., KOLLÁTH, Z., RIBAS, S. J., SPOELSTRA, H., HÖLKER, F. & KYBA, C. C. M. (2017). Imaging and mapping the impact of clouds on skyglow with all-sky photometry. *Scientific Reports*, 7(1), 6741. <https://www.nature.com/articles/s41598-017-06998-z>
- JECHOW, A., RIBAS, S. J., DOMINGO, R. C., HÖLKER, F., KOLLÁTH, Z., KYBA, C. C. M. (2018). Tracking the dynamics of skyglow with differential photometry using a digital camera with fisheye lens. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 209, 212-223. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.01.032>
- JECHOW, A., KYBA, C. C. M. & HÖLKER, F. (2019). Beyond all-sky: assessing ecological light pollution using multi-spectral full-sphere fisheye lens imaging. *Journal of Imaging* 5(4), 46. <https://doi.org/10.3390/jimaging5040046>
- JIN, H., JIN, S., CHEN, L., CEN, S. & YUAN, K. (2015). Research on the lighting performance of LED street lights with different color temperatures. *IEEE Photonics Journal*, 7(6), 1-9. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2497578>
- JONG DE, M., JENINGA, L., OUYANG, J. Q., OERS VAN, K., SPOELSTRA, K. & VISSER, M. E. (2016). Dose-dependent responses of avian daily rhythms to artificial light at night. *Physiology & Behavior*, 155, 172-179. <http://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.12.012>
- KEMP, P. S. & WILLIAMS, J. G. (2009). Illumination influences the ability of migrating juvenile salmonids to pass a submerged experimental weir. *Ecology of Freshwater Fish*, 18(2), 297-304. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2008.00347.x>
- KLOEPFER, M. (2016). Umweltrecht, Beck Verlag, 4. Aufl.
- KNOP, E., ZOLLER, L., RYSER, R., GERPE, C., HÖRLER, M. & FONTAINE, C. (2017). Artificial light at night as a new threat to pollination. *Nature*, 548(7666), 206-209. <https://doi.org/10.1038/nature23288>
- KODAL, KURT (HRSG.). (2010). Straßenrecht – Systematische Darstellung des Rechts der öffentlichen Straßen, Wege und Plätze in der Bundesrepublik Deutschland, 7. Aufl. (zit. Bearbeiter, in: Kodal (Hrsg.), Straßenrecht).

- KOO, Y. S., SONG, J.-Y., JOO, E.-Y., LEE, H.-J., LEE, E., LEE, S. & JUNG, K.-Y. (2016). Outdoor artificial light at night, obesity, and sleep health: Cross-sectional analysis in the KoGES study. *Chronobiology International*, 33(3), 301-314. <https://doi.org/10.3109/07420528.2016.1143480>
- KRONFELD-SCHOR, N., DOMINONI, D., DE LA IGLESIA, H., LEVY, O., HERZOG, E. D., DAYAN, T. & HELFRICH-FORSTER, C. (2013). Chronobiology by moonlight. *Proceedings of the Royal Society B*, 280(1765), 20123088. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.3088>
- KUECHLY, H. U., KYBA, C. C. M., RUHTZ, T., LINDEMANN, C., WOLTER, C., FISCHER, J. & HÖLKER, F. (2012). Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in Berlin, Germany. *Remote Sensing of Environment*, 126, 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.08.008>
- KURVERS, R. H. J. M., DRÄGESTEIN, J., HÖLKER, F., JECHOW, A., KRAUSE, J. & BIERBACH, D. (2018). Artificial Light at Night Affects Emergence from a Refuge and Space Use in Guppies. *Scientific Reports*, 8(1), 14131.
- KÜSTER, I. (2017). Verbreitung und Verwendung von Lichtmasterplänen in Großstädten im deutschsprachigen Raum (Vol. 7). Universitätsverlag der TU Berlin.
