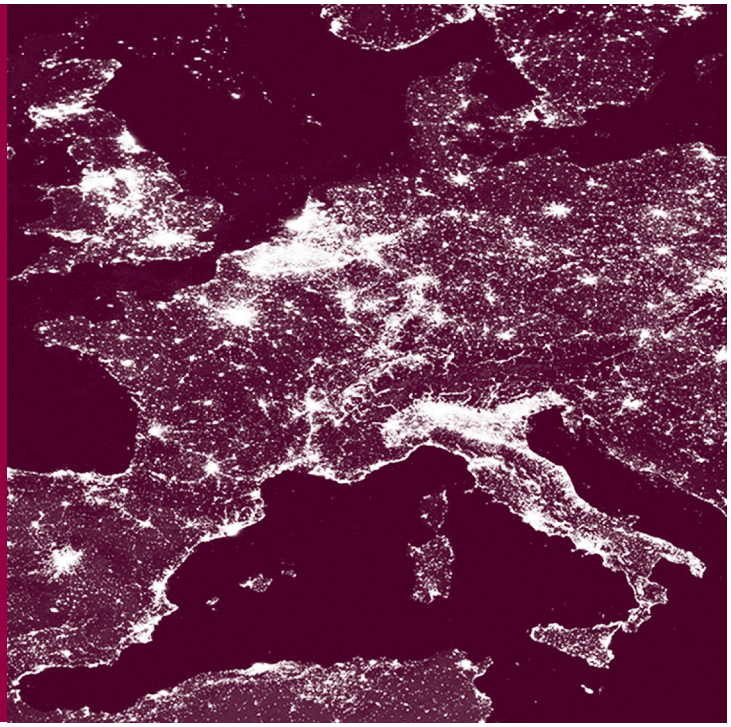
BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG

Christoph Schröter-Schlaack

unter Mitarbeit von
Nona Schulte-Römer
Christoph Revermann

Lichtverschmutzung – Ausmaß, gesellschaftliche und ökologische Auswirkungen sowie Handlungsansätze

Endbericht zum TA-Projekt



Juni 2020
Arbeitsbericht Nr. 186

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse seit 1990 in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB ist eine organisatorische Einheit des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) im Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Zur Erfüllung seiner Aufgaben kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH. Von September 2013 bis August 2018 war das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ weiterer Kooperationspartner.

Christoph Schröter-Schlaack

unter Mitarbeit von
Nona Schulte-Römer
Christoph Revermann

Lichtverschmutzung – Ausmaß, gesellschaftliche und ökologische Auswirkungen sowie Handlungsansätze

Endbericht

TAB-Arbeitsbericht Nr. 186

Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag
Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Telefon: +49 30 28491-0
E-Mail: buero@tab-beim-bundestag.de
Web: www.tab-beim-bundestag.de
Twitter: @TABundestag

2020

Umschlagbild: Craig Mayhew/Robert Simmon, NASA GSFC

Papier: Circle*offset* Premium White
Druck: Wienands Print + Medien GmbH, Bad Honnef

ISSN-Print: 2364-2599
ISSN-Internet: 2364-2602

Inhalt

Zusammenfassung 9

1 Einleitung 23

2 Umfang und Trends künstlicher Außenbeleuchtung in der Nacht 29

2.1 Methoden zur Erfassung und Messung künstlicher nächtlicher Beleuchtung 29
2.1.1 Wichtige fotometrische Messgrößen 29
2.1.2 Leuchtenkataster 32
2.1.3 Horizontale Luft- und Satellitenbildaufnahmen 32
2.1.4 Vertikale Fotografien 35
2.1.5 Messung und Simulation der Himmelshelligkeit 37
2.1.6 Einsatzmöglichkeiten der Methoden 39

2.2 Ausmaß und Variabilität künstlicher Beleuchtung in der Nacht 41
2.2.1 Ausmaß und räumliche Verteilung des nach oben emittierten Lichts 42
2.2.2 Ausmaß und räumliche Verteilung der Himmelshelligkeit 44
2.2.3 Zeitliche Veränderung der künstlichen Beleuchtung 47

2.3 Entwicklung von Lichtemissionen und Himmelshelligkeit 50
2.3.1 Veränderung der Lichtemissionen 50
2.3.2 Veränderung der Himmelshelligkeit 53

2.4 Veränderungen der Beleuchtungstechnologie und Trends in der Nutzung künstlicher Beleuchtung 54
2.4.1 Veränderungen der Beleuchtungstechnologie 55
2.4.2 Trends bei Ordnungslicht 57
2.4.3 Trends bei Gestaltung, Inszenierung und Marketing mit Licht 59
2.4.4 Zurückhaltender Umgang mit künstlicher Beleuchtung 61

3 Stand des Wissens zu den Wirkungen künstlicher Außenbeleuchtung in der Nacht 63

3.1 Wirtschaftliche und soziokulturelle Wirkungen 63
3.1.1 Wesentliche Innovationsschritte der Beleuchtungstechnik 63

3.1.2 Erwünschte Beleuchtungswirkungen 64
3.1.3 Unerwünschte Beleuchtungswirkungen 68

3.2 Humanmedizinische Wirkungen 73
3.2.1 Visuelle und nichtvisuelle Wirkungen von Licht 73
3.2.2 Biologische Grundlagen nichtvisueller Wirkungen von Licht 75
3.2.3 Humanmedizinische Wirkungen von Licht in der Nacht 77
3.2.4 Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis zu den humanmedizinischen Wirkungen 80
3.2.5 Fazit aus humanmedizinischer Sicht 84

3.3 Ökologische Wirkungen 86
3.3.1 Wirkungen auf Pflanzen 87
3.3.2 Wirkungen auf Tiere 89
3.3.3 Wirkungen von Lichtverschmutzung im ökosystemaren Zusammenhang 106
3.3.4 Schwellenwerte zur Vermeidung negativer ökologischer Wirkungen von Lichtverschmutzung 111
3.3.5 Fazit aus ökologischer Sicht 113

4 Optionen zur Vermeidung von Lichtverschmutzung 115

4.1 Regulierung von Außenbeleuchtung 115
4.1.1 Rechtliche Regelungen in Deutschland 116
4.1.2 Weitere Instrumente zur Reduzierung von Lichtverschmutzung 121
4.1.3 Regelungen auf EU-Ebene 127
4.1.4 Regelungen in europäischen Ländern 130

4.2 Technologische Optimierung von Beleuchtungsanlagen 143
4.2.1 Notwendigkeit von Beleuchtung 143
4.2.2 Beleuchtungsintensität und Platzierung von Anlagen 144
4.2.3 Zeitliche Abschaltung öffentlicher Beleuchtung 146
4.2.4 Abschirmung und Abstrahlungsgeometrie 147
4.2.5 Spektrale Zusammensetzung 149

5 Handlungsoptionen 153

5.1 Effektivierung der Steuerungsmöglichkeiten für Außenbeleuchtung 153

5.2 Erhöhung des Bewusstseins für Lichtverschmutzung 157

5.3 Förderung von wissenschaftlicher Forschung zu den Wirkungen von Lichtverschmutzung 159
5.3.1 Forschungen zu Ausmaß und Gründen zunehmender Beleuchtung 159
5.3.2 Forschungen zu humanmedizinischen Wirkungen 161
5.3.3 Forschungen zu ökologischen Wirkungen 162

6 Literatur 165
6.1 In Auftrag gegebene Gutachten 165
6.2 Weitere Literatur 165

7 Anhang 195
7.1 Abbildungen 195
7.2 Tabellen 197

Zusammenfassung

Künstliches Licht kann als eine der größten technischen Errungenschaften der Menschheit angesehen werden, die erhebliche Veränderungen bzw. Fortschritte der Arbeits- und Lebensweisen ermöglichen. Mit künstlicher Beleuchtung wird aber auch der natürliche Rhythmus von Tag und Nacht verändert und damit das Gesamtgefüge des Naturhaushaltes und der Nachtlandschaft transformiert. Ein natürlich dunkler Nachthimmel ist in Deutschland selten geworden. Lichtglocken über urbanen Gebieten sind weit weg von ihrem Entstehungsort in unbeleuchteten Gebieten noch sichtbar und lassen Sterne und die Milchstraße unkenntlich werden. Nicht nur das direkte elektrische Licht erleuchtet unsere Umwelt, sondern auch der nach oben abgestrahlte und reflektierte Teil des Lichts. Schichten der Atmosphäre, Staub oder Wassertropfen reflektieren und streuen das Licht. Dieser auch als Skyglow bezeichnete Effekt bewirkt eine zusätzliche Erhellung. Neben dieser künstlich erhöhten Himmelshelligkeit kann Licht auch die direkte Umgebung ungewollt aufhellen oder durch Blendung das Sehen einschränken. Licht ist ein wichtiger externer Zeitgeber für die innere Uhr der Lebewesen, an dessen natürlichen Rhythmus sich Menschen, Tiere und Pflanzen über Jahrhunderte angepasst haben. So wird vermutet, dass die permanent und periodisch veränderten Lichtverhältnisse durch zunehmende künstliche Beleuchtung negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben und ebenso zu ökologischen Beeinträchtigungen führen.

All diese nichtintendierten Wirkungen der künstlichen Beleuchtung werden unter dem Sammelbegriff Lichtverschmutzung verstanden. Lichtverschmutzung ist hier definiert als unerwünschte Wirkung künstlicher Beleuchtung im Außenbereich, also das Licht, das räumlich (Richtung und Fläche), zeitlich (Tages- und Jahreszeit, Dauer, Periodizität) oder in der Intensität oder spektralen Zusammensetzung (z. B. Ultraviolett- oder Blauanteil) über den reinen Beleuchtungszweck hinaus nicht beabsichtigte Auswirkungen hat (Kuechly et al. 2018).

Mit dem vorliegenden Bericht werden der wissenschaftliche Erkenntnisstand im Hinblick auf Umfang und Trends der Lichtverschmutzung sowie ihre wirtschaftlichen und soziokulturellen, humanmedizinischen und ökologischen Wirkungen zusammengefasst. Auf Basis dieser Erkenntnisse und aktueller beleuchtungstechnologischer und lichtplanerischer Möglichkeiten werden Handlungsoptionen abgeleitet, die eine Verringerung der Lichtverschmutzung bei gleichzeitiger Berücksichtigung der nutzbringenden Ziele der Beleuchtung unterstützen können.

Methoden zur Erfassung der Lichtverschmutzung

Die verschiedenen Ausprägungen der Lichtverschmutzung können mit unterschiedlichen Methoden gemessen werden, wobei die Auswahl der Methode davon abhängt, was genau beobachtet werden soll und warum.

Direkte Lichtemissionen lassen sich am besten durch die Eigenschaften der Lichtquellen an sich bestimmen. Mit sogenannten Leuchtenkatastern kann die Gesamtbeleuchtung eines Standortes analysiert und modelliert werden. Leider fehlen häufig die notwendigen Informationen oder diese sind nur für die öffentliche (Straßen-)Beleuchtung bekannt. Vertikale Fotografien erlauben die Erfassung einer seitlichen Perspektive der Beleuchtungssituation. Sie sind besonders für die Untersuchung der zeitlichen Variabilität der Lichtemissionen geeignet und lassen bei kalibrierter Kameraeinstellung auch den Vergleich von verschiedenen Untersuchungsstandorten zu.

Die nach oben abgestrahlten Lichtemissionen können mit horizontalen Luft- und Satellitenbildaufnahmen bestimmt werden, wobei die Aussagekraft von der Qualität der räumlichen, zeitlichen und radiometrischen Auflösung der Daten abhängt. Solche Fernerkundungsdaten werden von klimatischen und saisonalen Umweltfaktoren, wie z. B. Belaubung, Wolkenbedeckung und Bodenfeuchte beeinflusst. Luftbilder von Drohnen und Flugzeugen haben die höchste räumliche Auflösung, sind aber sehr kosten- und zeitintensiv und generell nur für kleinere Untersuchungsräume geeignet. Fotografien aus dem All (z. B. von der ISS) liefern multispektrale Informationen bei mittlerer Auflösung zu unterschiedlichen Nachtzeiten, sind aber von sehr stark variierender Qualität und nicht flächendeckend für Deutschland verfügbar. Satellitendaten werden global aufgenommen, haben jedoch nur eine geringe räumliche Auflösung.

Die Himmelshelligkeit lässt sich indirekt mithilfe der Erfassung der schwächsten, gerade noch sichtbaren Sterne bestimmen. Darüber hinaus sind auch direkte Messungen mit Messgeräten und Digitalkameras möglich. Für eine automatische Auswertung fehlt jedoch noch eine benutzerfreundliche Software. Schließlich lässt sich Himmelshelligkeit unter Rückgriff auf Daten aus Beleuchtungskatastern und der Fernerkundung auch modellieren.

Ausmaß sowie räumliche und zeitliche Variabilität der Lichtemissionen

Im Vergleich zu europäischen Nachbarländern sind in Deutschland das Niveau der Beleuchtung bei Nacht und das insgesamt in den Himmel emittierte Licht geringer. Als Hauptursache wird die gegenüber anderen Staaten eher konservative Beleuchtungskultur in Deutschland vermutet. Für Städte lässt sich knapp die Hälfte der Variabilität der Lichtemissionen – neben regionsspezifischen Besonderheiten – mit dem Bruttoinlandsprodukt, der Stadtfläche, der Straßendichte, der geografischen Breite, der Vegetation und der Schneebedeckung erklären.

Auch die Himmelshelligkeit ist räumlich stark unterschiedlich. So gibt es – insbesondere durch die hohe Siedlungsdichte – kein Gebiet in Deutschland, das unbeeinflusst von künstlicher Beleuchtung und dadurch erhöhter Nachthimmelshelligkeit ist. International existieren hingegen noch größere, oft unbewohnte Regionen mit natürlicher Nachthimmelshelligkeit. Da deutsche Städte jedoch insgesamt weniger stark beleuchtet sind als z. B. US-amerikanische Städte, sind die Auswirkungen dieser künstlich erhöhten Himmelshelligkeit, z. B. auf die Sichtbarkeit von Sternen oder die Nachtanpassung der Augen, in Deutschland zum Teil geringer als anderswo.

Die Erhöhung der Himmelshelligkeit durch künstliche Beleuchtung variiert außerdem in Abhängigkeit von zwei Faktoren: der Entfernung zur Lichtquelle und der Bewölkung. Während für klare Nächte gute Erkenntnisse über die räumlichen Muster der Himmelshelligkeit vorhanden sind, fehlen diese für bewölkte Nächte fast vollständig sowohl theoretisch als auch experimentell. Diese Kenntnislücke erschwert die Abschätzung der Auswirkungen erhöhter Himmelshelligkeit z. B. auf Wildtiere und Pflanzen.

Die Vielzahl der Nutzungsformen künstlicher Beleuchtung spiegelt sich auch in ihrem zeitlichen Auftreten wider. Einige Lichtquellen sind temporär (z. B. Lichtfestivals) oder saisonal (z. B. Beleuchtung touristischer Ziele). Einige Lichtquellen sind die ganze Nacht eingeschaltet, während andere gedimmt oder zu bestimmter Zeit an- und abgeschaltet werden. So wird die öffentliche Beleuchtung in Deutschland häufig bedarfsorientiert betrieben und zu bestimmten Zeiten – beispielsweise zwischen 23:00 und 04:00 Uhr – abgeschaltet oder reduziert. Während für Beleuchtungsquellen der öffentlichen Hand Informationen zu Einsatzzeiten oft verfügbar sind, ist die Situation bei privat betriebenen Lichtquellen unübersichtlich. Gerade diese können aber in Städten einen erheblichen Anteil der künstlichen Beleuchtung ausmachen.

Trends der künstlichen Beleuchtung bei Nacht

In den letzten Jahren ist weltweit genauso wie in Deutschland eine Zunahme der insgesamt beleuchteten Fläche und der Beleuchtungsintensität festzustellen. In vielen sich schnell entwickelnden Ländern Afrikas, Südamerikas und Asiens war die Veränderungsrate an beleuchteter Fläche erheblich größer als im globalen Durchschnitt. Im Gegensatz dazu waren die Veränderungsraten in bereits hell erleuchteten Ländern, wie Deutschland, oft nur moderat oder in einigen Fällen sogar leicht negativ.

Innerhalb Deutschlands weisen die meisten Bundesländer steigende Werte sowohl für die beleuchtete Fläche als auch für die Strahldichte aus. Am stärksten machte sich diese Steigerung in Bayern bemerkbar, wo die beleuchtete Fläche von 2012 bis 2016 um 45 % zunahm, gefolgt von Schleswig-Holstein mit 40 %. Bei der Veränderung der Intensität beleuchteter Flächen zeigte Schleswig-Hol-

stein die größte Zunahme mit 41 %, gefolgt von Bayern mit 35 %. Die Ausnahme unter den Bundesländern ist Thüringen mit einer Abnahme von 18 % an beleuchteter Fläche und einem Rückgang der Intensität der beleuchteten Flächen von 17 %.

Eine wissenschaftlich fundierte Analyse von Ursachen und Wirkungsbeziehungen hinter diesen Beobachtungsdaten liegt noch nicht vor. Es wird jedoch vermutet, dass die allgemeine Zunahme der Lichtemissionen durch Siedlungswachstum und Flächeninanspruchnahme sowie eine zunehmende Verwendung von Außenbeleuchtung im Privatbereich verursacht wird, während die Zunahme der Beleuchtungsintensität in der schrittweisen Umrüstung von Beleuchtungsanlagen auf LED-Technologie begründet liegt.

Technologische Veränderungen und Trends der Nutzung von Licht

Aktuell bewirken die Massenverfügbarkeit lichtemittierender Dioden (LED) und die damit einhergehende Kostendegression eine tiefgehende Änderung in der zur Anwendung kommenden Beleuchtungstechnologie, aber auch veränderte Nutzungsformen künstlicher Beleuchtung. Dabei haben LED mit Blick auf die Vermeidung von Lichtverschmutzung Vor- und Nachteile.

Aufgrund der Fokussierbarkeit und digitalen Steuerbarkeit bietet LED-Beleuchtung einerseits das Potenzial, Licht effektiver einzusetzen und ungewollte Lichtemissionen einzudämmen. Durch die Verschiebung der spektralen Zusammensetzung des erzeugten Lichts hin zu typischerweise höheren Blauanteilen wirkt die LED-Beleuchtung für das menschliche Auge zudem heller als eine Beleuchtung mit weniger Blauanteilen, sodass mit LED eine gewünschte Helligkeit einfacher erreicht werden könnte.

Andererseits stehen besonders die kurzwelligen blauen Lichtbereiche der LED im Verdacht, humanmedizinisch und ökologisch nachteilige Wirkungen zu erzeugen und an der zunehmenden künstlichen Aufhellung des Nachthimmels beteiligt zu sein. Zudem führt die kostengünstige Verfügbarkeit der energieverbrauchsarmen LED zur immer weitergehenden Nutzung von Licht sowohl bei öffentlicher Beleuchtung als auch im dekorativen und privaten Bereich. Und schließlich werden oft nur die Leuchtmittel getauscht und keine Anpassung des gesamten Beleuchtungssystems vorgenommen. Die Möglichkeit einer gezielten Steuerung und Begrenzung der Beleuchtungsintensität und der Beleuchtungszeit sowie die Verwendung optimierter Lampen und Mastabstände bleiben dabei ungenutzt. Im schlimmsten Fall führen neue LED in alten Fassungen zu einer Verschlechterung der Beleuchtungssituation, etwa weil sie Blendung erzeugen. So zeigt sich bislang in der Praxis, dass die theoretischen Potenziale einer Umrüstung auf LED-Beleuchtung für die Reduzierung des Energieverbrauchs und einer Begrenzung der Lichtverschmutzung bei Weitem nicht realisiert werden.

Wirtschaftliche und soziokulturelle Wirkungen von Lichtverschmutzung

Die zentralen Funktionen von künstlicher Außenbeleuchtung (Verkehrs- und Arbeitssicherheit, die Kontrolle nächtlicher Aktivitäten in öffentlichen Räumen, festliche Anlässe und Inszenierungen) haben sich trotz technologischer Innovationen und gesellschaftlicher Umbrüche kaum verändert.

Unbestritten ist, dass die Etablierung elektrischer Lichtquellen zu erheblichen Fortschritten der Arbeits- und Lebensweisen der Menschen geführt hat. Außenbeleuchtung ermöglicht das Sehen in der Nacht und das schnellere Erfassen von Gefahrensituationen, z. B. im Straßenverkehr. Die Kausalität statistischer Zusammenhänge zwischen Beleuchtung und Verkehrssicherheit ist allerdings nicht eindeutig belegt und umstritten. Auch bei der Kriminalitätsprävention weisen Befragungsergebnisse auf die bedeutende Rolle von Beleuchtung für das subjektive Sicherheitsgefühl hin, allerdings lassen sich diese Wahrnehmungen nicht eindeutig durch statistische Daten zur Kriminalität im öffentlichen Raum untersetzen.

Demgegenüber zeigen sich auch immer mehr die negativen Begleiterscheinungen einer sich ausweitenden künstlichen Beleuchtung. Befragungsdaten zeigen, dass sich das Problem der Blendung (direkt durch die Lichtquelle oder indirekt durch Reflexion, z. B. auf einer nassen Fahrbahn oder einer spiegelnden Fassade) durch neue Lichtquellen mit sehr hohen Leuchtdichten (LED-Beleuchtung, Xenonscheinwerfer) vergrößert hat. Lichtsensitive Menschen klagen über Sehprobleme, Kopfschmerzen und andere gesundheitliche Beeinträchtigungen durch sogenanntes Flimmern, das durch Lichtreize mit zeitlicher Schwankung der Leuchtdichten oder der spektralen Verteilung entsteht. Auch blinkendes Licht wird als besonders störend wahrgenommen.

Die zunehmende Aufhellung des Nachthimmels wirkt sich schon seit Langem negativ auf die professionelle Astronomie aus, die mit der Verlagerung von Forschungssternwarten in immer abgelegenere Gebiete reagiert hat. Einen viel größeren Einfluss hat die Lichtverschmutzung allerdings auf die zahlreichen Volkssternwarten sowie auf Hobby- und Amateurastronomen, die nur lokal tätig sind. Inzwischen hat sich ein Astrotourismus in Gegenden mit noch dunklem Nachthimmel entwickelt, etwa auf der zu Spanien gehörenden Insel La Palma, in Marokko oder Namibia.

Kein Europäer lebt heute unter einem natürlich dunklen Nachthimmel und rund die Hälfte der Bevölkerung kann die Milchstraße nicht mehr erkennen. Diesen Verlust bewerten nicht nur Astronomen als problematisch. Auch eine steigende Zahl an Forschenden aus kultur- und sozialwissenschaftlichen Disziplinen verweist auf die kulturgeschichtlich zentrale Rolle der Sternbeobachtung als Bezugs- und Orientierungspunkt und die gesellschaftliche sowie auch individuelle Bedeutung von in Dunkelheit verbrachten Zeiträumen.

Humanmedizinische Wirkungen von Lichtverschmutzung

Humanmedizinisch relevante Wirkungen von Licht in der Nacht ergeben sich einerseits akut durch die Beeinflussung der eher subjektiv empfundenen Wachheit und der objektiv messbaren Unterdrückung der Ausschüttung des Hormons Melatonin und andererseits aus der damit verbundenen Störung des zirkadianen (d.h. auf den Tag-Nacht-Wechsel im 24-Stunden-Takt geprägten) Rhythmus körpereigener Stoffwechselprozesse.

Die akute Wirkung auf Wachheit verlagert den Schlafanfang auf einen späteren Zeitpunkt und kann so zu einer Verkürzung und Verschlechterung des Nachtschlafs bis hin zu Schlafmangel führen. Chronischer Schlafmangel stellt bereits für sich genommen ein Gesundheitsrisiko dar. Zudem erhöht sich die Tagesmüdigkeit und damit die Wahrscheinlichkeit für Unfälle und Verletzungen. Gleichzeitig unterdrückt insbesondere blauhaltiges Licht die Ausschüttung des Hormons Melatonin durch die Zirbeldrüse im Gehirn. Melatonin ist maßgeblich an der Regulation des Schlafs und der zeitlichen Koordination vieler Körpervorgänge beteiligt. So wird während der melatonininduzierten Tiefschlafphase das Wachstumshormon Somatropin freigesetzt, dessen Mangel zu erhöhter Körperfettmasse, reduzierter Muskelmasse und einer verringerten Knochenmineraldichte führen kann. Ein weiterer Melatonineffekt liegt in seiner krebshemmenden Wirkung. Die akuten Lichtwirkungen stellen sich innerhalb von Minuten ein und verringern sich innerhalb von Minuten oder wenigen Stunden, sobald keine Beleuchtung mehr vorhanden ist.

Im Gegensatz dazu betrifft die Wirkung von Licht auf das zirkadiane System die Synchronisation der körpereigenen Rhythmen mit dem natürlichen Wechsel von Tag (hell) und Nacht (dunkel). Zahlreiche physiologische Abläufe, wie z.B. die Regulation der Körpertemperatur, Stoffwechselvorgänge oder der Schlaf-wach-Wechsel sind natürlicherweise zeitlich aufeinander abgestimmt oder bauen aufeinander auf. Eine stabile Synchronisation der inneren Uhr, d.h. keine oder nur geringe Variationen der biologischen Rhythmen des Körpers von Tag zu Tag, ist wichtig für die Aufrechterhaltung von erholsamem Schlaf, Gesundheit und Leistungsfähigkeit.

Studien im Schlaflabor konnten zeigen, dass sowohl Schlafmangel als auch gestörte zirkadiane Rhythmen zu physiologischen Zuständen führen können, die einem klinischen Erscheinungsbild von z.B. Diabetes oder Herz-Kreislauf-Störungen ähneln. Dies bedeutet nicht, dass die Probanden in diesen Studien diese Krankheiten auch entwickelten, sondern lediglich, dass beispielsweise ihre Blutwerte ähnlich der Blutwerte waren, die gewöhnlich bei bestimmten Krankheiten vorzufinden sind. Unklar ist, ab welchem Ausmaß der Verschiebung von zirkadianen Rhythmen eine Gefährdung für die Gesundheit vorliegt. Schwellen- oder Referenzwerte gibt es weder für Lichtintensitäten noch für zeitliche Verschiebungsgrade zirkadianer Rhythmen. Dies liegt daran, dass eine künstlich im Labor induzierte Desynchronisation nicht so lange aufrechterhalten werden

kann bzw. darf, bis eine tatsächliche Gesundheitsgefährdung eintritt. Zudem ist die langfristige Adaptationsfähigkeit des zirkadianen Systems noch nicht hinreichend untersucht und verstanden.

Auf Grundlage der für Licht in der Nacht vermuteten humanmedizinischen Folgen wurde in einigen wissenschaftlichen Studien mithilfe von Satellitendaten zur Lichtverschmutzung und statistischen Daten über das Auftreten verschiedener Krankheiten (z. B. Brustkrebs) untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen beiden Größen besteht. Zwar wurde in den meisten Studien ein statistischer Zusammenhang zwischen Lichtverschmutzung und Erkrankungsrisiko gefunden, allerdings ist die Datenlage für einen Nachweis eines kausalen Zusammenhangs nicht ausreichend. Zu ungenau ist vor allem die Erfassung der individuellen Lichtexposition der Betroffenen und des Anteils von Lichtverschmutzung. Zudem fehlen systematische Erhebungen von Parametern der zirkadianen Rhythmik sowie der Ausschüttung von Melatonin. Darüber hinaus fehlen Angaben zu mit Lichtverschmutzung assoziierten Verhaltensweisen (z. B. ein spät orientierter und/oder unrhythmischer Lebensstil, Schichtarbeit, ggf. in Kombination mit erhöhtem Alkohol- und/oder Tabakkonsum) bzw. Einflüsse weiterer nichtphotischer Umweltvariablen (z. B. Lärm), die allesamt das Erkrankungsrisiko beeinflussen können. Aus diesen Gründen sind wissenschaftlich gesicherte Aussagen zur Kausalität zwischen Lichtverschmutzung und beobachteten gesundheitlichen Problemen gegenwärtig nicht möglich.

Ökologische Wirkungen von Lichtverschmutzung

Tiere und Pflanzen sind auf deutliche regelmäßige Unterschiede in ihrer Lichtumgebung angewiesen, um ihr saisonales und tagesrhythmisches Verhalten und die damit verbundenen physiologischen Prozesse mit der Außenwelt synchronisieren zu können. Die unterschiedlichen Lichtphasen zu Tag, Nacht, Sonnenauf- und -untergang bieten temporale Nischen, an die sich Organismen evolutionär angepasst haben. Ein Drittel aller Wirbeltierarten ist nachtaktiv, dazu gehören alle Fledermausarten und fast alle Amphibien. Bei den Wirbellosen sind sogar zwei Drittel der bekannten Arten nachtaktiv.

Die Erhellung von Nachtlandschaften kann insbesondere Organismen beeinträchtigen, die sich in den Nischen der Dämmerung und der Nacht entwickelten und sich deren Wahrnehmung auf die dann herrschenden Lichtverhältnisse einstellte. Lichtinduzierte Veränderungen des Verhaltens und in der Artzusammensetzung könnten dabei kaskadenartige Auswirkungen auf Ökosysteme haben und verändern daher nicht nur die Bedingungen für nachtaktive, lichtsensible Arten, sondern auch indirekt die Bedingungen für tagaktive Arten und das Funktionieren ganzer Ökosysteme. Weiterhin können die durch Lichtverschmutzung induzierten Verhaltens- und Aktivitätsänderungen durch eine ge-

steigerte Umgebungstemperatur im Zuge der Klimaerwärmung noch verstärkt werden.

Es lassen sich verschiedene Wirkungen von Lichtverschmutzung auf Pflanzen und Tiere kennzeichnen, die artspezifisch unterschiedlich deutlich ausgeprägt sind. So kann künstliche Beleuchtung Verhaltensänderungen hervorrufen, z. B. eine zeitliche Verschiebung von Aktivitätsrhythmen wie Jagd-, Ruhe- oder Reproduktionsphasen. Dabei lassen sich ähnlich wie beim Menschen akute und zirkadiane Rhythmusstörungen unterscheiden. Auch der lokale Aktionsradius von Individuen kann verändert werden, wenn künstliche Lichtquellen als Attraktor wirken, z. B. für Insekten, oder beleuchtete Gebiete von Tieren gemieden werden und z. B. Straßenbeleuchtung als Barriere für die Migration von Individuen wirkt. Wenn einzelne Arten ihren Lebensraum durch Beleuchtung nicht nutzen oder in ihrer Reproduktion behindert werden, können Eintrittspforten für invasive Arten entstehen, welche aufgrund ihrer Herkunft oder genetischen Prädisposition besser an den Faktor Beleuchtung angepasst sind. Hingegen können räuberische Arten auch von der Ansammlung von Beutetieren an beleuchteten Standorten profitieren.

Die spektralen Empfindlichkeiten unterscheiden sich stark zwischen Arten und sind auch von der Beleuchtungsstärke abhängig. Bei hohen Beleuchtungsstärken und bei einzelnen Lichtquellen hat die spektrale Zusammensetzung weniger Einfluss als die Intensität des Lichts. Sehr schwaches Licht in einer spektralen Zusammensetzung, auf die ein Organismus empfindlich reagiert, kann vergleichsweise stark wirken, genauso wie sehr intensives Licht mit spektralen Zusammensetzungen außerhalb des Empfindlichkeitsbereiches des Organismus. Trotz aller Unterschiede nehmen die Anzahl der betroffenen Arten und das Ausmaß der Auswirkungen zu, je kurzwelliger das Licht ist, also einen hohen Anteil im blauen und ultravioletten Spektralbereich aufweist.

Zwar sind einzelne Wirkungen künstlicher Beleuchtung auf Pflanzen und Tiere gut untersucht, die Auswirkungen sind jedoch hochkomplex, artabhängig und insgesamt noch wenig verstanden. Bisherige Studien fokussieren überwiegend auf einzelne Wirkungen und einzelne ausgewählte Tierarten. Daher ist es derzeit nicht möglich, wissenschaftlich gesicherte Aussagen zu den Auswirkungen der voranschreitenden Ausbreitung künstlichen Lichts auf der Ebene von Populationen, Lebensgemeinschaften oder Ökosystemen zu treffen oder konkrete Dosis-Wirkungs-Beziehungen zu definieren, auf deren Grundlage einzuhaltende Grenzwerte empfohlen werden könnten. Unklar ist oftmals, wie anpassungsfähig Arten langfristig sind, d. h., ob bestimmte Folgen reversibel sind bzw. welche Folgen aus dieser Anpassung im ökosystemaren Zusammenspiel resultieren. Auch ist unklar, welche Bedeutung die Lichtverschmutzung als Risikofaktor neben anderen Belastungen und Entwicklungen (Urbanisierung, Landschaftszerschneidung, Nährstoff- und Biozideinträge, Klimawandel, Veränderungen in der Artenzusammensetzung etc.) hat.

Regulierungsansätze zur Vermeidung von Lichtverschmutzung

Nach dem Vorsorgeprinzip – ein wesentliches Element der EU-Politik und des deutschen Umweltrechts – ist mit Licht schonend umzugehen, frühzeitig und vorausschauend und im Interesse künftiger Generationen zu handeln, auch wenn Ursache-Wirkungs-Beziehungen noch nicht vollständig verstanden sind. Es existiert zwar derzeit in Deutschland keine singuläre Regelung, die mögliche Beeinträchtigungen oder Belästigungen für Mensch, Flora und Fauna durch künstliche Beleuchtung umfassend benennt. Dies ist zwar nicht zwingend erforderlich, denn für eine Begrenzung der Lichtverschmutzung stehen verschiedene Handlungsinstrumente zur Verfügung, z. B. im Immissionsschutz-, Naturschutz- oder Baurecht.

Im Bundes-Immissionsschutzgesetz wird künstliches Licht zu den schädlichen Umweltwirkungen gezählt und könnte daher grundsätzlich auch Gegenstand entsprechender Prüfungen und Auflagen zur Vermeidung und Minderung werden. Allerdings unterliegen in der derzeitigen Ausgestaltung des Gesetzes nur wenige Beleuchtungsanlagen einer Genehmigungspflicht. Die Beurteilung von Lichtimmissionen ist zudem von vielen subjektiven Variablen abhängig, sodass derzeit aus dem Immissionsschutz nur wenig konkrete Eingriffsmöglichkeiten für die Reduzierung oder Vermeidung von Lichtverschmutzung abgeleitet werden (können).

Die Naturschutzgesetzgebung eröffnet gute Anknüpfungsmöglichkeiten, um negative Auswirkungen öffentlicher und privater künstlicher Beleuchtung auf den Naturhaushalt zu reduzieren. Allerdings fallen nur ausgewählte Gebiete unter den Naturschutz und es fehlen gegenwärtig vollzugstaugliche Abschätzungen zu den durch künstliche Beleuchtung verursachten Beeinträchtigungen für den Naturhaushalt, die für eine Vermeidung und Begrenzung von Beleuchtung notwendig wären.

Die Bauleitplanung bietet in besonderer Weise Möglichkeiten, Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft durch Lichtimmissionen zu vermeiden. Diese Möglichkeiten müssen jedoch durch die zuständigen kommunalen Entscheidungsträger erkannt, ergriffen und wirksam ausgestaltet werden; ihre Umsetzung bedarf auch der öffentlichen Akzeptanz. Unterstützend kann dabei die Entwicklung lokaler oder regionaler Lichtmasterpläne wirken, die zwar keine rechtliche Bindung entfalten, aber als Orientierung bei der Gestaltung öffentlicher und privater Beleuchtung und der Bewusstseinsbildung dienen können. Einige Regionen haben sich gezielt zur Vermeidung von Lichtverschmutzung bekannt und verdeutlichen dies durch eine freiwillige Zertifizierung als Lichtschutzgebiet oder Sternenstadt.

Für den Aufbau und den Betrieb von Straßenbeleuchtung werden derzeit aus Ermangelung einer gesetzlichen Regelung meist Industrienormen als Orientierung herangezogen. Diese sind zwar formaljuristisch unverbindlich, faktisch aber höchst einflussreich. Die Normensetzung würde daher wirksame Anknüp-

fungspunkte bieten, um auf eine Reduzierung der Lichtverschmutzung hinzuwirken. Allerdings werden derzeit nichtintendierte Nebenwirkungen der Straßenbeleuchtung auf die menschliche Gesundheit, Ökologie, Klimaschutz oder das Stadtbild bei der Normbildung kaum oder gar nicht berücksichtigt.

Auch durch Förderprogramme können Entwicklungen im Bereich der künstlichen Beleuchtung beeinflusst werden. In Deutschland werden auf verschiedenen Wegen Modernisierung und Umrüstungen öffentlicher Beleuchtungsanlagen gefördert. Der Fokus liegt dabei vornehmlich auf der Steigerung der Energieeffizienz und dem Klimaschutz, sodass derzeit eher eine Zunahme der Beleuchtungsintensität durch die Umrüstung auf energieeffizientere (und zumeist beleuchtungsintensivere) Leuchtmittel und Beleuchtungsanlagen befördert wird.

Regulierungen auf europäischer Ebene nehmen über die Definition von Effizienzkriterien und die Beschränkung ineffizienter Leuchtmittel Einfluss auf nationale Beleuchtungspraktiken. Die Erwähnung von Licht als eine relevante Größe bei der Umweltverträglichkeitsprüfung von Eingriffen in den Naturhaushalt eröffnet zudem den Mitgliedstaaten Möglichkeiten, im Rahmen nationaler Prüfverfahren stärker auf die Reduzierung von Lichtverschmutzung hinzuwirken.

Regelungen zur Reduzierung der Lichtverschmutzung in anderen europäischen Ländern können interessante Anknüpfungspunkte für die Ausbildung einer Beleuchtungsregulierung in Deutschland bieten. Die Bandbreite der Ansätze ist groß: Besonders progressiv sind Frankreich, das Lichtverschmutzung zentral in seiner Umweltschutzgesetzgebung benennt, und Slowenien, das in einer landesweit gültigen Verordnung Grenzwerte für Lichtverschmutzung festgesetzt hat. In Italien und Spanien existiert zwar keine nationale Gesetzgebung gegen Lichtverschmutzung, jedoch haben einige Regionen bindende Regelungen zur Steuerung der Beleuchtungspraxis erlassen. Relevant ist dabei jedoch nicht nur die Existenz derartiger Regulierungen, sondern auch ihre Durchsetzung und Wirksamkeit. Hierbei treten größere Unterschiede zwischen den einzelnen betrachteten Ländern auf.

Technische und technologische Optimierungspotenziale von Beleuchtung

Neben der Regulierung von Außenbeleuchtung bestehen vielfältige technische und technologische Optimierungspotenziale, um unerwünschte Nebenwirkungen künstlicher Beleuchtung zu reduzieren. Dabei eröffnen die Innovationen im Bereich der Beleuchtungs- und Steuerungstechnik einerseits wachsende Gestaltungsspielräume, z. B. über energieeffiziente, bedarfsorientierte Beleuchtung. Andererseits ergeben sich z. B. aus der Änderung der spektralen Zusammensetzung des emittierten Lichts beim Übergang von herkömmlicher

hin zu LED-Beleuchtung neue Herausforderungen für die Reduzierung der Lichtverschmutzung.

In einem ersten Schritt ist die Notwendigkeit einer (öffentlichen) Außenbeleuchtung bzw. deren Ausmaß zu hinterfragen. Aktuelle oder geplante Beleuchtungssituationen können mithilfe von lichttechnischen Modellierungen evaluiert werden. Allerdings fehlt es an verbindlichen oder zumindest flächendeckend akzeptierten Kriterien (wie z. B. die Industrienormen für die Straßenbeleuchtung), die für bestimmte Funktionen (z. B. Sicherheits- oder Werbebeleuchtung), Orte (z. B. Innenstadt, ländlicher Raum oder Naturschutzgebiet) sowie die Zeit der Beleuchtung (z. B. mehr oder weniger intensive Nutzungszeiten) Orientierung geben. Darüber kann der angestrebte Beleuchtungszweck über eine Anpassung der Beleuchtungsintensität, eine zeitliche Abschaltung sowie die ideale Positionierung und Dimensionierung einer Beleuchtungsanlage mit möglichst geringen unerwünschten Nebenfolgen realisiert werden. Auch eine möglichst situationsangepasste Abschirmung des Leuchtmittels und eine optimierte Abstrahlungsgeometrie tragen zu einer Reduzierung der Lichtverschmutzung bei.

Auch die spektrale Zusammensetzung der Beleuchtung beeinflusst das Ausmaß ihrer ungewollten Auswirkungen, insbesondere im Hinblick auf Flora und Fauna. Dazu sollte Licht im blauen Spektralbereich während des Abends und der Nacht vermieden werden, da dadurch viele relevante Wirkungen auf Insekten, Amphibien und andere Tierarten hervorgerufen werden. Allerdings reagieren verschiedene Taxa sehr unterschiedlich auf verschiedene Spektren, sodass die Wahl des Leuchtmittels nur im Zusammenspiel mit den zuvor genannten Maßnahmen wirksame Beiträge zur Reduzierung der ökologischen Wirkungen von Lichtverschmutzung leisten kann.