- KWAK, M. J., JE, S. M., CHENG, H. C., SEO, S. M., PARK, J. H., BAEK, S. G., ... WOO, S. Y. (2018). Night light-adaptation strategies for photosynthetic apparatus in yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera* L.) exposed to artificial night lighting. *Forests*, 9(2), 74. <https://doi.org/10.3390/f9020074>
- KYBA, C. C. M. & HÖLKER, F. (2013). Do artificially illuminated skies affect biodiversity in nocturnal landscapes? *Landscape Ecology*, 28(9), 1637-1640. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9936-3>
- KYBA, C. C. M., HÄNEL, A., ... & HÖLKER, F. (2014). Redefining efficiency for outdoor lighting. *Energy & Environmental Science*, 7(6), 1806-1809. <http://doi.org/10.1039/C4EE00566J>
- KYBA, C. C. M., TONG, K. P., BENNIE, J., BIRRIEL, I., BIRRIEL, J. J., COOL, A., ... GASTON, K. J. (2015). Worldwide variations in artificial skyglow. *Scientific Reports*, 5, 8409. <https://doi.org/10.1038/srep08409>
- KYBA, C. C. M., KUESTER, T. & KUECHLY, H. U. (2017A). Changes in outdoor lighting in Germany from 2012-2016 as observed by VIIRS DNB. *International Journal of Sustainable Lighting*, 19(2), 112-123.
- KYBA, C. C. M., KUESTER, T., SÁNCHEZ DE MIGUEL, A., BAUGH, K., JECHOW, A., HÖLKER, F., ... GASTON, K. J. (2017B). Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. *Science Advances*, 3(11), 1-9.
- KYBA, C. C. M., MOHAR, A. & POSCH, T. (2017C). How bright is moonlight? *Astronomy & Geophysics*, 58(1), 31-32.
- LACOEUILHE, A., MACHON, N., JULIEN, J. F., LE BOCQ, A. & KERBIRIOU, C. (2014). The influence of low intensities of light pollution on bat communities in a semi-natural context. *PLoS ONE*, 9(10), e103042. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103042>
- LANDMANN VON, R. & ROHMER, G. (Hrsg.) (2017). *Umweltrecht – Kommentar*, 84. Erg.-Lfg., Stand: Juli 2017 (zit. Bearbeiter, in: Landmann/Rohmer (Hrsg.), *Umweltrecht*).
- LANG, D. (2013). Neue Systemlösungen und Beleuchtungsstrategien im Außenraum. In M. HELD, F. HÖLKER & B. JESSEL (HRSG.), *BfN Skripten* 336 (pp. 91-94).
- LE TALLEC, T., THÉRY, M. & PERRET, M. (2015). Effects of light pollution on seasonal estrus and daily rhythms in a nocturnal primate. *Journal of Mammalogy*, 96(2), 438-445. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyv047>

- LE TALLEC, T., THÉRY, M. & PERRET, M. (2016). Melatonin concentrations and timing of seasonal reproduction in male mouse lemurs (*Microcebus murinus*) exposed to light pollution. *Journal of Mammalogy*, 97(3), 753-760. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyw003>
- LEVEY, D. J. (2005). Effects of landscape corridors on seed dispersal by birds. *Science*, 309(5731), 146-148. <https://doi.org/10.1126/science.1111479>
- LEWANZIK, D. & VOIGT, C. C. (2014). Artificial light puts ecosystem services of frugivorous bats at risk. *Journal of Applied Ecology*, 51(2), 388-394. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12206>
- LITG (2011). Publikation 12.3: Empfehlungen für die Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen. Berlin: Deutsche Lichttechnische Gesellschaft.
- LONGCORE, T., HERF, L., RODRÍGUEZ, A., WITHERINGTON, B., PENNIMAN, J. F. & HERF, M. (2018). Rapid assessment of lamp spectrum to quantify ecological effects of light at night. *Journal of Experimental Zoology A*, 329(8-9), 511-521. <https://doi.org/10.1002/jez.2184>
- LOUIS, H. W. (2009). Die Zugriffsverbote des § 42 Abs. 1 BNatSchG im Zulassungs- und Bauleitplanverfahren unter Berücksichtigung der Entscheidung des BVerwG zur Ortsumgehung Bad Oeynhausen (in diesem Heft). *Natur und Recht*, 31(2), 91-100.