Handlungsoptionen

Handlungsoptionen bestehen mit Blick auf den hier zusammengetragenen Wissensstand zur Lichtverschmutzung in drei Bereichen: Neben einer weiteren Erforschung der Folgen zunehmender künstlicher Beleuchtung im Außenbereich sind die verstandenen Wirkungen, aber auch bestehende Anpassungs- und Vermeidungsoptionen in der Beleuchtungspraxis bekannt zu machen und die existierenden Regelungsansätze für eine Vermeidung von Lichtverschmutzung zu ertüchtigen.

Die Ursachen der gängigen Praxis der Lichtnutzung und ihre unterschiedlichen nationalen und regionalen Ausprägungen und zeitlichen Veränderungen sind noch wenig untersucht, ebenso ist kaum abzusehen, welche Veränderungen die aktuelle Umrüstung und neue Technologien mit sich bringen. Um die nächtliche Dunkelheit zu schützen, kommt es darauf an, künstliches Licht auf ein nötiges Minimum zu reduzieren. Das heißt, es gilt zu klären, was angemes-

sene Beleuchtung ist, um entsprechende Grenzwerte definieren zu können. Dazu ist es notwendig, zwischen den gesellschaftlichen und ökologischen Kosten einerseits und den vielfältigen Vorteilen der Beleuchtung andererseits abzuwägen. Um dies zu erreichen, ist nicht nur weitere Grundlagenforschung notwendig, sondern auch die kritische Überprüfung der heute gängigen Beleuchtungspraxis und ihrer Bestimmungsfaktoren: Woher kommt das Wissen, auf Grundlage dessen künstliche Beleuchtung geplant wird, und ist es heute noch ausreichend?

Im Hinblick auf die humanmedizinischen Folgen ist mithilfe geeigneter Untersuchungsdesigns zu klären, ob und inwieweit tatsächlich eine Kausalität zwischen Lichtverschmutzung und erhöhtem Krankheitsrisiko vorliegt. Die wissenschaftliche Evidenz für einen solchen unmittelbaren (kausalen) Zusammenhang ist derzeit gering, was vor allem im mangelhaften Untersuchungsdesign der vorliegenden Studien begründet liegt. Es werden daher Studien benötigt, in denen die individuelle Lichtexposition (insbesondere durch künstliches Licht im Außenbereich und davon gesondert der Teil der Lichtverschmutzung) und weitere individuelle Risikofaktoren erfasst und dann mit dem Krankheitsrisiko verglichen werden.

Bei der weiteren Erforschung ökologischer Wirkungen der zunehmenden nächtlichen Beleuchtung sollten Folgen für das ökosystemare Zusammenspiel verschiedener Arten in Biotopen, Nahrungsnetzen oder Landschaften und im Hinblick auf Leistungen des Naturhaushalts für den Menschen im Vordergrund stehen. Denn unklar ist, wie anpassungsfähig Arten langfristig sind, d. h., ob bestimmte Folgen reversibel sind bzw. welche Folgen aus dieser Anpassung im ökosystemaren Zusammenspiel resultieren. Zudem ist unklar, welche Bedeutung die Lichtverschmutzung als Risikofaktor neben anderen Belastungen (Urbanisierung, Landschaftszerschneidung, Nährstoff- und Biozideinträge, Klimawandel, Veränderungen in der Artenzusammensetzung etc.) hat. Solche Fragen sind nur mit langfristigen Forschungen und in aufwendig einzurichtenden Experimentalstrukturen zu benennen. Im Aufbau und Betrieb solcher Experimentalstrukturen könnte ein Schwerpunkt zukünftiger Forschungsförderung liegen.

Auch auf Grundlage des gegenwärtigen Wissensstands sollten Ausmaß und Wirkungen zunehmender nächtlicher Beleuchtung publik gemacht werden, um die Ausprägung eines gesellschaftlichen Problembewusstseins zu befördern. Dabei ist zu vermitteln, dass eine Minimierung der Lichtverschmutzung nicht das Ziel hat, auf künstliche Beleuchtung zu verzichten, sondern sie sinnvoll(er) einzusetzen. Die Erarbeitung kommunaler Lichtkonzepte unter Beteiligung der Öffentlichkeit bietet einen guten Startpunkt, um Bewusstseinsbildung im Umgang mit künstlicher Beleuchtung voranzutreiben und technische und technologische Anpassungsoptionen bekannt zu machen. Auf diesem Wege kann sowohl die öffentliche als auch die private Beleuchtungspraxis beeinflusst werden.

Unterstützt werden kann dies durch die Errichtung von Beleuchtungsmusterstrecken, die einen Eindruck verschiedener Beleuchtungslösungen vermitteln.

Zur möglichen Ertüchtigung von Regulierungsansätzen für die Reduzierung von Lichtverschmutzung sollte nicht auf die aufwendige Erforschung populationsrelevanter Parameter und Schwellenwerte gewartet werden. Lichtemissionen sollten vielmehr vorsorgeorientiert beurteilt werden, um denkbare Belastungen bzw. Schäden für die Umwelt bzw. die menschliche Gesundheit im Voraus (trotz unvollständiger Wissensbasis) zu vermeiden bzw. zu verringern. Auf diesem Grundsatz aufbauend, können schon mit dem heutigen Wissen und Stand der Technik Handlungsleitlinien konkretisiert werden. Dabei kann auch von den Erfahrungen anderer europäischer Länder profitiert werden. So könnten Mess- und Monitoringsysteme zur Überwachung der Entwicklung künstlicher Beleuchtung etabliert werden, z. B. über die verbindliche Führung eines Leuchtenkatasters. Länder und Kommunen würden von der Bereitstellung von Orientierungshilfen zur Beseitigung planerischer und rechtlicher Unsicherheiten, z. B. im Hinblick auf die Bedeutung der Industrienormen für die Straßenbeleuchtung, profitieren. Für bundeseigene Gebäude und Anlagen könnten Beleuchtungsrichtlinien zur Minimierung der Lichtverschmutzung entwickelt und umgesetzt werden. Über Förderprogramme, Auszeichnungen und Wettbewerbe für nachhaltige Beleuchtung kann die Entwicklung integrierter lokaler und regionaler Lichtkonzepte befördert werden. Schließlich könnten Grenz- und Richtwerte als Bemessungsgrundlage etabliert werden, um den Lichtemissionsschutz in bereits existierenden formellen Planungs- und Steuerungsinstrumenten bewerten zu können. Auch bietet es sich an, die Möglichkeit einer eigenständigen Regelung zur Begrenzung der Lichtverschmutzung zu prüfen.

1 Einleitung

Künstliches Licht bei Nacht und Lichtverschmutzung

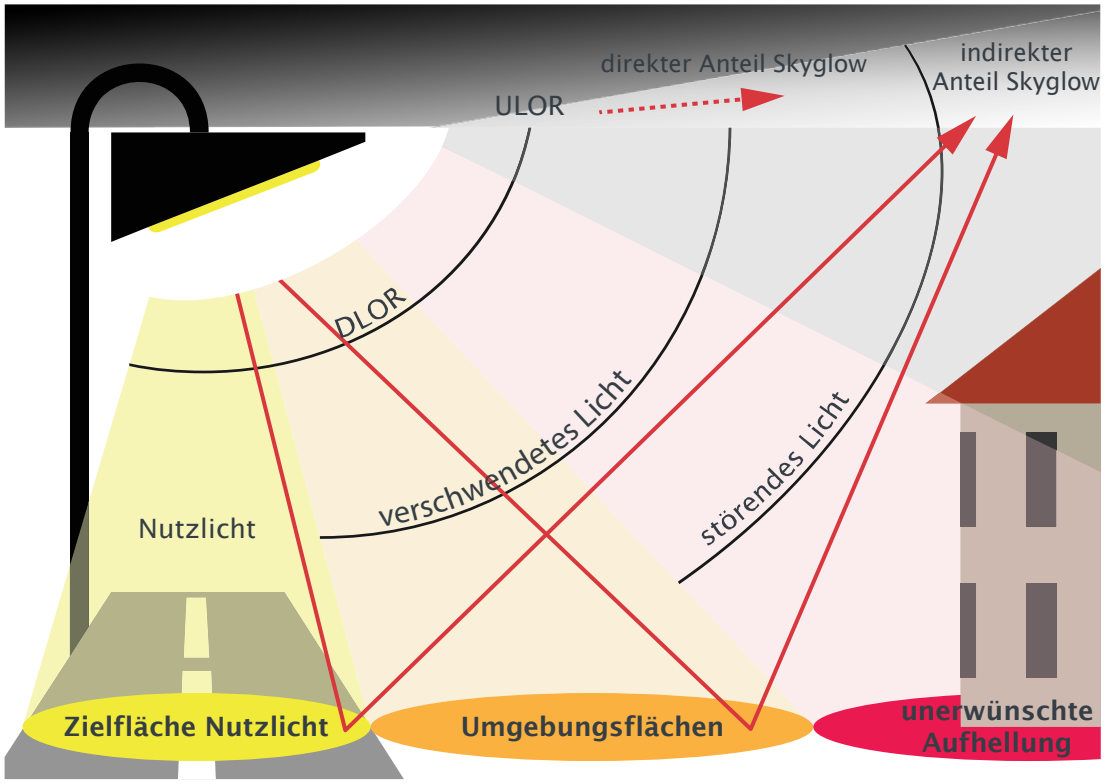
Licht löst bei Menschen ganz überwiegend positive Assoziationen aus. Die Etablierung elektrischer Lichtquellen in den 1880er Jahren führte zu erheblichen Fortschritten bzw. Veränderungen der Arbeits- und Lebensweisen der Menschen. Das künstliche Licht in der Nacht ist ein wesentliches Symbol für das Leben der Moderne und ermöglicht die Hinwendung zur 24-Stunden-Gesellschaft (Henckel et al. 2013). Es sorgt für die Ausdehnung des Zeitfensters für ökonomische und soziale Aktivitäten in die Abend- und Nachtstunden, unterstützt die Sicherheit und Gefahrenabwehr im öffentlichen Raum und insbesondere im Straßenverkehr und dient der Inszenierung von Waren, Gebäuden oder ganzen Städten. Auch im privaten Bereich wird durch die Massenverfügbarkeit kostengünstiger und energiesparender Beleuchtungsoptionen Licht nicht mehr nur funktionell, sondern immer mehr auch dekorativ verwendet.

Die stetig zunehmende Ausbreitung künstlicher Lichtquellen lässt aber auch mehr und mehr die unbeabsichtigten Folgen dieser Entwicklung in den Vordergrund treten (Brox 2010; Hasenöhrl 2015). Ein natürlich dunkler Nachthimmel ist in Deutschland selten geworden; Lichtglocken über urbanen Gebieten sind noch fern von ihrem Entstehungsort sichtbar und lassen Sterne und die Milchstraße nicht mehr erkennen. Im Zuge der weltweit fortschreitenden Umstellung auf LED-Beleuchtung mehren sich die Hinweise auf dadurch verursachte Schlafstörungen und damit verbundene gesundheitliche Beeinträchtigungen. Zudem beeinflusst die künstliche Beleuchtung den Lebensraum nachtaktiver Tiere, die darauf mit einer Änderung ihrer Verhaltensweisen oder dem Rückzug aus betroffenen Gebieten reagieren. Auch wenn die gesellschaftliche Wahrnehmung und Problematisierung der negativen Folgen der zunehmenden nächtlichen Beleuchtung im Vergleich zu anderen Umweltbelastungen wie Lärm, Luft- oder Wasserverschmutzung noch gering sind (Kuechly et al. 2018), so wächst doch das öffentliche Bewusstsein hierfür. Verstärkt engagieren sich Bürger in Dark-Sky-Initiativen. Einzelne Kommunen und Regionen sind als Lichtschutzgebiete ausgewiesen, die in Deutschland auch als Sternenparks oder Sternenstädte bezeichnet werden (Kap. 4.1.2).

Die positiven Wirkungen von Licht werden von Lichtingenieuren in der Biologie (Pflanzenzucht) und in der Medizin (Lichttherapie etc.) untersucht. Parallel dazu hat die wissenschaftliche Beschäftigung mit den Wirkungen künstlicher Beleuchtung bei Nacht in den letzten Jahren zugenommen (beispielhaft Bach/Degenring 2015; Held et al. 2013). In verschiedenen Disziplinen werden ihre teilweise negativen biologischen, ökologischen, gesundheitlichen, soziokulturellen und wirtschaftlichen Folgen thematisiert (Meier et al. 2015). So beeinflusst das Kunstlicht

körpereigene biologische Rhythmen des Menschen – mit möglichen Folgen für die physische und psychische Gesundheit (Kantermann 2018).

Abb. 1.1 Intendierte und nichtintendierte Lichtemissionen nächtlicher Beleuchtung



ULOR = Anteil des in den oberen Halbraum abgegebenen Lichts
DLOR = Anteil des in den unteren Halbraum abgegebenen Lichts
Skyglow = künstlich erhöhte Himmelshelligkeit durch emittiertes oder reflektiertes Licht, das von der Erdatmosphäre zurückgestreut wird

Quelle: angepasst nach Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. 2011 und Lang 2013

Als gesundheitlich problematisch angesehen wird vor allem die tagsüber verringerte, nachts hingegen erhöhte Exposition gegenüber Licht, die die natürlichen Dunkel- und Ruhephasen beeinträchtigt. Künstliche Beleuchtung bei Nacht führt auch zu Störungen der Lebensbedingungen und Verhaltensweisen bei Tieren, etwa bei nachtaktiven Insekten oder Zugvögeln (Schroer/Hölker 2018). Bei Pflanzen gibt es Hinweise auf Auswirkungen der Lichtverschmutzung in Gestalt einer verfrühten Ausbildung von Blüten bzw. einer verspäteten Winterruhe. Schließlich ist eine wesentliche Ursache für Lichtverschmutzung eine ineffiziente Beleuchtungstechnik, die gesellschaftliche Folgekosten durch einen unnötig ho-

hen Energiebedarf, visuelle Beeinträchtigungen wie Blendung oder das Verschwinden des Sternenhimmels sowie Anpassungsmaßnahmen erdgebundener Weltraumforschung verursacht (Henderson 2010).

Vor diesem Hintergrund bezeichnet der Begriff Lichtverschmutzung die nichtintendierten Wirkungen der Aufhellung der Umwelt und des Nachthimmels durch künstliche Beleuchtung im Außenbereich. Gemeint ist also jenes Licht, das räumlich (Richtung und Fläche), zeitlich (Tages- und Jahreszeit, Dauer, Periodizität) und in seiner Intensität oder spektralen Zusammensetzung (z. B. Ultraviolett- oder Blauanteil) über den reinen Beleuchtungszweck hinaus nicht beabsichtigte Auswirkungen hat (Kuechly et al. 2018). In Abbildung 1.1 sind die verschiedenen Ausprägungen von Lichtverschmutzung illustriert. Himmelshelligkeit (Skyglow) entsteht durch emittiertes oder reflektiertes Licht, das von der Erdatmosphäre zurückgestreut wird und dadurch den natürlichen Nachthimmel erleuchtet (Cinzano et al. 2001; Falchi et al. 2016; Kyba et al. 2015b). Störendes Licht, insbesondere Blendung, umfasst das direkte und messbare Herabsetzen des Erkennungsschwellenwerts, also die Verringerung der Wahrnehmbarkeit eines Gegenstands durch das blendende Licht und ein subjektives Störempfinden (LAI 2012; SSK 2006). Zudem kann eine unbeabsichtigte Aufhellung der Umgebung (Light Trespass) auftreten (Kuechly et al. 2018).

Die Quellen künstlichen Lichts im Außenbereich in der Nacht sind ebenso vielfältig wie die Nutzung von Beleuchtung. Sie reichen von stationären Beleuchtungsanlagen bis hin zu mobilen Quellen, wie z. B. die Fahrzeugbeleuchtung. Es existieren verschiedene Kategorisierungen von Lichtquellen nach genutzter Technik (z. B. Natriumdampf oder LED) und damit einhergehenden Lichtqualitäten und -eigenschaften oder auch nach unterschiedlichen Beleuchtungszwecken. Hier wird einer Einteilung nach Beleuchtungszwecken gefolgt (BAFU 2017; Kuechly et al. 2012):

- Ordnungslicht ist Licht zur Orientierung, z. B. im Verkehrsbereich (Straßen, Plätze, Bahnhöfe, Flugplätze etc.) oder bei Sportinfrastrukturen (Trainingsplätze, Stadien, Skipisten etc.).
- Werbelicht ist Licht von Leuchtreklamen und beleuchteter Werbung; hierzu gehören aber auch Teilbereiche der Gestaltungs- und Zierbeleuchtung (Skybeamer, Medienfassaden, Lichtinstallationen), wenn sie für Werbezwecke verwendet werden.
- Festlicht ist Licht für ästhetische und kulturelle Zwecke. Darunter fallen die Beleuchtung von öffentlichen Gebäuden und Anlagen (Denkmäler, Kirchen etc.), Gestaltungs- und Zierbeleuchtung (Skybeamer, Kunstinstallationen, Lichtfestivals, Weihnachtsbeleuchtung) und auch Teile der Beleuchtung im Naturraum (Bäume, Ufer, Wasserflächen etc.).
- Wohnlicht ist die Beleuchtung von privaten Gebäuden und Anlagen (funktionale Außenbeleuchtung, Gestaltungs- und Zierbeleuchtung, Licht, das vom Gebäudeinneren nach außen strahlt etc.).

- Arbeitslicht ist die Beleuchtung für Industrie und Gewerbe (inklusive Gewächshäuser, Nachtbaustellen, Tankstellen und Geschäfte).

Dieser Einteilung übergeordnet ist die Unterscheidung von öffentlichen und privaten Lichtquellen:

- Öffentliches Licht ist die Beleuchtung aus öffentlicher Hand. Es umfasst insbesondere die kommunale Straßenbeleuchtung, aber auch Anstrahlungen von Gebäuden u. Ä.
- Privates Licht ist alles nichtöffentliche Licht im Gewerbe- und Handelsbereich sowie von Privatpersonen, z. B. im Umfeld von Wohnhäusern.

Die komplexe Definition von Lichtverschmutzung und die Diversität der zu betrachtenden Beleuchtungsquellen und -zwecke verdeutlichen die Herausforderungen, die sich bei der Beschäftigung mit dem Thema Lichtverschmutzung und der Erarbeitung von Handlungsoptionen zu ihrer Steuerung und Begrenzung ergeben. Nach welchen Kriterien lässt sich eine verschmutzende Wirkung von Lichtemissionen von welcher Quelle und auf welche Betroffenen konstatieren? Wie kann der Umfang der Belastung bzw. der Verschmutzung bemessen werden? Wann übersteigen die mit einer Beleuchtung einhergehenden negativen Folgen der Lichtverschmutzung den Nutzen aus dem eigentlichen Beleuchtungszweck? Zur Beantwortung dieser Fragen erfolgt im Rahmen dieser Untersuchung eine notwendige Engführung auf die Wirkung von Beleuchtung im Außenbereich. Der umfangreiche Forschungsstand zur Wirkung von künstlicher Beleuchtung allgemein auf den Menschen (z. B. auch durch Innenraumbeleuchtung, Monitore und Displays etc.) wird hier nur insofern berücksichtigt, als sich daraus Aussagen zu Wirkungen von Außenbeleuchtung bei Nacht ableiten lassen (Kap. 3.2).

Das Thema Lichtverschmutzung gewinnt auch zunehmend an politischer Relevanz. Zwar existieren in Deutschland keine verbindlichen Grenzwerte für Belastungen mit zu viel Licht, aber Licht wird im Bundes-Immissionsschutzgesetz[1] (BImschG) zu den Immissionsarten gezählt, von denen unter Umständen eine umweltschädliche Wirkung ausgeht. In Frankreich, Slowenien, Italien und Spanien wurden bereits erste Gesetze zur Eindämmung von Lichtverschmutzung verabschiedet (Morgan-Taylor 2015; Schulte-Römer et al. 2018).

Aktuell eröffnen die lichttechnischen und -planerischen Entwicklungen sowie die Massenverfügbarkeit von LED ein Möglichkeitsfenster für neue technische und gestalterische Lösungen: LED-Produkte bieten aufgrund ihrer Fokussier- und digitalen Steuerbarkeit das Potenzial, Streulicht und Lichtverschmutzung gezielt einzudämmen, und sparen zudem im Vergleich zu Glühlampen erhebliche Mengen an Energie ein. Zugleich birgt LED-Beleuchtung aber auch neue

1 Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG)

Risiken hinsichtlich der Lichtverschmutzung, u.a. wegen des hohen Blauanteils im Lichtspektrum, dessen Auswirkungen auf Flora, Fauna und die menschliche Gesundheit noch weitgehend unbekannt sind, aber als tendenziell problematisch beurteilt werden (u.a. Falchi et al. 2011). Neue Trends in der städtischen Lichtplanung, der Lichtindustrie und in Normungsverfahren auf nationaler und europäischer Ebene bieten zugleich Ansätze zur Verringerung der Trade-offs zwischen Zielen und unerwünschten Folgen künstlicher Beleuchtung.