- LUGINBUHL, C. B., BOLEY, P. A. & DAVIS, D. R. (2013). The impact of light source spectral power distribution on sky glow. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1-6. <http://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.12.004>
- LÜTKES, S. & EWER, W. (HRSG.). (2018). Bundesnaturschutzgesetz – Kommentar. Beck-Verlag, 2. Aufl. 2018 (zit. Bearbeiter, in: Lütkes/Ewer (Hrsg.), BNatSchG).
- MACGREGOR, C. J., POCOCK, M. J. O., FOX, R. & EVANS, D. M. (2015). Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: a review. *Ecological Entomology*, 40(3), 187-198. <https://doi.org/10.1111/een.12174>
- MANFRIN, A., LEHMANN, D., GRUNSVEN, ROY H. A. VAN LARSEN, S., SYVÄRANTA, J., WHARTON, G., VOIGT, C. C., ... HÖLKER, F. (2018). Dietary changes in predators and scavengers in a nocturnally illuminated riparian ecosystem. *Oikos*, 127(7), 960-969. <https://doi.org/10.1111/oik.02986>
- MANFRIN, A., SINGER, G., LARSEN, S., WEIß, N., GRUNSVEN VAN, R. H. A., WEIß, N.-S., ... HÖLKER, F. (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. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00061>
- MARCHANT, P. R. (2010). Have new street lighting schemes reduced crime in London. *Radical Statistics*, 104, 32-42. http://www.radstats.org.uk/no104/Marchant2_104.pdf
- MARCHANT, P. R. (2017). Why lighting claims might well be wrong. *International Journal of Sustainable Lighting*, 19(1), 69-74. <https://doi.org/10.26607/ijsl.v19i1.71>
- MATZKE, E. B. (1936). The effect of street lights in delaying leaf-fall in certain trees. *American Journal of Botany*, 23(6), 446-452. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2436035>
- MCCLUNG, C. R. (2006). Plant circadian rhythms. *The Plant Cell*, 18(4), 792-803. <https://doi.org/10.1105/tpc.106.040980>
- MCMAHON, T. A., ROHR, J. R. & BERNAL, X. E. (2017). Light and noise pollution interact to disrupt interspecific interactions. *Ecology*, 98(5), 1290-1299.

- MEIER, J. M. (2019). Contentious Light: An Analytical Framework for Lighting Conflicts. *International Journal of Sustainable Lighting*, 20(2), 62-77. <https://doi.org/10.26607/ijsl.v20i2.89>
- MILES, W., MONEY, S., LUXMOORE, R. & FURNESS, R. W. (2010). Effects of artificial lights and moonlight on petrels at St Kilda. *Bird Study*, 57(2), 244-251. <http://doi.org/10.1080/00063651003605064>
- MILLER, M. W. (2006). Apparent effects of light pollution on singing behavior of American robins. *The Condor*, 108(1), 130-139. <http://doi.org/10.2307/4123202>
- MINNAAR, C., BOYLES, J. G., MINNAAR, I. A., SOLE, C. L. & MCKECHNIE, A. E. (2015). Stacking the odds: Light pollution may shift the balance in an ancient predator-prey arms race. *Journal of Applied Ecology*, 52(2), 522-531. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12381>
- NAVARRO-BARRANCO, C. & HUGHES, L. E. (2015). Effects of light pollution on the emergent fauna of shallow marine ecosystems: Amphipods as a case study. *Marine Pollution Bulletin*. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.02.023>
- NITSCHKE, S., CORTLEVEN, A., IVEN, T., FEUSSNER, I., HAVAUX, M., SCHMÜLLING, T., ... SCHMÜLLING, T. (2016). Circadian Stress Regimes Affect the Circadian Clock and Cause Jasmonic Acid-Dependent Cell Death in Cytokinin-Deficient Arabidopsis Plants. *The Plant Cell*, 28(7), tpc.00016.2016. <https://doi.org/10.1105/tpc.16.00016>
- NORDT, A. & KLENKE, R. (2013). Sleepless in Town – Drivers of the Temporal Shift in Dawn Song in Urban European Blackbirds. *PLoS ONE*, 8(8), e714716. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0071476>
- OGDEN, L. J. E. (1996). Collision Course: The Hazards of Lighted Structures and Windows to Migrating Birds Collision Course: Retrieved from <http://digitalcommons.unl.edu/flap/3>
- OHAYON, M. & MILESI, C. (2016). Sleep deprivation/insomnia and exposure to street lights in the American general population (S13.004). *Neurology*, 86(16 Supplement). Retrieved from http://n.neurology.org/content/86/16_Supplement/S13.004.abstract
- OOSTER, VAN 'T A., HENTEN, VAN E. J., JANSSEN, E. G. O. N., & BONGAERTS, H. R. M. (2008). Use of supplementary lighting top screens and effects on greenhouse climate and return on investment. *Acta Horticulturae*, 801, 645-652. Retrieved from <http://www.narcis.nl/publication/RecordID/oai%3Alibrary.wur.nl%3Awurpubs%2F374265>
- OUYANG, J. Q., DE JONG, M., GRUNSVEN VAN, R. H. A., MATSON, K. D., HAUSSMANN, M. F., MEERLO, P., ... SPOELSTRA, K. (2017). Restless roosts: Light pollution affects behavior, sleep, and physiology in a free-living songbird. *Global Change Biology*, 23(11), 4987-4994. <https://doi.org/10.1111/gcb.13756>
- PEÑA-GARCÍA, A., HURTADO, A. & AGUILAR-LUZÓN, M. C. (2015). Impact of public lighting on pedestrians' perception of safety and well-being. *Safety Science*, 78, 142-148.
- PERKIN, E. K., HÖLKER, F., RICHARDSON, J. S., SADLER, J. P., WOLTER, C. & TOKNER, K. (2011). The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems: questions, challenges and perspectives. *Ecosphere*, 2(11), 1-16. <https://doi.org/10.1890/ES11-00241.1>
- POLAK, T., KORINE, C., YAIR, S. & HOLDERIED, M. W. (2011). Differential effects of artificial lighting on flight and foraging behaviour of two sympatric bat species in a desert. *Journal of Zoology*, 285(1), 21-27. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2011.00808.x>

- POSCH, T. (2013). Besser beleuchten – Intensität, spektrale Zusammensetzung und Timing der Beleuchtung. In: M. HELD, F. HÖLKER, B. JESSEL (HRSG.). Schutz der Nacht – Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft, BfN-Skripten 336, S. 43-46, Bonn - Bad Godesberg
- POSCH, T. (2013). Besser beleuchten – Intensität, spektrale Zusammensetzung und Timing der Beleuchtung. In: M. HELD, F. HÖLKER, B. JESSEL (HRSG.). Schutz der Nacht – Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft, BfN-Skripten 336, S. 43-46, Bonn - Bad Godesberg
- PRETZSCH, H., BIBER, P., UHL, E., DAHLHAUSEN, J., SCHÜTZE, G., PERKINS, D., ... LEFER, B. (2017). Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. *Scientific Reports*, 7(1), 15403. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14831-w>
- RECK, H., HÄNEL, K., STREIN, M., GEORGII, B., HENNEBERG, M., PETERS-OSTENBERG, E. & BÖTTCHER, M. (2017). Grünbrücken, Faunatunnel und Tierdurchlässe - Anforderungen an Querungshilfen. In BfN Skripten 465. Bonn.
- RICH, C. & LONGCORE, T. (HRSG.). (2006). Ecological Consequences of Artificial Night Lighting. Washington, Covelo, London: Island Press.
- RINGWALD, R. & ENGEL, C. (2013). Straßenbeleuchtungspflicht. In M. RIEDEL, R. RINGWALD & H. RÖNITZSCH (HRSG.). Praxishandbuch Öffentliche Beleuchtung: Wirtschaftlichkeit, Recht, Technik. Beuth Verlag. 77-90 (zit. Ringwald/Engel, in: Ringwald/Rönitzsch/Riedel (Hrsg.), Praxishandbuch Öffentliche Beleuchtung 2013).
- RINGWALD, R. & WEICHEL, M. (2013). Modelloptionen für die öffentliche Beleuchtung. In: M. RIEDEL, R. RINGWALD & H. RÖNITZSCH, (HRSG.). Praxishandbuch Öffentliche Beleuchtung: Wirtschaftlichkeit, Recht, Technik. Beuth Verlag. 93–114 (zit. Ringwald/Weichel, in: Ringwald/Rönitzsch/Riedel (Hrsg.), Praxishandbuch Öffentliche Beleuchtung 2013).