Ziel und Aufbau des Berichts

Vor diesem Hintergrund hat der Deutsche Bundestag das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) beauftragt, eine Untersuchung mit dem Titel »Lichtverschmutzung – Ausmaß, gesellschaftliche und ökologische Auswirkungen sowie Handlungsansätze« durchzuführen. Der vorliegende Arbeitsbericht des TA-Projekts fasst den gegenwärtigen Wissensstand zum Thema einschließlich der Möglichkeiten zur Steuerung und Begrenzung von Lichtverschmutzung zusammen (auftragsgemäß wird deshalb nicht auf die vielfältigen positiven Auswirkungen von Licht z.B. auf die Gesundheit von Menschen eingegangen). Dadurch soll die Debatte um die Vor- und Nachteile künstlicher Beleuchtung in der Nacht intensiviert und eine evidenzbasierte politische Begleitung laufender lichtplanerischer und technischer Entwicklungen ermöglicht werden. Bei der Interpretation der hier dargestellten Erkenntnisse ist zu beachten, dass die wissenschaftliche Forschung zu den Wirkungen künstlicher Beleuchtung in der Nacht auf die menschliche Gesundheit sowie auf die Lebensbedingungen von Tieren und Pflanzen und das Funktionieren von Ökosystemen noch weitgehend am Anfang steht. Für einige Fragestellungen ist daher noch keine abschließende wissenschaftlich fundierte Aussage über kausale Wirkzusammenhänge möglich. Zudem zeichnen sich Handlungsmöglichkeiten ab, die im Sinne der Vorsorge vor nachteiligen Wirkungen zunehmender künstlicher Außenbeleuchtung bei Nacht empfehlenswert und relativ einfach umsetzbar sind.

Der Bericht ist folgendermaßen gegliedert: Zu Beginn werden Umfang sowie aktuelle Entwicklungstrends künstlicher Beleuchtung in der Nacht beschrieben und die angewendeten Erfassungs- und Messmethoden erläutert (Kap. 2). Anschließend wird der Stand des Wissens zu den verschiedenen Auswirkungen zunehmender künstlicher Beleuchtung dargestellt. Dazu wird zwischen wirtschaftlichen und soziokulturellen (Kap. 3.1), humanmedizinischen (Kap. 3.2) sowie ökologischen Wirkungen (auf Tiere und Pflanzen) (Kap. 3.3) unterschieden. Beleuchtung im Außenbereich und Lichtemissionen sind Gegenstand verschiedener Regulierungsansätze (sowohl in Deutschland als auch in europäischen Nachbarstaaten), die in Kapitel 4 beschrieben werden. Auch werden Möglichkeiten erörtert, wie die Anstrengungen zur Erreichung energieeffizienter Beleuchtung, zum Klimaschutz und zur Vermeidung bzw. Verringerung von Lichtverschmutzung

miteinander verbunden werden könnten. Aufbauend auf der Zusammenstellung des gegenwärtigen Wissens und der verfügbaren technischen und technologischen Optionen werden abschließend Handlungsansätze skizziert, die eine Verringerung der Lichtverschmutzung bei gleichzeitiger Berücksichtigung der nutzbringenden Ziele der Beleuchtung unterstützen (Kap. 5).

Gutachten und Danksagung

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Gutachten im Auftrag des Deutschen Bundestages zu spezifischen Themenbereichen erstellt:

- Ausmaß der Lichtverschmutzung und Optionen zur Minderung der negativen Auswirkungen. Kuechly, H.; Meier, J.; Kyba, C.; Hänel, A., LUP – Luftbild Umwelt Planung GmbH, Potsdam (Kuechly et al. 2018)
- Auswirkung der Lichtverschmutzung auf Fauna und Flora. Schroer, S.; Hölker, F., IGB – Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin (Schroer/Hölker 2018)

Außerdem wurde ein Gutachten im Auftrag des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung – UFZ angefertigt:

- Humanmedizinisch relevante Wirkungen von Lichtverschmutzung. Kantermann, T., SynOpus, Bochum (Kantermann 2018)

Diese Gutachten bildeten neben den eigenen Recherchen, Literaturauswertungen und Analysen eine wichtige Basis für den vorliegenden Bericht. Aus ihnen wurden Informationen, Abbildungen, Tabellen und Textteile entnommen, überarbeitet, neu zusammengestellt, ergänzt und zum vorliegenden Bericht synthetisiert. Die Verantwortung für die Auswahl, Strukturierung und Verdichtung des Materials liegt selbstverständlich bei den Verfassern dieses Berichts. Den Gutachterinnen und Gutachtern sei für ihre Arbeit und Diskussionsbereitschaft sehr herzlich gedankt.

Ebenfalls in das Gutachten eingeflossen sind die Ergebnisse einer internationalen Expertenbefragung, die 2018 am UFZ in Leipzig durchgeführt wurde (Schulte-Römer et al. 2018). Allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern an der Expertenbefragung sei an dieser Stelle gedankt.

Dank gebührt auch Johannes Schiller, Arnold Sauter und Claudio Caviezel für die kritische Begleitung der Erstellung dieses Berichts; ebenso Anne Wessner, Brigitta-Ulrike Goelsdorf und Carmen Dienhardt für die Aufbereitung der Abbildungen, die Durchsicht und Korrektur des Manuskripts sowie die Erstellung des Endlayouts.

2 Umfang und Trends künstlicher Außenbeleuchtung in der Nacht

Bevor der Wissensstand zu möglichen Wirkungen der zunehmenden Erhellung des Nachthimmels und der Umgebung dargestellt wird, werden in diesem Kapitel der erreichte Umfang künstlicher Außenbeleuchtung in der Nacht beschrieben und die dabei beobachtbaren Entwicklungstrends nachgezeichnet. Dazu gibt es nachfolgend einen Einblick in bestehende Messmethoden für die verschiedenen Facetten der Lichtemissionen und die Anwendungsmöglichkeiten dieser unterschiedlichen Methoden (Kap. 2.1). Daran anschließend wird die räumliche und zeitliche Variabilität künstlicher Beleuchtung näher analysiert (Kap. 2.2). Schließlich werden die zentralen Erkenntnisse aus aktuellen wissenschaftlichen Erhebungen zu Ausmaß und Trends der Lichtemissionen in Europa und Deutschland dargelegt (Kap. 2.3).

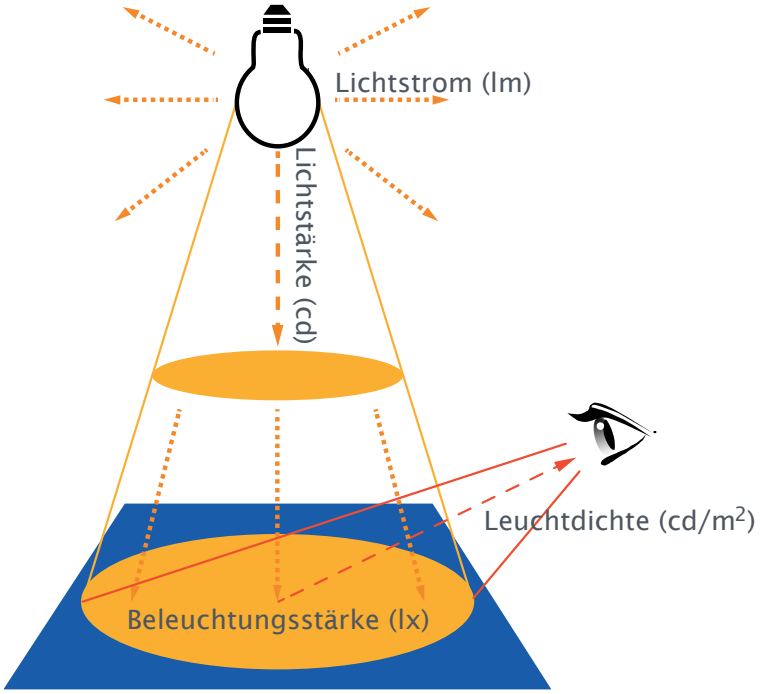
2.1 Methoden zur Erfassung und Messung künstlicher nächtlicher Beleuchtung

Lichtemissionen und die in Kapitel 1.2 dargestellten Aspekte der Lichtverschmutzung können mit unterschiedlichen Methoden gemessen werden, die jeweils bestimmte Vorteile, aber auch Einschränkungen aufweisen. In diesem Kapitel werden nach einer kurzen Einführung in fotometrische Begriffe verschiedene Methoden skizziert und hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten und der Aussagekraft ihrer Ergebnisse beschrieben. Dazu zählen neben geodatenbasierten Leuchtenkatastern horizontale und vertikale Fotografien sowie die Messung oder Modellierung der Himmelshelligkeit.

2.1.1 Wichtige fotometrische Messgrößen

Fotometrische Größen werden zur Messung und Bewertung von Lichtmengen genutzt. Sie sind aus zugehörigen radiometrischen Größen abgeleitet, allerdings wird in der Fotometrie die Empfindlichkeit des menschlichen Auges über Hellempfindlichkeitskurven berücksichtigt. Während radiometrische Messungen auch für den Menschen nicht sichtbare Spektralbereiche umfassen, beziehen sich fotometrische Größen auf den für Menschen typischerweise sichtbaren Spektralbereich der Wellenlängen von 380 bis 780 Nanometern (nm). Fotometrische Messgrößen bilden die Grundlage für die Festlegung von Normen und Grenzwerten für die künstliche Beleuchtung und werden für die Planung und Messung von Beleuchtungsanlagen verwendet. In Abbildung 2.1 wird der Zusammenhang der fotometrischen Messgrößen illustriert.

Abb. 2.1 Fotometrische Messgrößen



Quelle: BAFU 2017, S. 121

Der *Lichtstrom* ist die gesamte von einer Lichtquelle in alle Richtungen abgestrahlte Lichtleistung in Form sichtbaren Lichts, gemessen in Lumen (lm). Eine klassische Glühlampe mit 25 Watt (W) Leistungsaufnahme liefert einen Lichtstrom von 220 lm. Den gleichen Lichtstrom erreicht z. B. eine LED-Lampe bereits mit 2 W Leistungsaufnahme (Stand 2017) (Kuechly et al. 2018).

Zur Beurteilung einer Lichtquelle ist nicht nur die Frage von Interesse, welchen Lichtstrom die Quelle insgesamt abgibt, sondern auch die Richtungscharakteristik dieses Lichtstroms. Die *Lichtstärke* beschreibt daher den in einen bestimmten Raumwinkelbereich abgestrahlten Lichtstrom. Die Einheit der Lichtstärke ist Candela (cd), abgeleitet vom lateinischen Wort für Kerze, da diese typischerweise mit einer Lichtstärke von 1 cd strahlt.[2]

Als *Beleuchtungsstärke* wird der insgesamt auf eine bestimmte Fläche einfallende Lichtstrom bezeichnet. Die Maßeinheit ist das Lux (lx), gleichbedeutend mit lm/m². Zur Messung werden Beleuchtungsstärkemesser (Luxmeter) eingesetzt.

2 Die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung ist der Quotient aus dem von der Lichtquelle in diese Richtung ausgesandten Lichtstrom (Einheit Lumen – lm) und dem durchstrahlten Raumwinkel (Einheit Steradiant – sr). Eine typische Haushaltskerze sendet einen Lichtstrom von etwa 12 lm in alle Richtungen. Der Lichtstrom verteilt sich also gleichmäßig auf den Raumwinkel von 4π sr, die Lichtstärke (Lichtstrom pro Steradiant) beträgt daher 12 lm/4π sr ≈ 1 lm/sr = 1 cd.

Die *Leuchtdichte* beschreibt die Helligkeit, wie sie dem Auge auf einer Fläche erscheint. Gemessen wird sie mit Leuchtdichtemessgeräten in cd/m². Die Leuchtdichte einer angestrahlten Fläche (z. B. einer Straße) wird von der Beleuchtungsstärke und der Reflexionscharakteristik der Fläche bestimmt. Bei hellen Flächen mit hoher Reflexivität wird mit geringerer Beleuchtungsstärke die gleiche Leuchtdichte erreicht wie bei einer dunkleren Fläche mit höherer Beleuchtungsstärke. Helle Straßenoberflächen können daher mit geringerer Lichtmenge beleuchtet werden, um den gleichen Helligkeitseindruck zu erhalten. Neben der Farbe hängt die Reflexivität – und damit (bei konstanter Beleuchtungsstärke) die Leuchtdichte einer Fläche – von vielen weiteren Faktoren ab, z. B. dem Blickwinkel, der Oberflächenbeschaffenheit oder davon, ob die Fläche trocken oder nass ist.

Die *Himmelshelligkeit* entsteht durch emittiertes und von der Erdatmosphäre reflektiertes Licht (Kap. 1.1.5) und hängt von vielen Faktoren ab, z. B. vom Mondschein, vom Vorhandensein heller Sterne oder von der Milchstraße, aber auch von Witterungsbedingungen (Wolken, Nebel) und dem Grad der Luftverschmutzung. Daher werden Einzelmessungen bei mond- und wolkenlosem Himmel durchgeführt. Mithilfe der Messung der Himmelshelligkeit kann der Grad der Lichtverschmutzung ermittelt werden. So beträgt die typischerweise gemessene Himmelshelligkeit vor dem Reichstagsgebäude im Innenstadtbereich Berlins 10,8 mcd/m². In ländlichen Gebieten werden entsprechend niedrigere Werte gemessen. Als natürlich dunkler Himmel in einer mond- und wolkenlosen Nacht wird eine Himmelshelligkeit von etwa 0,2 mcd/m² angesehen. Solche Werte werden z. B. im Sternenpark Westhavelland gemessen (Kuechly et al. 2018).

Die *Farbtemperatur* ist ein Maß, um den Farbeindruck einer Lichtquelle quantitativ zu bestimmen. Als Grundlage der Bemessung der Farbtemperatur dient ein idealtypischer schwarzer Körper, der sämtliches auftreffende Licht verschluckt. Erhitzt man diesen, fängt er irgendwann an, rotes Licht zu emittieren, das mit weiter ansteigender Temperatur über gelbe Farbtöne immer weißer und schließlich hellblau wird. Die Farbtemperatur eines Leuchtmittels gibt im übertragenen Sinne an, wie heiß der schwarze Körper sein muss, um Licht in derselben Farbe auszustrahlen. Die Maßeinheit der Farbtemperatur ist Kelvin (K). Eine Kerze spendet Licht mit einer Farbtemperatur von ca. 1.500 K. Zugleich lassen sich aus der Farbtemperatur einer Leuchte Rückschlüsse auf die spektrale Zusammensetzung des ausgesendeten Lichts ziehen. Eine elektrische Leuchte mit einer niedrigen Kelvinzahl (bis etwa 3.300 K) spendet warmweißes Licht mit hohen Rotanteilen. Je höher der Kelvinwert, desto kühler ist die Lichtwirkung, da die blauen Spektralanteile zunehmen. Beispielsweise hat der Taghimmel eine Farbtemperatur von mehr als 10.000 K.

2.1.2 Leuchtenkataster

In einem auf Geodaten basierten Leuchtenkataster werden Position, Masthöhe, Leuchtentyp, Leuchtmittel, elektrischer Anschlusswert und Installationszeitpunkt öffentlicher Beleuchtungsanlagen erfasst. Das unterstützt die Betreiber bei einer effektiven Betriebsführung und der Planung von Reparaturen sowie beim Austausch von Leuchtmitteln. Zudem sind durch das Leuchtenkataster eine Überwachung und Lenkung des Energieverbrauchs möglich. Allerdings verfügt nur etwas mehr als die Hälfte der deutschen Kommunen über ein Leuchtenkataster (DENA 2013). Keines der existierenden Kataster dokumentiert private Lichtquellen.

Um die Effektivität der Beleuchtung zu erfassen, wäre zusätzlich die Kenntnis der Verteilung der Lichtabstrahlungen einer Anlage hilfreich. Diese in Lichtverteilungskurven erfassten Daten sind aber oft nur für neuere Leuchtenmodelle verfügbar. Solche erweiterten Kataster wurden z. B. in den deutschen Sternenparks erstellt, um den Anteil des ungenutzt in den oberen Halbraum abgestrahlten Lichts zu bestimmen (Kuechly et al. 2018).

2.1.3 Horizontale Luft- und Satellitenbildaufnahmen

Da die Atmosphäre relativ transparent ist, kann künstliches Licht große Entfernungen zurücklegen, ohne seine Richtung zu ändern. Deshalb kann nächtliche Beleuchtung von oben, also aus der Luft oder dem Weltall, fotografisch dokumentiert werden (Abb. 2.2). In Abhängigkeit von der räumlichen und radiometrischen Auflösung des abbildenden Sensorsystems können Informationen über die Leuchtdichte (Helligkeit) und die spektrale Zusammensetzung (Farbe) der Beleuchtung gewonnen werden (Kuechly et al. 2018).[3]

Die saisonale Variabilität der Dauer der Nächte sowie die Schneebedeckung (die zu einer bis zu 10-fach erhöhten Bodenreflexion führen kann), Wolkenbedeckung, Vegetation (Belaubung von Bäumen u. Ä.) und Bodenfeuchte beeinflussen die nächtliche Fernerkundung (Levin 2017; Levin/Zhang 2017). In Deutschland besteht im Oktober und November die höchste Wahrscheinlichkeit, dass erhobene Daten fehlerfrei sind (Kuechly et al. 2018).

Es gibt drei Hauptquellen für Nachtaufnahmen von der Erdoberfläche:[4]

- Luftbilder von Flugzeugen, Ballonen oder Drohnen,
- Fotografien von Astronauten auf der Internationalen Raumstation (ISS),
- nächtliche Satellitenbeobachtungen.

3 Mit den heute überwiegend eingesetzten Messsystemen können nur begrenzt spektrale Informationen bestimmt werden. Es ist daher nicht möglich, Lampentypen eindeutig mithilfe von Luftbildern zu identifizieren (Kuechly et al. 2018).

4 Eine detaillierte Diskussion der Methoden einschließlich ihrer Vorzüge und Nachteile findet sich in Kyba et al. (2015a).

Abb. 2.2 Nächtliches Berlin, fotografiert von der ISS am 31. März 2016

Quelle: Image ISS047-E-29989 Earth Science and Remote Sensing Unit, NASA Johnson Space Center

Luftbilder von Flugzeugen, Ballonen oder Drohnen liefern Bilder höchster räumlicher Auflösung, allerdings benötigen solche Aufnahmen gesonderte Bildflüge und oft auch spezielle Ausrüstung, z. B. für Präzisionsnavigation und Stabilisierung. Bildflüge für große Flächen erstrecken sich über mehrere Stunden, und die Muster der darzustellenden Aktivitäten können sich in dieser Zeit ändern. Im Falle von Flugzeugen wird die Terminplanung für derartige Aufnahmen (sowohl tages- als auch jahreszeitlich) oft durch Einschränkungen für Starts und Landungen auf Flughäfen beeinträchtigt. Dies und die begrenzten Finanzmittel für derartige Nachtaufnahmen haben den Einsatz der Methode bislang auf wenige Städte und Regionen weltweit eingeschränkt (Hale et al. 2013; Kuechly et al. 2012; Ruhtz et al. 2015).

Astronauten auf der ISS fotografieren gelegentlich die Erde in der Nacht mit herkömmlichen Kameras. Die Aufnahmen werden von den Astronauten meist aus privatem Interesse und nur selten zu wissenschaftlichen Zwecken im Auftrag der Raumfahrtbehörden gemacht. Deshalb sind die verfügbaren Bilder nicht repräsentativ: Große Städte in Europa und Nordamerika werden weitaus häufiger fotografiert als ländliche Regionen und Orte in Entwicklungsländern. Zudem werden meist ganze Städte oder größere Regionen fotografiert (Abb. 2.2), wodurch der räumlichen Auflösung Grenzen gesetzt sind. Auch die

schnelle Bewegung der Raumstation gegenüber der Erdoberfläche stellt eine Herausforderung bei der Erzielung hochauflösender Bilder dar. Von Vorteil ist hingegen die variable Überflugzeit der ISS, wodurch zu jeder Nachtzeit Aufnahmen gemacht werden können. Dies bietet das Potenzial, zeitliche Veränderungen über den Verlauf der Nacht zu dokumentieren, auch wenn Aufnahmen von verschiedenen Tagen verwendet werden (Kyba et al. 2015a).