- ROBERT, K. A., LESKU, J. A., PARTECKE, J. & CHAMBERS, B. (2015). Artificial light at night desynchronizes strictly seasonal reproduction in a wild mammal. *Proceedings of the Royal Society B*, 282(1816), <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1745>
- RODRIGUEZ, A. & RODRIGUEZ, B. (2009). Attraction of petrels to artificial lights in the Canary Islands: Effects of the moon phase and age class. *Ibis*, 151(2), 299-310. <http://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2009.00925.x>
- RODRÍGUEZ, A., BURGAN, G., DANN, P., JESSOP, R., NEGRO, J. J. & CHIARADIA, A. (2014). Fatal attraction of short-tailed shearwaters to artificial lights. *PLoS ONE*, 9(10). <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0110114>
- RODRÍGUEZ, A., GARCÍA, D., RODRÍGUEZ, B., CARDONA, E., PARPAL, L. & PONS, P. (2015). Artificial lights and seabirds: Is light pollution a threat for the threatened Balearic petrels? *Journal of Ornithology*, 156(4), 893-902. <http://doi.org/10.1007/s10336-015-1232-3>
- RODRÍGUEZ, A., DANN, P. & CHIARADIA, A. (2017). Reducing light-induced mortality of seabirds: high pressure sodium lights decrease the fatal attraction of shearwaters. *Journal for Nature Conservation*, 39, 68-72. <http://doi.org/10.1016/j.jnc.2017.07.001>
- RYDELL, J. (1992). Exploitation of insects around streetlamps by bats in Sweden. *Functional Ecology*, 6(6), 744. <https://doi.org/10.2307/2389972>
- RYDELL, J., EKLÖF, J. & SÁNCHEZ-NAVARRO, S. (2017). Age of enlightenment: long-term effects of outdoor aesthetic lights on bats in churches. *Royal Society Open Science*, 4(8), 161077. <https://doi.org/10.1098/rsos.161077>

- SABELIS I. (2013). Lichtverschmutzung durch Gewächshäuser in den Niederlanden. In M. HELD, F. HÖLKER & B. JESSEL (HRSG.), BfN Skripten 336 (S. 137-140). Bundesamt für Naturschutz.
- SÄCKER, F. J., RIXECKER, R., OETKER, H. & LIMPERG, B. (HRSG.) (2017). Münchener Kommentar zum Bürgerlichen Gesetzbuch, Band 6 - Schuldrecht Besonderer Teil IV, 7. Aufl. (zit. Bearbeiter, MüKo BGB).
- SÁNCHEZ-BAYO, F. & WYCKHUYS, K. A. G. (2019). Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232(1), 8-27. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>
- SANDERS, A. & SCOTT, A. (2009). Review of luminaire maintenance factors. CSS Street Lighting Project. <https://trid.trb.org/view/888212>
- SANTOS, C. D., MIRANDA, A. C., GRANADEIRO, J. P., LOURENÇO, P. M., SARAIVA, S. & PALMEIRIM, J. M. (2010). Effects of artificial illumination on the nocturnal foraging of waders. *Acta Oecologica*, 36(2), 166-172. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2009.11.008>
- SAUTHOFF, M. (2010). Öffentliche Straßen: Straßenrecht, Straßenverkehrsrecht, Verkehrssicherungspflichten. Beck Verlag, 2. Aufl.
- SCHEIDLER, A. (2011). Haftung für (Auto) Schäden durch Schlaglöcher und sonstige Straßenunebenheiten. *Neue Zeitschrift für Verkehrssicherheit (NZV)*. 24(9), 422-430.
- SCHLACKE, S. (HRSG.). (2017). Gemeinschaftskommentar zum Bundesnaturschutzgesetz. C. Heymanns, Köln, 2. Aufl. (zit. Bearbeiter, in: Schlacke (Hrsg.), GK-BNatSchG).
- SCHOCH, F. (HRSG.). (2018). Besonderes Verwaltungsrecht, Beck-Verlag, 2018 (zit. Bearbeiter, in: Schoch (Hrsg.), Besonderes Verwaltungsrecht).
- SCHOEMAN, M. C. (2016). Light pollution at stadiums favors urban exploiter bats. *Animal Conservation*, 19(2), 120-130. <https://doi.org/10.1111/acv.12220>
- SCHROER, S. & HÖLKER, F. (2017). Impact of Lighting on Flora and Fauna. In R. KARLICEK, C.-C. SUN, G. ZISSIS & R. MA (HRSG.), *Handbook of Advanced Lighting Technology* (pp. 957-989). Springer, Cham. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-00295-8_42-1
- SCHROER, S., VOIGT, C. C., KLENKE, R. & HÖLKER, F. (IN VORBER.): Analyse der Auswirkungen künstlichen Lichts auf die Biodiversität, Bestimmung von Indikatoren für die Beeinträchtigung und Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Vermeidung negativer Effekte im Rahmen von Eingriffen. *Naturschutz und Biologische Vielfalt*.
- SCHUMACHER, H. (2015). Handbuch der Kommunalhaftung. Carl Heymanns Verlag, 5. Aufl.
- SCHUMACHER, J. & FISCHER-HÜFTLE, P. (HRSG.). (2011). Bundesnaturschutzgesetz – Kommentar. Kohlhammer Verlag, 2. Aufl. (zit. Bearbeiter, in: Schumacher/Fischer-Hüftle (Hrsg.), BNatSchG).
- SEIDELMANN, P. K. (HRSG.). (1992). Explanatory supplement to the astronomical almanac. University Science Books, Sausalito, CA.
- SENATSVORWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT (2011/2015). Lichtkonzept Berlin – Handbuch.
- STEINBACH, R., PERKINS, C., TOMPSON, L., JOHNSON, S., ARMSTRONG, B., GREEN, J., ... & EDWARDS, P. (2015). The effect of reduced street lighting on road casualties and crime in England and Wales: controlled interrupted time series analysis. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 69, 1118-1124.

- TELFER, T. C., SINCOCK, J. L., BYR, G. V. & REED, J. R. (1987). Attraction of Hawaiian seabirds to lights : conservation efforts and effects of moon phase. *Wildlife Society Bulletin*, 15(3), 406-413.
- THEISS E. (2000). *Beleuchtungstechnik: neue Technologien der Innen- und Außenbeleuchtung*. Oldenburg Industrieverlag, S. 23
- VEROVNIK, R., FIŠER, Ž. & ZAKŠEK, V. (2015). How to reduce the impact of artificial lighting on moths: A case study on cultural heritage sites in Slovenia. *Journal for Nature Conservation*, 28, 105-111. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2015.09.002>
- VOGEL, G. (2017). Where have all the insects gone? *Science*, 356(6338), 576-579. <https://doi.org/10.1126/science.356.6338.576>
- WALKLING, A. & STOCKMAR, A. (2013). Normen, Richtlinien und Empfehlungen zur Begrenzung von Lichtimmissionen. In M. HELD, F. HÖLKER & B. JESSEL (HRSG.), *BfN Skripten 336* (pp. 137-140). Bundesamt für Naturschutz.
- WELBERS, A. A. M. H., VAN DIS, N. E., KOLVOORT, A. M., OUYANG, J., VISSER, M. E., SPOELSTRA, K. & DOMINONI, D. M. (2017). Artificial light at night reduces daily energy expenditure in breeding great tits (*Parus major*). *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5(55), 1-10. <http://doi.org/10.3389/fevo.2017.00055>
- WILSON, J. F., BAKER, D., CHENEY, J., COOK, M., ELLIS, M., FREESTONE, R., ... & HOWARTH, S. (2018). A role for artificial night-time lighting in long-term changes in populations of 100 widespread macro-moths in UK and Ireland: a citizen-science study. *Journal of Insect Conservation*, 22, 189-196.
- YASUO, S., NAKAO, N., OHKURA, S., IIGO, M., HAGIWARA, S., GOTO, A., ... YOSHIMURA, T. (2006). Long-day suppressed expression of type 2 deiodinase gene in the mediobasal hypothalamus of the Saanen goat, a short-day breeder: implication for seasonal window of thyroid hormone action on reproductive neuroendocrine axis. *Endocrinology*, 147(1), 432-40. <https://doi.org/10.1210/en.2005-0507>