Satellitenbilder bieten die Möglichkeit, die Lichtemissionen von der Erdoberfläche in den Weltraum auf globaler Skala zu bewerten. Die Nutzbarkeit der Daten älterer Messinstrumente wie dem DMSP OLS (Defense Meteorological Satellite Program Operation Linescan System) ist wegen der geringen räumlichen Bodenauflösung (5 km) und fehlenden Kalibrierungsmöglichkeiten an Bord der Satelliten stark eingeschränkt. Im Gegensatz dazu liefert das moderne Satellitensystem VIIRS DNB (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day-Night Band) global kalibrierte Daten mit einer räumlichen Bodenauflösung von ungefähr 750 m bei höherer Messempfindlichkeit und radiometrischer Genauigkeit als beim DMSP OLS (Miller et al. 2013). Diese Daten werden von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) des U.S. Department of Commerce zu den ersten global verfügbaren Datensätzen zur nächtlichen Außenbeleuchtung zusammengefügt. Leider fehlt dem VIIRS-DNB-Sensor die Empfindlichkeit im blauen Spektralbereich (Licht mit Wellenlängen von weniger als 500 nm), dadurch erscheint das Licht von LED, das einen hohen Blauanteil aufweist, mit einer um etwa 30 % reduzierten Helligkeit gegenüber der tatsächlichen Leuchtdichte. Trendanalysen geben wegen des gegenwärtig weltweit stattfindenden Austauschs orangefarbener Natriumdampflampen (mit geringem Blauanteil) durch weiße LED (mit hohem Blauanteil) die tatsächliche Veränderung der Beleuchtungssituation verzerrt wieder (Sánchez de Miguel et al. 2017, nach Kuechly et al. 2018). Zudem kann durch Satellitenaufnahmen nicht zwischen direkt aufwärts gerichteter und vom Boden reflektierter Lichtstrahlung unterschieden werden. Direkt aufwärts gerichtete Lichtstrahlung erzeugt typischerweise ein zehnfach helleres Signal als die gleiche Lichtmenge, die gegen den Boden gerichtet ist. Aus ähnlichem Grund sind horizontal abgestrahltes Licht und schmale Lichtbündel mit Satelliten nicht gut erkennbar (Kyba et al. 2015a).

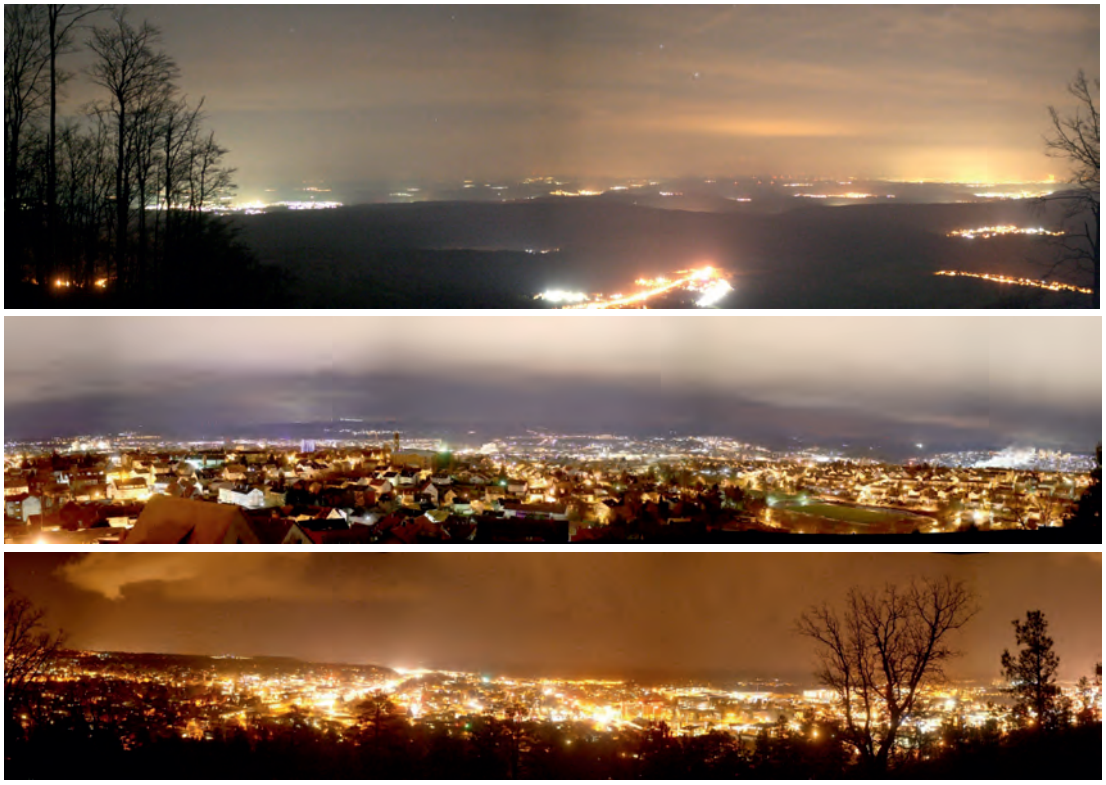
Eine kostenintensive und daher bislang wenig angewendete alternative Messmethode ist der Einsatz von abbildenden Spektrometern oder Hyperspektralkameras (Metcalf 2012). Bei diesen Systemen enthält jeder Pixel der Aufnahme spektrale Informationen, was es erlaubt, die jeweilige Beleuchtungsart (d. h. Lampentypen) zu identifizieren. Der Erfolg von am Boden eingesetzten Hyperspektralkameras lässt vermuten, dass derartige Systeme auch beim Einsatz in der Luft oder im All sehr erfolgreich sein könnten (Bará et al. 2017; Dobler et al. 2016). In den nächsten Jahren kann zudem erwartet werden, dass durch das System NITESat (Night Imaging and Tracking Experiment Satellite)

multispektrale Aufnahmen mit einer mittleren Auflösung bereitgestellt werden (Pack et al. 2017; Walczak et al. 2017).

2.1.4 Vertikale Fotografien

Beleuchtungssituationen können auch aus einer vertikalen Perspektive fotografisch dokumentiert werden. Dies ist sowohl von festen Standorten wie höheren Gebäuden oder Bergen aus möglich als auch mithilfe von Kameras auf Drohnen oder Fahrzeugen. Durch die vertikale Perspektive können jene Lichtanteile erfasst werden, die unter flachen Winkeln in der Horizontalen abgestrahlt werden und zur Himmelsaufhellung beitragen. Ebenso können Lichtquellen erfasst werden, die in horizontalen Aufnahmen verdeckt sind, etwa von laubbedeckten Bäumen.

Abb. 2.3 Vertikale Fotografien des Nachthimmels in Deutschland und den USA



Panoramen vom Kreuzberg/Rhön (oben) nach Süden mit zahlreichen Orten, die stark in die Horizontale abstrahlen. Die Panoramen von Fulda (Mitte) und Flagstaff (USA) (unten) zeigen den höheren Weißanteil in Fulda.

Foto: A. Hänel

Je nach Erkenntnisinteresse werden die Aufnahmen aus größerer Entfernung (Dokumentation größerer Gebiete bzw. gesamter Städte, um eine Gesamtsituation zu beurteilen; Abb. 2.3) oder aus der Nähe gemacht (z. B. Dokumentation kleinerer Bereiche in einer Stadt, um die Zusammensetzung aus einzelnen Lichtquellen möglichst detailliert aufzunehmen; Abb. 2.4) (Kuechly et al. 2018).

Abb. 2.4 Vertikale Aufnahmen des Nachthimmels vor und nach der Umrüstung von Beleuchtungsanlagen in Szekszárd (Ungarn)

Foto: Z. Kolláth

Die Auswertungsmöglichkeiten vertikaler Aufnahmen sind mit jenen der horizontalen Fotografie vergleichbar. So können mittels hyperspektraler Auswertungen die im Innenraum wie auch im Außenraum genutzten Leuchtmittel empirisch festgestellt werden (Dobler et al. 2016). Vertikale Fotografien können

darüber hinaus für Vergleiche genutzt werden, etwa zwischen unterschiedlichen Nachtlandschaften (z. B. verschiedene Städte; Abb. 2.3) oder an ein und demselben Ort im Zeitverlauf, etwa bei Veränderungen in der Beleuchtungsinfrastruktur oder im Laufe einer Nacht (Kap. 2.2). Voraussetzung für solche Vergleiche sind die gleichbleibende Perspektive sowie identische Kameraeinstellungen (Kuechly et al. 2018).

Die Auswirkungen von Veränderungen in der Beleuchtung, wie sie beispielsweise bei der Modernisierung von Straßenbeleuchtungsanlagen vorkommen, können mittels differenzieller Fotometrie erfasst werden. Dabei wird ein kalibriertes Bild vor der Änderung mit einer Aufnahme nach der Änderung verglichen. Beispielsweise führten Kolláth et al. (2016) entsprechende Untersuchungen zum Übergang von Natriumhochdruckdampflampen mit starkem Aufwärtsstrahlungsanteil zu vollständig abgeschirmter LED-Beleuchtung in mehreren ungarischen Städten durch (Abb. 2.4). Dabei konnte eine signifikante Reduktion der Himmelshelligkeit nachgewiesen werden, besonders im roten Spektralbereich.

2.1.5 Messung und Simulation der Himmelshelligkeit

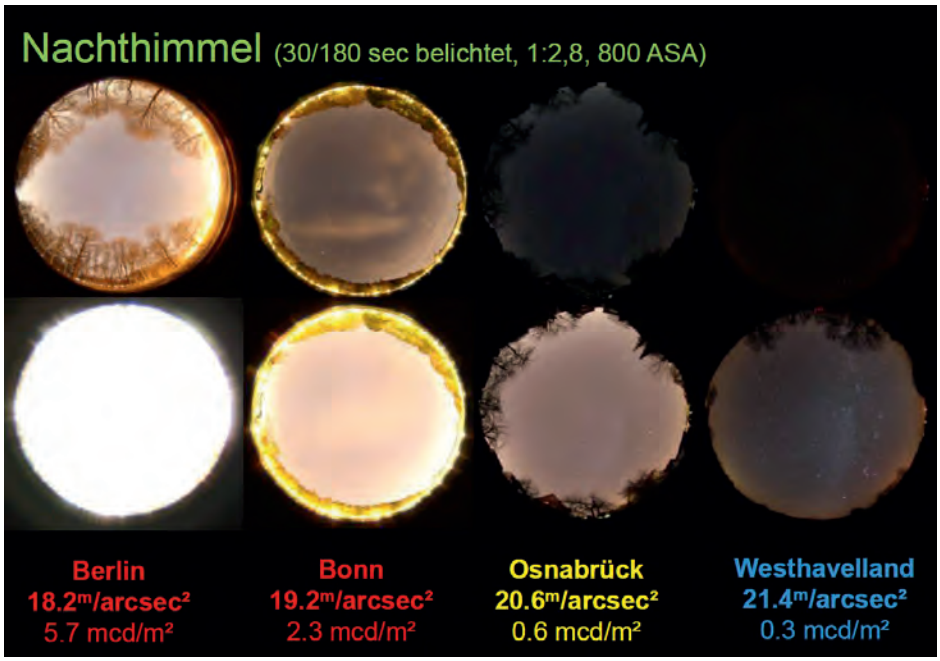
Die Himmelshelligkeit in der Nacht setzt sich zusammen aus natürlichen extraterrestrischen (Mond, Sterne) bzw. atmosphärischen Lichtquellen (z. B. Polarlichter und Airglow, dem natürlichen Nachthimmelsleuchten) sowie dem künstlichen Himmelsleuchten. Diese künstliche Himmelshelligkeit entsteht durch emittiertes oder reflektiertes Licht aus terrestrischen Beleuchtungsanlagen, das von der Erdatmosphäre zurückgestreut wird.

Bei der Messung wird zwischen der gesamten Himmelshelligkeit (alles Licht inklusive der Sterne) und der Himmelshintergrundhelligkeit (nur das Licht des Hintergrunds, also zwischen den Sternen) unterschieden. Die Qualität des Nachthimmels kann mithilfe der schwächsten, gerade noch sichtbaren Sterne bestimmt werden: Je heller der Himmelshintergrund ist, desto weniger schwach leuchtende Sterne sind zu sehen, die Grenzhelligkeit, also die Helligkeit der gerade noch sichtbaren Sterne, steigt. Zur Bestimmung dieser Grenzhelligkeit werden die schwächsten sichtbaren Sterne um den Polarstern in der Polsequenz oder die Anzahl der sichtbaren Sterne in festgelegten Himmelsregionen bestimmt (Hänel et al. 2018). Bei dieser Erfassungsmethode haben sich auch Ansätze der Citizen Science als hilfreich erwiesen, z. B. bei der Dokumentation sichtbarer Sterne durch private Nutzerinnen und Nutzer einer speziellen Smartphoneapplikation (u. a. Kyba 2018).

Daneben kann die Himmelshelligkeit auch direkt gemessen werden. Moderne Digitalkameras sind inzwischen so empfindlich, dass sie besonders das grüne Nachthimmelsleuchten (Airglow) abbilden und sich dadurch als optimale und relativ günstige Messgeräte erweisen (Hänel et al. 2018). Es gibt ver-

schiedene Ansätze einer automatischen Auswertung von Fischaugenaufnahmen (Kolláth 2010; Nievas Rosillo 2013), durch die Größen für die Himmelshelligkeit abgeleitet werden können. In Abbildung 2.5 ist beispielhaft eine solche Auswertung für vier verschiedene Standorte in Deutschland dargestellt.

Abb. 2.5 Aufnahmen von Himmelsansichten in Deutschland mithilfe einer Fischaugenoptik



Aufnahmen mit Belichtungszeiten von 30 (obere Reihe) und 180 Sekunden (untere Reihe) bei sonst gleichen Kameraeinstellungen.

Foto: A. Hänel

Wenn Lichtquellen bekannt sind, sei es aus Beleuchtungsinventaren oder aus Fernerkundungsdaten, dann kann die Himmelshelligkeit mit Strahlungstransportmodellen simuliert werden (Aubé/Kocifaj 2012). Dafür entwickelte Computerprogramme modellieren die Reflexion und Absorption von Licht an Bodenflächen (und bodennahen Objekten) sowie die Streuung und Absorption des Lichts in der Atmosphäre. Es gibt bei diesen Programmen erhebliche Unterschiede bezüglich ihrer Fähigkeit, die Realität abzubilden. Zwei der am weitesten entwickelten Modelle werden hier vorgestellt.

Das Illumina-Modell erlaubt gegenwärtig die detaillierteste Simulation der Himmelshelligkeit in physikalischer Hinsicht (Aubé 2015). Es verwendet die aus der geometrischen Optik stammende Strahlenverfolgung und benötigt Zugang zu einem Supercomputer: Jede vollständige Simulation der Himmelshel-

ligkeit benötigt das Äquivalent von fast 1 Jahr Rechenzeit auf einem typischen Laptop. Mit Illumina wird die Himmelshelligkeit an einem bestimmten Ort für mehrere Blickrichtungen berechnet und diese dann für den gesamten Himmel interpoliert. Es eignet sich am besten für detaillierte lokale Simulationen. So können Modellierungsergebnisse potenziellen Nutzern per Simulation demonstrieren, welchen Effekt eine Umrüstung von Natriumdampflampen auf LED-Beleuchtung haben würde. Aufgrund des hohen Rechenaufwands sind solche Simulationen bisher weltweit nur für 41 Standorte durchgeführt worden (Kuechly et al. 2018).

Falchi et al. (2016) verwendeten in ihrem Weltatlas ein physikalisch weniger detailliertes, aber wesentlich schnelleres Simulationsmodell. Mit dem Atlas kann deshalb die Himmelshelligkeit weltweit abgeschätzt werden. Ein Nachteil ist, dass die Himmelshelligkeit nur für den Zenit und nicht für alle Blickrichtungen berechnet wird. Das künstliche Himmelsleuchten ist aber häufig am Horizont am hellsten. Deshalb kann ein Ort, bei dem die Himmelshelligkeit im Zenit scheinbar frei von Lichtverschmutzung ist, trotzdem eine erhöhte Helligkeit am Horizont (bzw. generell außerhalb des Zenits) aufweisen (Jechow et al. 2017).

2.1.6 Einsatzmöglichkeiten der Methoden

Mit den vorgestellten Methoden können unterschiedliche Lichtemissionen und Beleuchtungssituationen an verschiedenen Standorten und zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen und miteinander verglichen werden. Die Auswahl einer konkreten Methode hängt davon ab, ob direkte Lichtemissionen bestimmt werden sollen (z. B. einer Straßenbeleuchtung) oder das diffus in den Himmel reflektierte Licht, das zur Himmelsaufhellung beiträgt (Kap. 1.1). In Tabelle 2.1 sind die Einsatzmöglichkeiten und spezifische Vor- und Nachteile einzelner Messmethoden zusammengefasst.

Tab. 2.1 Verschiedene Messmethoden für Lichtemissionen im Vergleich

Methode	Einsatz	Vor- und Nachteile
Leuchtenkataster	Erfassung direkter Lichtemissionen	(+) detaillierte fotometrische Daten ermöglichen die Bestimmung konkreter Emissionsniveaus (Intensität, Spektrum) (–) nicht flächendeckend verfügbar (–) häufig nur öffentliche Straßenbeleuchtung erfasst (–) Verteilung der Lichtabstrahlungen einer Anlage häufig nur für neue Anlagen erfasst

horizontale Fotografie	Erfassung nach oben abgestrahlter Lichtemissionen	(+)	großflächige Erfassung der Lichtemissionen, teilweise georeferenziert
		(–)	Messergebnisse abhängig von klimatischen und saisonalen Faktoren (Belaubung, Wolkenbedeckung, Bodenfeuchte)
		(–)	mit zunehmender Auflösung kostenintensiv
		(–)	nur beschränktes Spektrum erfasst
vertikale Fotografie	Erfassung der: Beleuchtungssituation vor Ort; seitlichen Lichtemissionen; Blendwirkung	(+)	groß- und kleinräumige Erfassung der Lichtemissionen möglich
		(+)	Erfassung seitlicher Lichtemissionen und der Blendwirkung möglich
		(+)	Vergleich von Beleuchtungssituationen zu unterschiedlichen Zeitpunkten möglich
		(–)	eingeschränkte Erfassung des nach oben emittierten Lichts
		(–)	Messergebnisse abhängig von klimatischen und saisonalen Faktoren
Messung der Himmelshelligkeit, z. B. mit Kamera und Fischaugenoptik	Erfassung der Himmelshelligkeit	(+)	einfach zu handhabende und kostengünstige Messmethoden
		(–)	Validität der Messergebnisse umstritten, fehlende Auswertungssoftware
		(–)	kaum Messdatenreihen verfügbar
Simulation der Himmelshelligkeit mit Strahlungstransportmodellen	Erfassung der Himmelshelligkeit	(+)	durch Modelle flächendeckende Helligkeitskarten erzeugbar (Atlas)
		(+)	Himmelshelligkeit an einem bestimmten Ort für mehrere Blickrichtungen simulierbar (Illumina)
		(+)	Effekt einer Umrüstung von Leuchtmitteln (z. B. in der Straßenbeleuchtung) simulierbar (Illumina)
		(–)	Simulation der Helligkeit in klaren Nächten (klimatische Faktoren unberücksichtigt) (Atlas)
		(–)	Helligkeitssimulation nur für Zenit (seitliche Abschattung, z. B. Berge, unbeachtet) (Atlas)
		(–)	enorm hoher Rechenaufwand für Simulation (Illumina)

Eigene Zusammenstellung auf Basis von Kuechly et al. 2018

2.2 Ausmaß und Variabilität künstlicher Beleuchtung in der Nacht

Künstliches Licht unterliegt erheblichen räumlichen und zeitlichen Variationen. Während ein Teil eines Weges hell ist, kann ein anderer Teil im Dunkeln liegen; beträchtliche Unterschiede existieren von einer Straße zur nächsten, von einer Stadt zur nächsten und von einem Land zum nächsten. Außerdem ist künstliche Beleuchtung zeitlich nicht statisch, sondern verändert sich im Verlauf der Nacht. Forschung zum Ausmaß und zu den Wirkungen dieser Variabilitäten findet jedoch nur begrenzt statt, da keine flächendeckenden Daten über künstliche Lichtquellen existieren. Häufig wissen nicht einmal die Betreiber öffentlicher Beleuchtung, wie viele Leuchten welcher Art sie betreiben. Dies verdeutlicht die Reaktion der Bundesregierung auf die Anfrage der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen (2015) von 2015: »Welche bundeseigenen Gebäude werden nachts angestrahlt, welche Lampen werden dafür verwendet, und wie hoch sind der Energieverbrauch und die Kosten für diese Beleuchtung? Sollten der Bundesregierung zum Energieverbrauch und zu den Kosten keine konkreten Zahlen vorliegen, auf welche Höhe schätzt die Bundesregierung den Energieverbrauch und die Kosten?«

Die Antwort der Bundesregierung (2015) lautete: »Eine gebäudebezogene Aufstellung aller nächtlich angestrahlten Liegenschaften der über 3.000 zivilen Dienstliegenschaften inklusive Nennung der verwendeten Lampen ist nicht möglich. Aufgrund der sukzessiven Übernahme von Bestandsgebäuden in das einheitliche Liegenschaftsmanagement ist zudem davon auszugehen, dass deutschlandweit verschiedene Leuchtmittel verwendet werden. Eine systemseitige Unterstützung ist nicht vorhanden. Daher bedürfte eine solche Aufstellung eines erheblichen personellen sowie zeitlichen Aufwandes von circa einem halben bis dreiviertel Jahr. Eine Aussage über den Gesamtenergieverbrauch und die Gesamtkosten kann durch die baulichen Gegebenheiten, bei denen in der Regel keine separate Messeinrichtungen für den Energieverbrauch der Beleuchtung vorgesehen sind, nicht getroffen werden.«

Zwar gibt es Fortschritte bei der Einstellung von Straßenlampen in geografische Informationssysteme (Arnold et al. 2012), aber bisher wurden diese Informationen kaum öffentlich zugänglich gemacht. Weitergehende Daten über private Beleuchtung existieren so gut wie nicht.

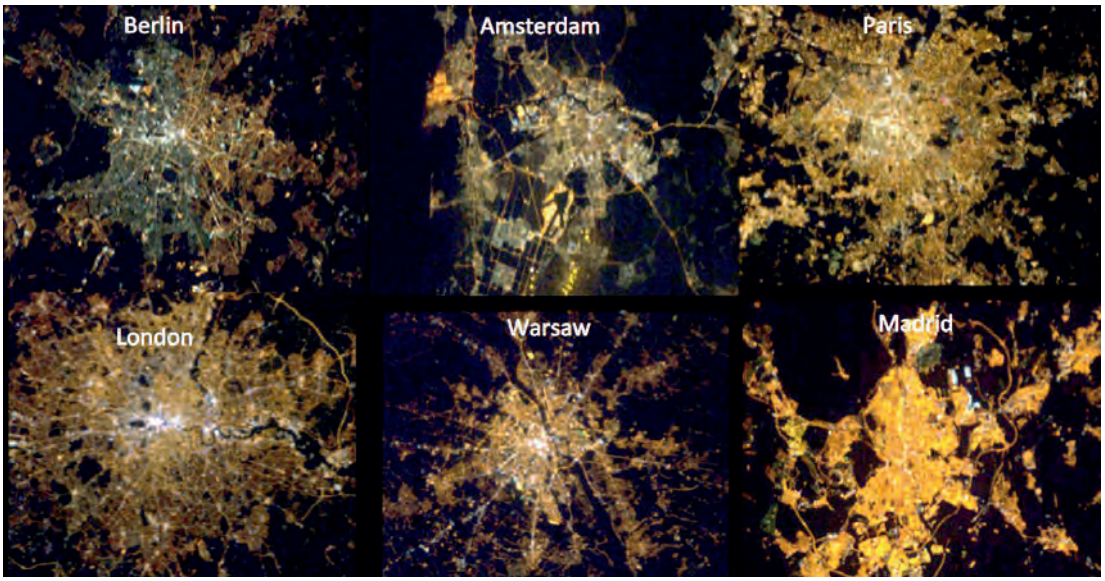
Daher basieren Untersuchungen über den Umfang und die räumliche Verteilung künstlicher Beleuchtung in der Nacht häufig auf Fotografien (entweder auf horizontalen Luft- bzw. Satellitenaufnahmen oder vertikalen Fotografien). Im Folgenden wird der Erkenntnisstand zu den Verteilungsmustern der Lichtemissionen (Kap. 2.2.1), der Himmelshelligkeit (Kap. 2.2.2) und den beobachtbaren zeitlichen Veränderungen künstlicher Beleuchtung näher betrachtet (Kap. 2.2.3).

2.2.1 Ausmaß und räumliche Verteilung des nach oben emittierten Lichts

Im Vergleich zu anderen europäischen Ländern sind die Intensität der Beleuchtung in der Nacht und das insgesamt in den Himmel emittierte Licht in Deutschland noch relativ gering. Als Hauptursache dafür wird die vergleichsweise zurückhaltende Nutzung künstlicher Beleuchtung im Außenbereich in Deutschland vermutet (Kuechly et al. 2018).

Illustriert wird diese Einschätzung beispielsweise durch Sánchez de Miguel (2015), der Satellitendaten zu den Lichtemissionen von 6 europäischen Hauptstädten aufgearbeitet hat (Abb. 2.6). Zu ähnlichen Befunden kamen Kyba et al. (2016), die Astronautenfotos für 22 europäische Städte verglichen. Nach dieser Studie rangierte die Strahlung von Straßenflächen in Berlin, München und Frankfurt (a.M.) auf dem 22., 19. und 12. Platz. Auch im Vergleich zu den USA ist Deutschland deutlich weniger hell beleuchtet. US-amerikanische Städte mit 10.000 Einwohnern sind durchschnittlich etwa dreimal heller als vergleichbar große Städte in Deutschland (Kyba et al. 2015a). Dieser Unterschied nimmt mit der Größe der Städte noch zu, sodass eine US-amerikanische Stadt von 100.000 Einwohnern typischerweise fünfmal heller ist als eine vergleichbare deutsche Stadt.

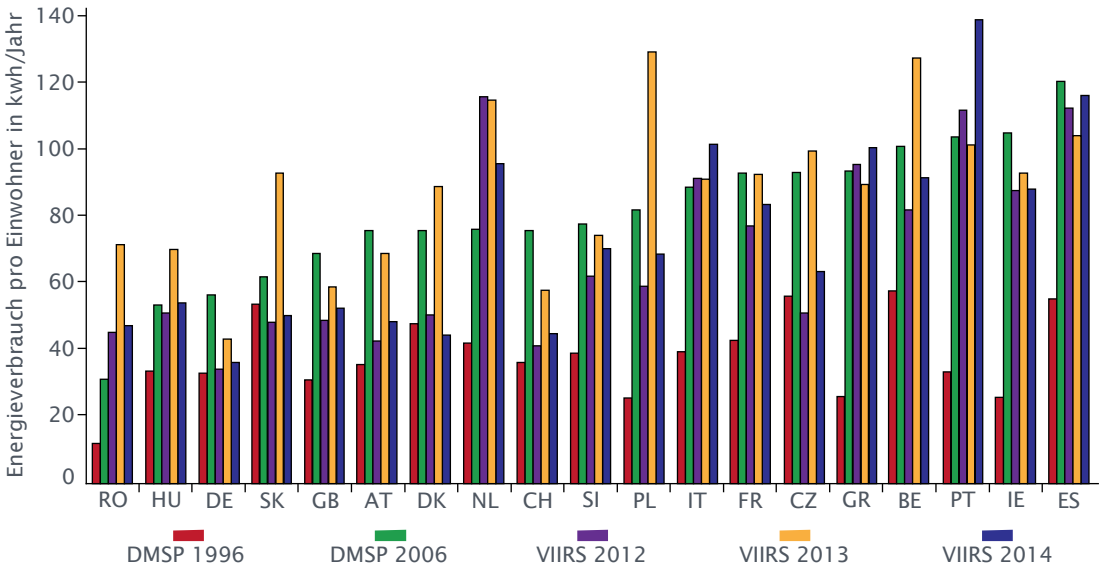
Abb. 2.6 Analyse von Satellitendaten der Lichtemissionen verschiedener europäischer Hauptstädte



Quelle: Earth Science and Remote Sensing Unit, NASA Johnson Space Center

Der Befund einer vergleichsweise moderaten Beleuchtungspraxis in Deutschland wird auch durch die Abschätzung des Pro-Kopf-Energieverbrauchs für künstliche Beleuchtung auf Grundlage von Satellitendaten zu den Lichtemissionen und Stromverbrauchswerten typischer Straßenbeleuchtungstechnik erhärtet (Sánchez de Miguel et al. 2014). Die in Abbildung 2.7 wiedergegebenen Resultate zeigen die erheblichen Unterschiede im so errechneten Stromverbrauch, der von einem Minimum von knapp unter 40 kWh je Einwohner und Jahr in Deutschland bis zu rund 100 kWh je Einwohner und Jahr in Spanien, Portugal und den Niederlanden reicht. Dabei spielen die unterschiedlichen Einwohnerdichten und damit die insgesamt zu beleuchtende Fläche ebenso eine Rolle, die in der Untersuchung allerdings nicht separat als Einflussfaktoren dargestellt wurden.

Abb. 2.7 Schätzung des Pro-Kopf-Energieverbrauchs pro Jahr für Beleuchtung in der Nacht in verschiedenen europäischen Ländern



Die verschiedenen Angaben je Land beruhen auf Messdaten unterschiedlicher Satellitensysteme und stellen daher eher eine Orientierung für Größenordnungen als exakte Verbrauchsdaten dar.

Quelle: Sánchez de Miguel 2015

Die beobachtbaren Unterschiede in der nächtlichen Beleuchtung beruhen auch auf unterschiedlichen historischen Entwicklungen. So zeigten Kyba et al. (2015a) auf Grundlage von Satellitendaten von 2012, dass Ostdeutschland im Durchschnitt heller als Westdeutschland beleuchtet wurde. Damals waren 77 % der ostdeutschen Gemeinden, aber nur 40 % der westdeutschen Gemeinden heller als der gesamtdeutsche Bundesdurchschnitt.

Auf der Ebene von Städten untersuchten Levin und Zhang (2017) Zusammenhänge zwischen den Lichtemissionen einer Stadt und dem jeweiligen Bruttoinlandsprodukt, der Stadtfläche, der Straßendichte, der geografischen Breite, der Vegetation und der Schneebedeckung. Mithilfe dieser Parameter waren die Autoren in der Lage, knapp die Hälfte der Variabilität zwischen den Städten zu erklären.

Kuechly et al. (2012) und Kyba et al. (2016) analysierten Luftbilddaten von Berlin und von Gemeinden in Oberösterreich. Die Untersuchungen zeigten, dass Straßen zwar einen wichtigen Anteil an den Lichtemissionen ausmachen, aber nicht die einzig relevanten Lichtquellen sind. In Berlin war die Straßenbeleuchtung zu etwa 32 % ursächlich für Lichtemissionen; in den kleineren Gemeinden von Oberösterreich waren es 16 bis 39 %. Andere Lichtquellen umfassen industriell, kommerziell oder durch öffentliche Einrichtungen genutzte Flächen und auch zentrale Innenstadtbereiche.

Schließlich sind Flughäfen eine wichtige Lichtquelle. So verursacht allein der Flughafen Berlin-Tegel Otto Lilienthal knapp 4 % der gesamten Lichtemissionen Berlins (Kuechly et al. 2012). Auch bei Flughäfen zeigen sich große Unterschiede in der Beleuchtungspraxis. So ist der Chicagoer O'Hare International Airport etwa 4,5-mal heller als der Tokyo International Airport Haneda, obwohl beide ungefähr die gleiche Passagierzahl abfertigen (Kyba et al. 2015a). Die Beleuchtung am Flughafen Frankfurt am Main ist 4- bis 7-mal heller als die des London Heathrow Airports und ist für über 20 % der gesamten Lichtemission der Stadt verantwortlich (Kyba et al. 2016).

2.2.2 Ausmaß und räumliche Verteilung der Himmelshelligkeit

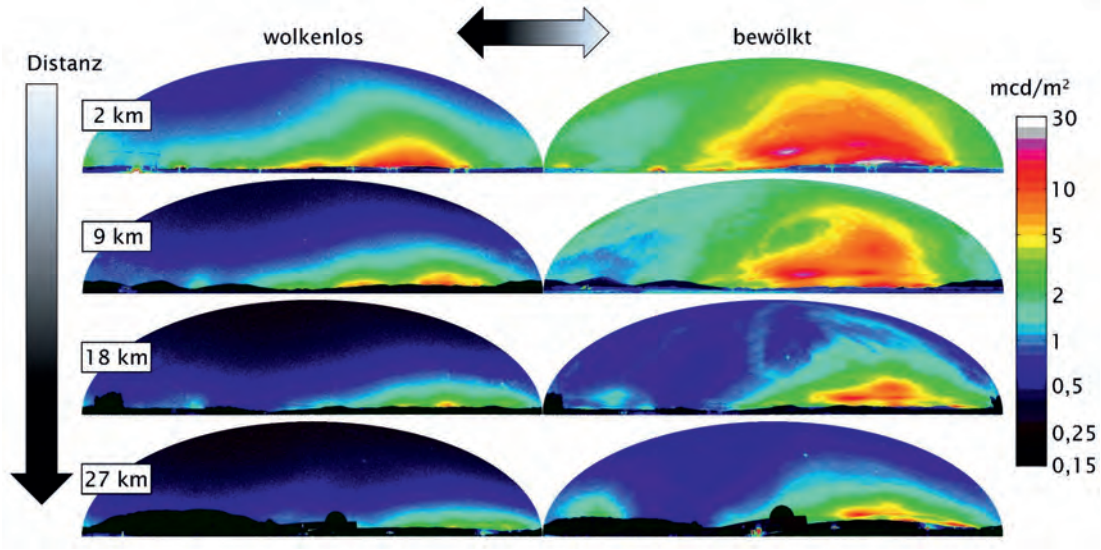
Die Himmelshelligkeit ist räumlich sehr unterschiedlich verteilt. Kyba et al. (2015b) stellten in ihrer Analyse von 44 Standorten weltweit fest, dass regionale Unterschiede in der Himmelshelligkeit in einer Größenordnung bis zu 1:10.000 auftreten. Ausgedrückt in Einheiten natürlicher Himmelshelligkeit (Natural Sky Unit – NSU) entsprach die Himmelshelligkeit in Kitt Peak (USA) etwa 0,22 NSU. Der Himmel war also dunkler als der typische natürliche Nachthimmel. Hingegen wurde in Schipluiden (Niederlanden) ein Wert gemessen, der etwa 2.200 NSU entsprach.[5]

Die Himmelshelligkeit variiert typischerweise in Abhängigkeit von zwei Faktoren: der Entfernung zur ursächlichen Lichtquelle und der Bewölkung

5 Die Messungen wurden mit einem Sky-Quality-Meter (SQM) durchgeführt, das die Helligkeit des Nachthimmels in Magnituden pro Quadratbogensekunde misst. Höhere Messwerte bedeuten dabei eine höhere Dunkelheit, d. h. eine geringere Aufhellung des natürlichen Nachthimmels. Die absoluten Messwerte der Himmelshelligkeiten betrugen 23,24 mag/arcsec^2 in Kitt Peak (USA) und 13,26 mag/arcsec^2 in Schipluiden (Niederlande). Ein natürlicher sternenklarer Nachthimmel weist eine Himmelshelligkeit von ca. 21,4 mag/arcsec^2 auf (Kyba et al. 2015b).

(Kuechly et al. 2018). In Abbildung 2.8 sind diese Zusammenhänge verdeutlicht: Je kleiner die Entfernung zu den Lichtquellen ist, z. B. in urbanen Zentren, desto höher ist die Himmelshelligkeit. Zudem reflektiert Bewölkung das nach oben emittierte Licht und sorgt so häufig für eine stärkere Erhöhung der Himmelshelligkeit als in wolkenlosen Nächten.

Abb. 2.8 Himmelshelligkeit in der Nähe von Balaguer (Spanien) in Abhängigkeit von Entfernung und unterschiedlicher Bewölkung



Quelle: Jechow et al. 2017, S. 3

Allerdings wurde der Zusammenhang zwischen Bewölkung und Himmelshelligkeit bislang in nur wenigen Studien untersucht (Jechow et al. 2016 u. 2017; Ribas et al. 2016). So ist nicht einmal bekannt, für welche Gebiete der Erde Wolken den Himmel heller und wo sie ihn immer noch dunkler machen. Denn Bewölkung reflektiert nicht nur nach oben emittiertes Licht, sondern kann auch natürliche Lichtquellen (Sterne, Mond, Airglow) dämpfen. Überdies können Wolken je nach Eigenschaft am selben Ort entweder für eine Erhöhung oder eine Reduzierung der Himmelshelligkeit sorgen (Ribas et al. 2016). Während für klare Nächte ein gutes Verständnis der Verteilung der Himmelshelligkeit erarbeitet wurde, fehlen sowohl theoretische als auch experimentelle Arbeiten für wolkige oder komplett bewölkte Nächte. Diese Kenntnislücke erschwert die Abschätzung der Auswirkungen erhöhter Himmelshelligkeit z. B. auf Wildtiere und Pflanzen (Kap. 3.3).

Die Himmelshelligkeit klarer Nächte ist weiterhin abhängig von atmosphärischen Parametern, wie z. B. dem Anteil von Aerosolen. Kyba et al. (2015b) ermittelten eine Variabilität der Himmelshelligkeit in wolkenlosen Nächten zwischen 17 % und -14 % gegenüber dem örtlichen Durchschnitt. Für bedeckte

Nächte stieg sie auf 72 % bis -42 %. Dabei unterliegen Standorte, die durchschnittlich eine geringere Himmelshelligkeit besitzen, einer geringeren Variabilität als solche, an denen die Himmelshelligkeit insgesamt höher ist, z. B. urbane Räume.

Trotz der Variationen aufgrund der atmosphärischen Parameter sind die räumlichen Verteilungsmuster der Himmelshelligkeit bei klaren Nächten und für den Zenit gegenwärtig schon hinreichend bekannt. So gelang es Falchi et al. 2016 mit dem Weltatlas recht gut, die Messdaten zur Himmelshelligkeit in klaren Nächten zu erklären (Ges et al. 2018). Zusätzlich zu zahlreichen Karten bietet der Weltatlas eine Übersicht, wie stark Einwohner verschiedener Weltregionen von nächtlicher Himmelshelligkeit betroffen sind (Tab. 2.2).

Tab. 2.2 Anteil der von künstlicher Himmelshelligkeit betroffenen Bevölkerung (und terrestrischen Landflächen)

Region	Deutschland	USA	EU	Welt
von künstlicher Beleuchtung unbeeinflusst (Himmelshelligkeit bis 0,176 cd/m²)	0 % (0 %)	0 % (30 %)	0 % (1 %)	8 % (60 %)
von künstlicher Beleuchtung beeinflusst (Himmelshelligkeit über 0,176 cd/m²)	100 % (100 %)	>99 % (70 %)	>99 % (99 %)	83 % (40 %)
Milchstraße nicht sichtbar (Himmelshelligkeit über 0,379 cd/m²)	42 % (5 %)	78 % (4 %)	60 % (6 %)	36 % (6 %)
Dunkeladaptation des menschlichen Auges nicht möglich (Himmelshelligkeit über 7,3 cd/m²)	3 % (<<1 %)	37 % (<1 %)	21 % (<1 %)	14 % (<<1 %)

Die Schwelle für »von künstlicher Beleuchtung beeinflusst« beginnt bei einer Überschreitung der natürlichen Nachthimmelshelligkeit um mehr als 1 %. »Milchstraße nicht sichtbar« bedeutet, dass die Milchstraße kaum oder nie von diesem Standort aus sichtbar ist. »Keine Dunkeladaption möglich« bedeutet, dass der Himmel so hell ist, dass ein Beobachter des Nachthimmels keine Anpassung der Augen an skotopisches (siehe auch Fußnote 8) Sehen erreicht (Kap. 3.2).

Quelle: Werte gerundet aus Falchi et al. 2016

Der Vergleich zwischen Deutschland und den USA ist in mehreren Hinsichten interessant. Kein Gebiet in Deutschland ist unbeeinflusst von durch künstliche Beleuchtung erhöhter Himmelshelligkeit, wohingegen die USA noch beträchtliche Landflächen aufweisen, in denen die Himmelshelligkeit im Zenit natürlich ist. Diese Gebiete in den USA sind jedoch nahezu unbewohnt, sodass nur we-

nige US-Bürger diesen natürlichen Himmel von zu Hause aus erleben. Im Gegensatz dazu können weit mehr Deutsche noch die Milchstraße an ihrem Wohnort sehen, weil deutsche Städte wesentlich dunkler sind als US-amerikanische. Schließlich lebt mehr als ein Drittel der US-Bevölkerung in Gebieten, die so hell sind, dass ihre Augen nicht in den Modus des Nachtsehens wechseln können, wenn sie nachts draußen sind; das ist nur für 3 % der Deutschen der Fall (siehe auch Fußnote 8).

Der Einfluss verschiedener Straßenbeleuchtungssysteme auf die Himmelshelligkeit wurde in einer Studie der Pacific Northwest National Laboratory des U.S. Department of Energy (Kinzey et al. 2017) analysiert. Dabei wurden Anlagen mit unterschiedlichen Abstrahlcharakteristiken, Leuchtmittel mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung und eine Modifikation der Lichtstromstärke untersucht. Mit einer Abstrahlcharakteristik, die Lichtemissionen oberhalb der Horizontalen verhindert, und einer Reduzierung des Lichtstroms ließ sich die Himmelsaufhellung erheblich gegenüber der typischerweise eingesetzten Straßenbeleuchtung mit Natriumhochdruckdampflampen verringern (Kap. 4.2). Auch mit LED oder anderen Leuchtmitteln ohne oder mit geringen Blauanteilen (Abb. 2.13 in Kap. 2.4.1) ließ sich die Himmelsaufhellung reduzieren. Mit LED mit hohen Blauanteilen erhöhte sich hingegen die Himmelshelligkeit um bis zu 60 %.

2.2.3 Zeitliche Veränderung der künstlichen Beleuchtung

Die Vielfalt der Nutzungsformen künstlicher Beleuchtung spiegelt sich auch in ihrem zeitlichen Auftreten wider. Einige Lichtquellen sind temporär (z. B. Lichtfestivals) oder saisonal (z. B. Beleuchtung touristischer Ziele). Manche sind die ganze Nacht eingeschaltet, andere werden gedimmt oder zu bestimmten Zeiten an- und abgeschaltet. Während für Beleuchtungsquellen der öffentlichen Hand Informationen zu Einsatzzeiten oft verfügbar sind, ist die Situation bei privat betriebenen Lichtquellen unübersichtlich. Diese können aber gerade in Städten einen erheblichen Anteil der künstlichen Beleuchtung ausmachen. Daher wird sich in einem relativ jungen Forschungsstrang damit beschäftigt, Erkenntnisse über die Anwendungszeiten der Beleuchtung in ihrer Gesamtheit zu gewinnen und die dafür nötigen Methoden zu entwickeln.

Eine Vielzahl von Studien zur Himmelshelligkeit ergab eine Abnahme der künstlichen Himmelshelligkeit im Verlauf der Nacht. So ermittelten Kyba et al. (2015b), dass der Anteil künstlicher Beleuchtung an der Himmelshelligkeit in den von ihnen untersuchten Städten durchschnittlich um 5 % pro Stunde abnahm. Diese Beobachtung bestätigten Falchi et al. (2016) anhand eines größeren Datensatzes. In dieser Studie stellten sie eine mittlere Abnahme der künstlichen Himmelshelligkeit von 4,5 % pro Stunde fest. Kyba et al. (2012) beobachteten eine Abnahme der Himmelshelligkeit über Berlin von 16 % pro Stunde zwischen

23:00 und 00:30 Uhr und 8 % pro Stunde zwischen 00:30 und 03:00 Uhr. Dabei wurde eine stärkere Abnahme für längere (rötliche) als für kürzere (blaue) Wellenlängen festgestellt, wohingegen Sánchez de Miguel (2015) einen gegensätzlichen Effekt in Madrid konstatierte (stärkere Abnahme im blauen als im roten Spektralbereich). Kyba et al. (2012) vermuteten, dass die Abnahme in Berlin hauptsächlich von der Haushalts- und der Fahrzeugbeleuchtung herrührte, während jene in Madrid mit dem Abschalten der Beleuchtung historischer Gebäude zusammenhing.

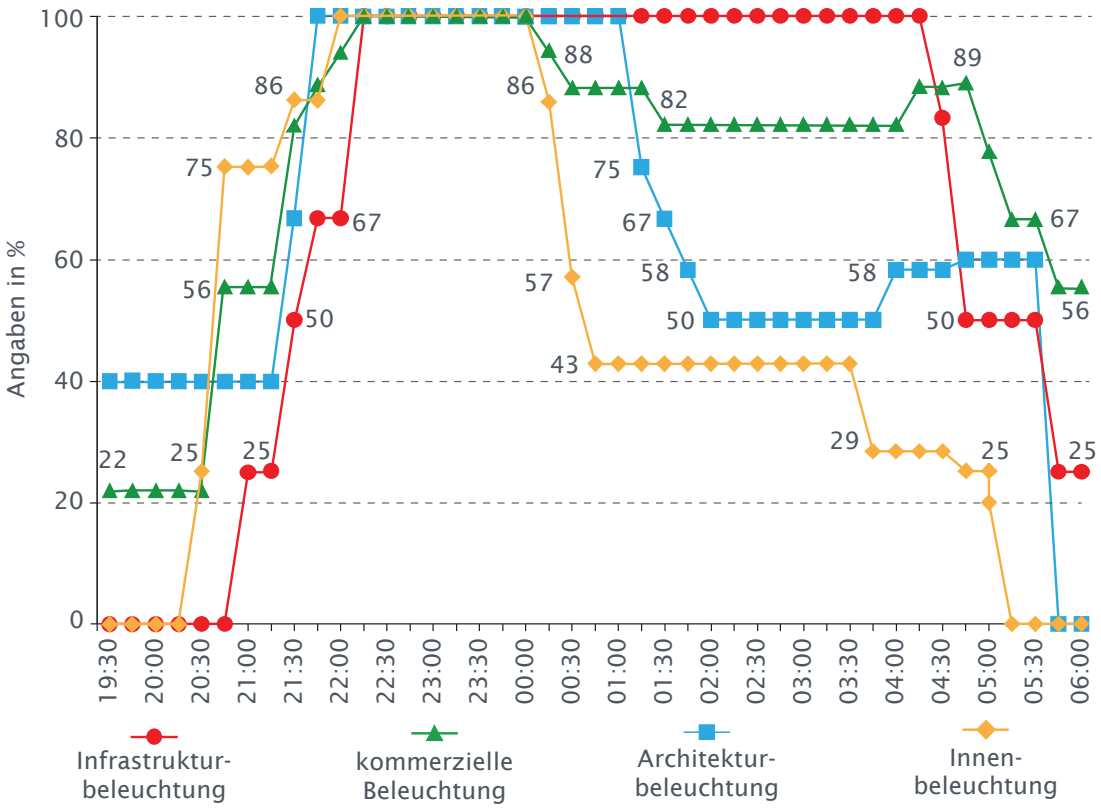
Bará et al. (2017) kombinierten Himmelshelligkeitsmessungen mit der Beobachtung der Veränderung von Beleuchtungssituation mittels Fotokameras. Ziel war es, den relativen Anteil der Beleuchtung von Straßen, Privathaushalten und Fahrzeugen an der Himmelshelligkeit zu verschiedenen Zeitpunkten in den Städten Coruña und Arteixo (Spanien) abzuleiten. Die Studie ergab, dass Privathaushalte (22 %) und Fahrzeugbeleuchtungen (1 %) gegen 23:00 Uhr ihren maximalen Beitrag zur Himmelsaufhellung leisteten, während ihr Anteil bis 04:00 Uhr auf nahezu 0 % absank.

Mit einer Auswertung von Zeitrafferaufnahmen untersuchte Meier (2018) die zeitlichen Profile verschiedener Lichtnutzungen an den drei Berliner Standorten Alexanderplatz, Potsdamer Platz und Hackescher Markt. Es zeigte sich, dass Ein- und Ausschalten der Beleuchtung in zeitlich begrenzten Phasen stattfanden: Einschalten bis ca. 22:15 Uhr, Vollbeleuchtung bis 00:00 Uhr, danach teilweises Ausschalten bis ca. 02:00 Uhr, Teilbeleuchtung bis ca. 04:15 Uhr, danach sukzessives Ausschalten (Abb. 2.9).

Es lassen sich Unterschiede zwischen den vier untersuchten Lichtkategorien erkennen. Die Infrastrukturbeleuchtung und große Teile der kommerziellen Beleuchtung blieben die ganze Nacht hindurch an, während etwa die Hälfte der Architekturbeleuchtung ab 01:00 Uhr ausgeschaltet wurde. Die Innenraumbeleuchtung (wobei privates Wohn- und Bürolicht nicht berücksichtigt wurden) wird bereits ab Mitternacht zu fast 60 % ausgeschaltet. Grundsätzlich lassen sich drei Schalttypen unterscheiden: stabile Beleuchtung, die die gesamte Nacht hindurch an bleibt, Lichtquellen, die im Laufe der Nacht ausgeschaltet werden, und solche, die zunächst aus- und am frühen Morgen wieder eingeschaltet werden.

Beim Betrieb öffentlicher Beleuchtung (insbesondere kommunale Straßenbeleuchtung, aber auch Anstrahlungen von Gebäuden u. Ä.) war historisch die Abschaltung bzw. Reduzierung der Beleuchtung für Teile der Nacht weit verbreitet (Schivelbusch 1983). Nächtliche Reduktionen der Beleuchtung folgen dem Gedanken, dass zu bestimmten Zeiten – beispielsweise zwischen 23:00 und 04:00 Uhr – der Bedarf an öffentlicher Beleuchtung so gering ist, dass der durchgängige bzw. vollständige Betrieb nicht notwendig oder angemessen ist (so auch berücksichtigt im Prinzip der Temporalität in der französischen Verordnung gegen Lichtverschmutzung; Kap. 4.1.4.1).

Abb. 2.9 Zeitlicher Verlauf der Beleuchtung an drei Berliner Standorten



Quelle: Meier 2018

In Frankreich schaltet inzwischen ein Drittel aller Kommunen (ca. 12.000) die öffentliche Beleuchtung teilweise oder ganz ab, um Kosten einzusparen.[6] Auch in Wien wurden schon Nachtabschaltungen durchgeführt, bei denen sich die Beleuchtungsstärke auf 50 % reduzieren lies (was der Bevölkerung nicht weiter auffiel) (Posch 2013). Während die Zeiten und Vorgehensweisen für einzelne Kommunen in Deutschland in der Regel problemlos zu ermitteln sind, sind keine vergleichenden Studien bekannt, die eine differenzierte Übersicht zu unterschiedlichen Praktiken der Reduktion sowie deren räumlicher Verteilung, Akzeptanz und Wirkung bieten. Einen ersten Überblick vermitteln die Ergebnisse einer Umfrage von PricewaterhouseCoopers (PwC 2015). Demnach stellten 25 % der deutschen Kommunen die Straßenbeleuchtung zeitweise komplett ab, 30 % schalteten nur jede zweite Leuchte ein und 55 % stellten vom zweilampigen auf einlampigen Betrieb um. Systeme wie Bewegungsmelder oder »Dial for light« (Einschalten per Anruf) fanden nur selten Anwendung.

6 www.anpcen.fr/?id_rub=19 (20.2.2020)

2.3 Entwicklung von Lichtemissionen und Himmelshelligkeit

Die Außenbeleuchtung in Deutschland hat sich in den letzten 10 Jahren durch die Einführung der LED-Technologie grundlegend verändert. So sind neue lichtgestalterische Möglichkeiten entstanden und es wurden eine höhere Lichtausbeute und eine energieeffizientere Beleuchtung möglich. Mit den folgenden Teilkapiteln wird der wissenschaftliche Erkenntnisstand zu den Veränderungen der Lichtemissionen künstlicher Beleuchtung in der Nacht (Kap. 2.3.1) und der Himmelshelligkeit (Kap. 2.3.2) beschrieben. Eine Untersuchung, welche der verschiedenen Lichtquellen dabei in welchem Maß zur Aufhellung des Nachthimmels beiträgt, ist nicht bekannt.

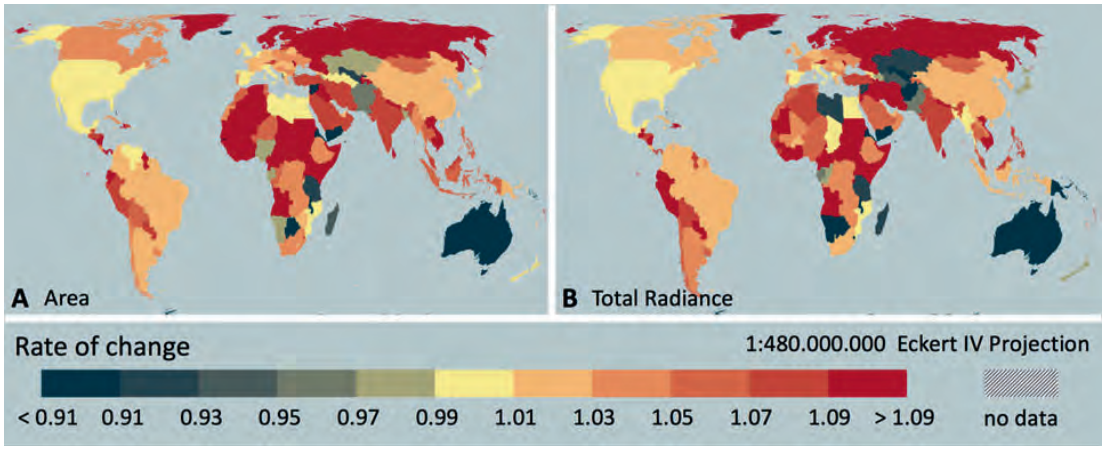
2.3.1 Veränderung der Lichtemissionen

Wie in Kapitel 2.2.1 dargestellt, ist das Niveau der Beleuchtung in der Nacht in Deutschland im Vergleich zu anderen europäischen Ländern relativ moderat. In den letzten Jahren ist jedoch in Deutschland und weltweit eine Zunahme der insgesamt beleuchteten Fläche und der Beleuchtungsintensität festzustellen (Kyba et al. 2017b). Diese Erkenntnis beruht auf der Analyse von Satellitendaten, mit denen direkt nach oben abgestrahltes bzw. von der Erdoberfläche nach oben reflektiertes Licht erfasst werden kann (Kap. 2.1.3). Die Satellitensensoren erfassen allerdings horizontal abgestrahltes Licht, das ebenfalls zur Erhöhung der Himmelshelligkeit und zu Lichtverschmutzung beitragen kann, nur wenig oder gar nicht. Dazu gehören z. B. Reflexionen von Licht an vertikalen Flächen sowie Licht von Leuchttafeln, Autoscheinwerfern oder aus den Fenstern von Häusern. Zusätzlich muss beachtet werden, dass die Satellitensensoren für Lichtemissionen im blauen Spektralbereich, die insbesondere durch LED-Beleuchtung verursacht werden, nicht empfindlich sind. Deshalb ist anzunehmen, dass die Veränderungen im sichtbaren Spektralbereich, die durch Analysen von Satellitendaten ermittelt wurden, noch unterschätzt werden (Kuechly et al. 2018).

Laut Kyba et al. (2017b) nahm in der Periode von 2012 bis 2016 die erleuchtete Fläche global um 2,2 % jährlich zu. Zudem stellten die Autoren fest, dass bereits beleuchtete Flächen im globalen Mittel noch heller wurden und zwar ebenfalls mit einer jährlichen Rate von 2,2 %. Zwischen einzelnen Ländern gab es beträchtliche Unterschiede bezüglich der Veränderungsrate (Abb. 2.10).

In vielen sich schnell entwickelnden Ländern Afrikas, Südamerikas und Asiens war die Zunahme an beleuchteter Fläche erheblich größer als im globalen Durchschnitt. Im Gegensatz dazu waren die Veränderungsraten in bereits hell erleuchteten Ländern, wie z. B. Deutschland, oft nur moderat oder in einigen Fällen sogar leicht negativ.

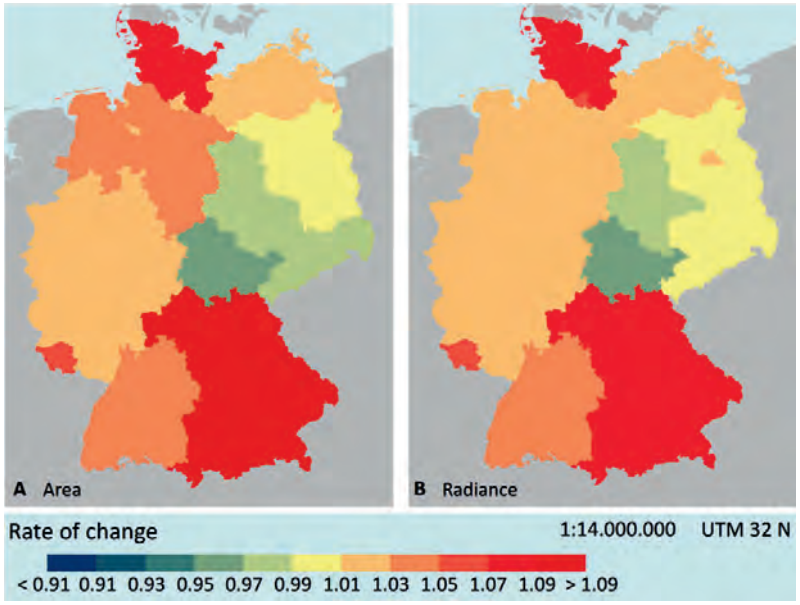
Abb. 2.10 Jährliche prozentuale Veränderung der Beleuchtung auf globaler Ebene von 2012 bis 2016



A = die Veränderung der beleuchteten Fläche; B = die Veränderung der Beleuchtungsintensität. Blaue Farben stehen für eine Abnahme (dunkelblau um mindestens 9 %), rote für eine Zunahme (dunkelrot für über 9 %).

Quelle: Kyba et al. 2017b, S. 2

Abb. 2.11 Jährliche prozentuale Veränderung der Beleuchtung in Deutschland von 2012 bis 2016

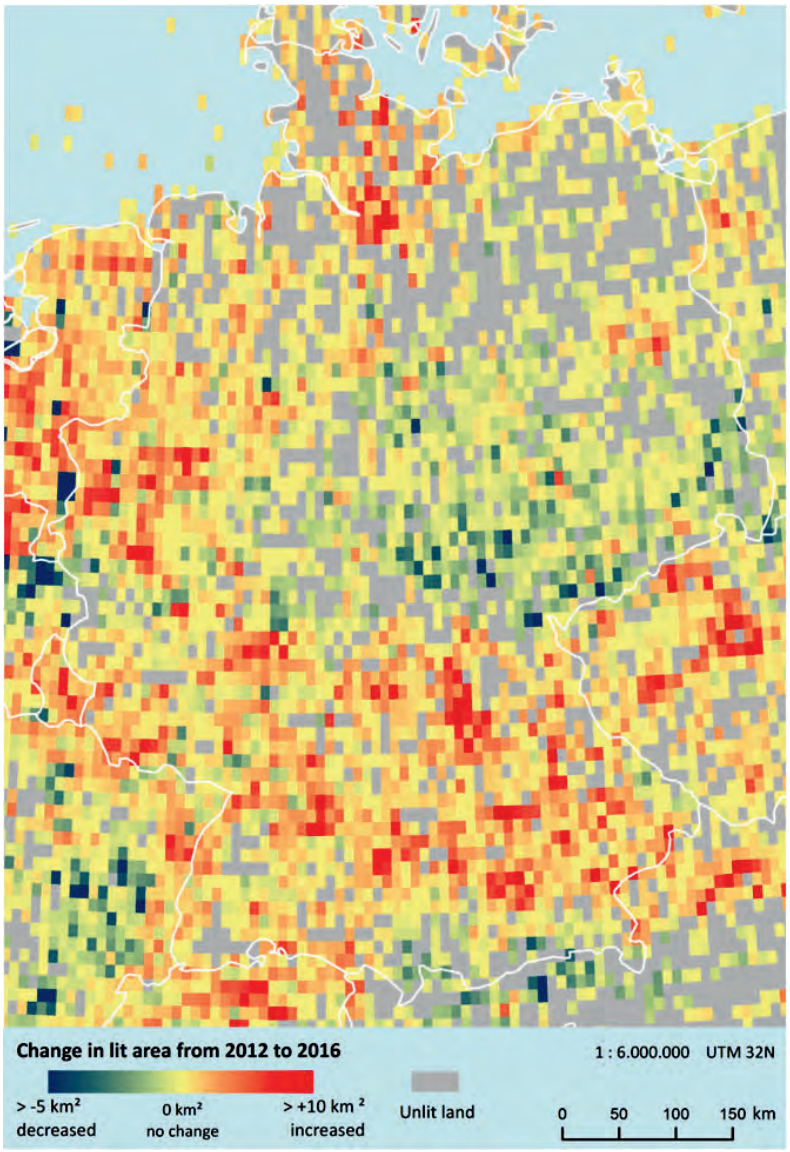


A = die Veränderung der beleuchteten Fläche; B = die Veränderung der Beleuchtungsintensität. Blaue Farben stehen für eine Abnahme (dunkelblau um mind. 9 %), rote für eine Zunahme (dunkelrot für über 9 %).

Quelle: Kyba et al. 2017a, S. 115

In Abbildung 2.12 ist eine detaillierte Ansicht der Veränderung der beleuchteten Flächen in Deutschland von 2012 bis 2016 abgebildet, wobei die Daten ungefähr gleich großen Regionen von näherungsweise 100 km² zugeordnet wurden. Auch hier werden die oben beschriebenen regionalen Unterschiede wieder deutlich.

Abb. 2.12 Jährliche prozentuale Veränderung der Beleuchtung in Deutschland von 2012 bis 2016



Quelle: Kyba et al. 2017a, S. 116

Für die beobachtbaren Änderungen gibt es mehrere mögliche Interpretationen. Zunächst einmal kann angenommen werden, dass die Zunahme der Strahlung

auf Änderungen der Beleuchtung zurückgeführt werden kann, z. B. in Form einer Zunahme der Beleuchtungsintensität durch eine Umrüstung ausgedienter Straßenbeleuchtung auf LED-Technologie nach neuesten Standards. Auch die Ausdehnung der Siedlungen durch Flächeninanspruchnahme kann ein Grund für eine Zunahme der Lichtemissionen sein. Auf regionaler Ebene haben zudem sehr wahrscheinlich auch Wetterphänomene Einfluss auf die Messdaten. Eine detaillierte Analyse der Gründe für die per Satellitenmessung beobachteten regionalen Unterschiede in der Entwicklung der nächtlichen Beleuchtungssituation lag zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch nicht vor.

2.3.2 Veränderung der Himmelshelligkeit

Die Erkenntnislage zur Entwicklung der Himmelshelligkeit ist bescheiden, es liegen nur ganz wenige Studien vor. Dies liegt vor allem daran, dass es aufgrund der natürlichen Dynamik schwierig ist, die künstliche Himmelsaufhellung für einen bestimmten Ort mit einem konkreten Wert zu definieren. Die Abnahme der Himmelshelligkeit im Verlauf der Nacht, die Änderungen der atmosphärischen Parameter von Nacht zu Nacht und die sich verändernde Himmelshelligkeit über die Jahreszeiten erschweren derartige Analysen (Kuechly et al. 2018). Die Umrüstung orangefarbiger Natriumdampflampen auf weiße LED-Beleuchtung stellt eine weitere Herausforderung dar, da die meisten Lichtmessgeräte die Himmelshelligkeit innerhalb eines instrumentenspezifischen Spektralbereichs erfassen. Wenn sich das Spektrum der Beleuchtung in einen Bereich verschiebt, für den das Instrument unempfindlich ist, werden die Lichtemissionen und die künstliche Himmelsaufhellung nicht vollständig erfasst. Um sicherzustellen, dass festgestellte Veränderungen der Himmelshelligkeit nicht nur durch das Messinstrument bedingt sind, werden regelmäßige Kalibrierungen oder übergreifend vergleichende Messkampagnen empfohlen (den Outer et al. 2011).

Eine der ältesten Beobachtungsreihen in Deutschland stammt vom Amateurastronomen Harald Marx aus Stuttgart. Nach seinen Untersuchungen ging die Grenzhelligkeit der schwächsten, gerade noch sichtbaren Sterne von 1958 bis 1997 von 5.6 auf 5.0 Größenklassen zurück, somit halbierte sich in etwa die Zahl der sichtbaren Sterne (Marx 1972 und persönliche Kommunikation). Demgegenüber konnten Hänel (2015) und Quester (2015) bei Messungen über 8 (2006–2014) bzw. 6 Jahre (2008–2014) an ihren Beobachtungsorten Osnabrück und Esslingen keine signifikante Änderung der Himmelshelligkeit nachweisen.

Tong (2017) befasste sich mit der Entwicklung der Himmelshelligkeit an zwei Standorten in und bei Bremen für den Zeitraum von 2012 bis 2016. Am Standort der Universität Bremen ergab sich eine leichte jährliche Zunahme (0 bis 2 %) der künstlichen Himmelshelligkeit am frühen Abend, während nach Mitternacht eine Abnahme der Himmelshelligkeit von 5 bis 10 % beobachtet wurde. Am ländlichen Standort Seebergen dagegen verdunkelte sich der Him-

mel in bewölkten Nächten wesentlich stärker, nämlich um 10 bis 30 % jährlich, wobei sich der Verdunklungseffekt in den späten Nachtstunden auch hier verstärkte. Bei klarem Himmel war der Grad der Abdunkelung relativ gering, nämlich nur 0 bis 8 %, wobei auch hier die Abdunklung in den späten Nachtstunden stärker war. Wesentliche Rückschlüsse können aus diesen Ergebnissen von nur zwei Standorten nicht gezogen werden, doch zeigen sie immerhin, wie dynamisch Beleuchtungen sein können, und sie legen nahe, dass ein gutes Verständnis der Änderungen von Himmelshelligkeit auf regionaler oder nationaler Ebene ein ausgedehntes und umfangreiches Messnetz erfordert.

Kolláth et al. (2016) untersuchten in mehreren ungarischen Städten die Auswirkung der Umrüstung von Natriumhochdrucklampen mit beträchtlichem Aufwärtslichtanteil auf LED-Lampen, die nun nicht mehr aufwärts strahlen. Die Analyse ergab eine signifikante Reduktion der künstlichen Himmelshelligkeit, besonders im roten Spektralbereich (dazu auch Abb. 2.4). Die Reduktion des blauen Spektralbereichs war geringer, was auf die stärkere Streuung des blauen Lichts in der Atmosphäre zurückzuführen ist.

Jechow et al. (2017) überprüften den Effekt bei Abschaltung der Gebäudeanstrahlung an Kirchen der Stadt Balaguer in Spanien. Die Studie ergab, dass die Gebäudeanstrahlung einen Anteil von etwa 20 % am künstlichen Himmelsleuchten (im Zenit) am Beobachtungsort hatte.

Methoden der Bürgerwissenschaften könnten eine zukünftig interessante Möglichkeit sein, Änderungen der Himmelshelligkeit zu erfassen. So analysierten Birriel et al. (2014) Daten aus dem Bürgerforschungsprojekt »Globe at Night« von 2006 bis 2012 und konnten zeigen, dass sich die künstliche Himmelshelligkeit in diesem Zeitraum erhöhte. Allerdings entstanden diese Ergebnisse unter der Annahme, dass die Verteilung der Teilnehmer nach Ort, Zeit, Übungsstand etc. über die Beobachtungsjahre konstant geblieben ist. Eine sorgfältige Nachuntersuchung (und Justierung) der Daten, bei der besonders die wechselnden Orte der Beobachtungen berücksichtig werden müssten, böte die Chance, Veränderungen der Himmelshelligkeit für Nordamerika und Europa genauer zu messen, weil ein Großteil der Daten von dort stammt.

2.4 Veränderungen der Beleuchtungstechnologie und Trends in der Nutzung künstlicher Beleuchtung

Mit der Einführung der LED brach eine Phase des grundlegenden technologischen Wandels an, der neue vielfältige lichtgestalterische Möglichkeiten und auch ganz neue Herausforderungen bei der Planung hervorbrachte (Schulte-Römer 2015). Im Folgenden wird zunächst aufgezeigt, wie sich durch den technologischen Wandel auch Veränderungen von Lichtspektren und im Umfang der Beleuchtung ergeben (Kap. 2.4.1). Im Anschluss werden zwei bedeutende Nutzungsformen der künstlichen Beleuchtung, das Ordnungslicht (insbeson-

dere die Straßenbeleuchtung) (Kap. 2.4.2) und das Werbe- und Festlicht (Kap. 2.4.3) näher betrachtet. Schließlich wird der Trend zu einem zurückhaltenden Umgang mit künstlicher Beleuchtung vorgestellt (Kap. 2.4.4).

2.4.1 Veränderungen der Beleuchtungstechnologie

Aktuell bewirken die Massenverfügbarkeit von LED und die damit einhergehenden Möglichkeiten, Energieverbrauch und -kosten zu senken, eine Änderung in der zur Anwendung kommenden Beleuchtungstechnologie. Neben der Richtlinie 2009/125/EG[7], die die Verwendung ineffizienter Leuchtmittel verbietet (Kap. 4.1.3), sind staatliche Förderungen und die erhöhten lichtgestalterischen Möglichkeiten Gründe für die Umrüstung auf LED. Für das Problem der Lichtverschmutzung fällt die Einschätzung dieses Technologiewechsels allerdings ambivalent aus (u. a. Schulte-Römer et al. 2018).

LED bieten aufgrund ihrer Fokussier- und digitalen Steuerbarkeit das Potenzial, ungewollte Lichtemissionen gezielt einzudämmen (Kap. 4). Mit der Umrüstung auf LED geht zudem eine Verschiebung der spektralen Zusammensetzung des erzeugten Lichts einher (Abb. 2.13). Durch die typischerweise höheren Blauanteile wirkt die LED-Beleuchtung deutlich heller als eine Beleuchtung mit weniger Blauanteilen (etwa gelbes Natriumdampflicht).[8] So könnte die insgesamt eingesetzte Lichtmenge reduziert werden (Kinzey et al. 2017).

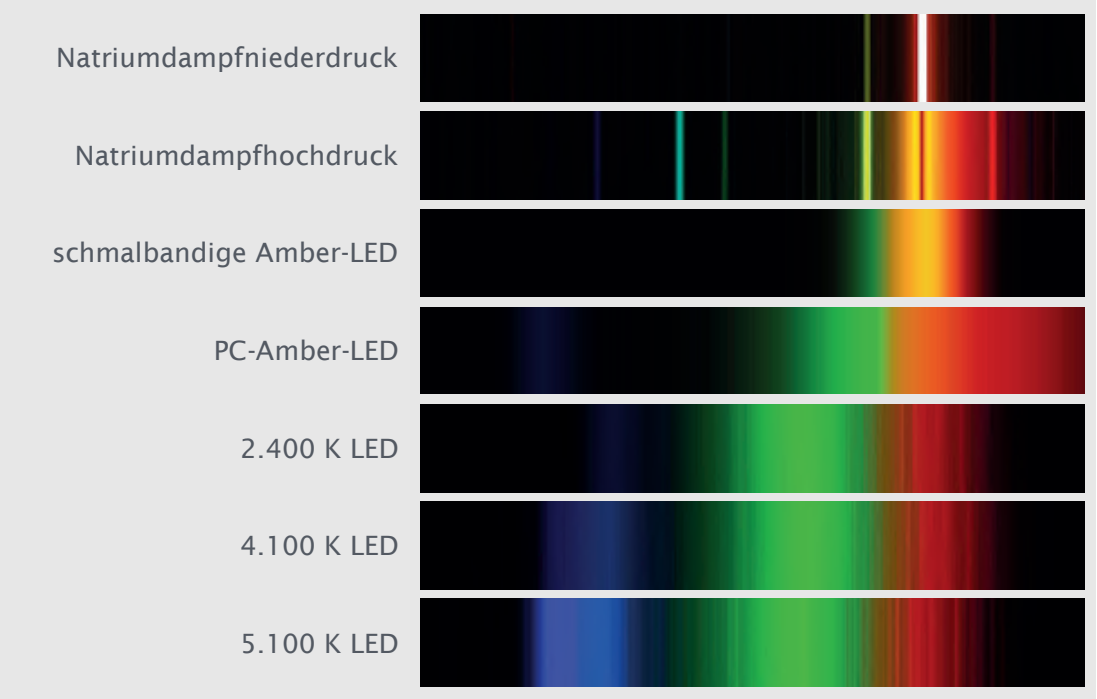
Allerdings führt die kostengünstige Verfügbarkeit der energieverbrauchsarmen LED zur immer weitergehenden Nutzung von Licht, insbesondere auch im dekorativen und privaten Bereich. So dürfte der tatsächlich realisierte Umfang gegenüber den theoretisch möglichen Reduzierungen der Beleuchtungsintensität und des Energieverbrauchs zurückbleiben (Schleich et al. 2014). Zudem können mit der Spektralverschiebung auch nachteilige Effekte einhergehen, da die blauen Spektralanteile des Lichts stärker zur künstlichen Himmelsaufhellung beitragen. So zeigten Kinzey et al. (2017), dass sich bei der Umrüstung von Natriumdampfhochdruck- auf LED-Lampen die Himmelshelligkeit um bis

7 Richtlinie 2009/125/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Neufassung der Richtlinie 2005/32/EG)

8 Das menschliche Helligkeitsempfinden kann durch das Verhältnis von skotopischer und photopischer Helligkeit (S/P) beschrieben werden, die von unterschiedlichen Fotorezeptoren im menschlichen Auge wahrgenommen werden (Kap. 3.2). Photopisches Sehen, auch Tagsehen bzw. Zapfensehen, bezeichnet das Sehen des Menschen bei ausreichender Helligkeit. Im Gegensatz dazu steht das skotopische Sehen, auch Nachtsehen oder Stäbchensehen. Da die Stäbchen für den kurzwelligeren Farbreiz empfindlicher als die Zapfen sind, vermitteln sie einen anderen Eindruck der Helligkeit verschiedener Farbtöne als die Zapfen. Vor allem manche Blautöne erscheinen im Dämmerungssehen wesentlich leuchtender (Wikipedia). Natriumlicht hat ein S/P-Verhältnis von etwa 0,65, eine 4.000-K-LED von 1,65. Damit erscheint eine 4.000-K-LED-Lampe skotopisch 2,5-mal heller als eine Natriumdampflampe. Ein ausführlicher Vergleich von skotopischer und photopischer Helligkeit verschiedener Lampen findet sich bei Kinzey et al. (2017, S. 17, Tab. 2).

zu 50 % erhöhen kann. Auch wird vermutet, dass die blauen Spektralanteile besonders störend für verschiedene Tiere sind (Kap. 3.3). Nicht zuletzt erregte der Wechsel von gelblicher Natriumhochdruck- auf kaltweiße LED-Straßenbeleuchtung weltweit öffentliches Aufsehen (Meier 2018). In Städten wie Montreal oder Mumbai führten Bürgerproteste zu einer Anpassung der Beleuchtung auf warmweiße LED (Schulte-Römer et al. 2018).

Abb. 2.13 Lichtspektren unterschiedlicher Leuchtmittel



Quelle: nach Schroer/Hölker 2018, S. 72; Flagstaff Dark Skies Coaliton

Neben der Umrüstung auf LED-Beleuchtung wird mit modernen Regel- und Steuerungssystemen die Möglichkeit eröffnet, Licht nach tatsächlichem Bedarf bereitzustellen. So können mittels Sensoren und Software Helligkeit und Farbe der Beleuchtung etwa je nach Wetterlage, Nutzungsstärke, aber auch Eigenschaften des Leuchtenstandorts individuell angepasst werden. Möglich sind beispielsweise das automatische Erkennen von Verkehrsteilnehmern wie Fahrradfahrern oder Fußgängern mittels Bewegungssensoren und die Anpassung der Beleuchtungsintensität, um deren Sicht und Sichtbarkeit zu erhöhen (Bowden 2017). Eine Vorreiterrolle bei der bedarfsgerechten Beleuchtung spielt die Stadt Kopenhagen (Cardwell 2014), aber auch in Deutschland werden entsprechende Systeme testweise eingesetzt, so z. B. in Leipzig (Crissxcross 2014), Berlin (Lux Review 2016) oder in Göttingen (Epperlein 2011).

Trotz dieser technischen Möglichkeiten ist in der Praxis zu beobachten, dass in vielen Anwendungen Umrüstungen zu eher höheren Beleuchtungsintensitäten führen, weil ausgediente Leuchtmittel mit abgeschwächter Lichtausbeute durch normgerechte LED-Technologie ersetzt werden (Düsterdiek et al. 2009) und keine Anpassung der Beleuchtungsinfrastruktur oder der Steuerungstechnik erfolgt (Kuechly et al. 2018). Insbesondere adaptive Techniken wie Dimmung, Sensortechnik und Software sind teilweise kostenaufwendig, sodass sie nicht an allen Standorten rentabel sind (Weirauch 2011). Jedoch zeigt das Beispiel der Stadt Bielefeld, dass auch bereits vorhandene Regel- und Steuerungstechnik bei der Umrüstung auf LED-Beleuchtung genutzt werden kann. Im Jahr 1999 war dort die alte Steuerungsschaltung einiger Verkehrs- und Parkleuchten abgestellt worden, um die Beleuchtung dauerhaft in reduziertem Betrieb laufen zu lassen. Die Reaktivierung der Steuerungstechnik erlaubt, die Lichtstärke der nun installierten LED-Leuchten in den Nachtstunden zwischen 22:30 und 04:30 Uhr zusätzlich um 50 % zu reduzieren (BMU 2019).

2.4.2 Trends bei Ordnungslicht

Die aktuell umfangreichen Erneuerungen der öffentlichen Straßenbeleuchtung gehen häufig mit einer Umstellung auf LED-Technologie einher. Bislang machen Quecksilberhochdrucklampen, die nach den Bestimmungen der Richtlinie 2009/125/EG seit 2015 nicht mehr auf dem Markt verfügbar sind, ca. 30 % der bundesweiten Straßenbeleuchtung aus (Thüringer Rechnungshof 2015, S. 10). Eine Stichprobenbefragung von 160 deutschen Kommunen 2014 ergab, dass bereits 11 % der Straßenleuchten auf LED umgerüstet wurden (PwC 2015). Zentrale Treiber dieser Entwicklung sind der Kostendruck auf Kommunalhaushalte, das Alter der Bestandsleuchten sowie förderpolitische Maßnahmen, u. a. im Rahmen der Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld der Nationalen Klimaschutzinitiative[9] (Kuechly et al. 2018). Laut dem Thüringer Rechnungshof (2015, S. 16) ist der Energieverbrauch für die Straßenbeleuchtung mit einem Anteil von durchschnittlich 60 % am Gesamtstromverbrauch ein erheblicher Kostenfaktor für kleinere Kommunen unter 50.000 Einwohnern. Zudem stammen ca. 30 % der deutschen Straßenbe-

9 Die Richtlinie wurde zum 1. Januar 2019 neu aufgelegt (https://www.klimaschutz.de/kommunalrichtlinie; 20.2.2020). Sie bietet Kommunen zahlreiche Fördermöglichkeiten zur Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen, u. a. kommunales Energie- und Umweltmanagement sowie Beleuchtungstechnik. Seit der Neuauflage 2019 werden nur Beleuchtungsanlagen mit Regelungs- und Steuerungstechnik gefördert, die entweder eine zeit- oder präsenzabhängige Beleuchtung ermöglichen, oder über eine Technik zur adaptiven Nutzung der Beleuchtung, d. h. zur Anpassung an unterschiedliche Verkehrsdichten und Witterungsbedingungen, verfügen. Dadurch können Beleuchtungsdauer und -niveau an das tatsächliche Verkehrsaufkommen vor Ort angepasst und die Lichtimmissionen reduziert werden (Bundesregierung 2018).

leuchtungstechnik aus den 1960er Jahren und stehen damit häufig am Ende ihres technischen Lebenszyklus (Düsterdiek et al. 2009).

Bemerkenswert ist, dass die öffentliche Beleuchtung in Deutschland vor den LED-Umrüstungen die DIN EN 13201 für Straßenbeleuchtung häufig nicht erfüllte, da die Installations-, aber auch die laufenden Kosten dafür schlicht zu hoch waren (Kuechly et al. 2018). Durch die höhere Effizienz der LED-Technik reduzieren sich die laufenden Energiekosten, zugleich legen Lichtplaner Neuinstallationen in der Regel normgerecht aus. So ist festzustellen, dass die Beleuchtungsstärken auf vielen Verkehrsflächen merklich zugenommen haben (Hessisches Ministerium für Umwelt 2013; Swaczyna/Moeck 2012).

Zudem werden bei der Umrüstung von Straßenbeleuchtungen oft nur die Leuchtmittel durch Retrofitlampen ausgetauscht, also neue Leuchtmittel in bestehende Lampenmodelle eingesetzt. Quecksilber-, Natriumdampf- und Kompaktleuchtstofflampen werden durch Maiskolbenleuchtmittel mit integriertem Vorschaltgerät ersetzt und in Langfeldleuchten mit Leuchtstoffröhren werden LED-Röhren eingesetzt (Abb. 2.14).

Abb. 2.14 Verschiedene Typen von Stadtleuchten

links: voll abgeschirmte Altstadtleuchte mit LED-Modul im Dach; Mitte: ineffiziente Kugelleuchte; rechts: Maiskolbenleuchtmittel als Retrofitlampe

Foto: A. Hänel

Zur wirksameren Ausnutzung der Energieeffizienzpotenziale der LED und der Verringerung der Lichtverschmutzung wäre hingegen die Verwendung neuer, besser abgeschirmter und mit optimierter Abstrahlung ausgestatteter Lampenmodelle förderlich (Kuechly et al. 2018). Zudem könnte der Mastabstand der Leuchten erhöht werden, da eine optimierte Abstimmung zwischen Leuchtmittel und Leuchtkörper mit Nutzung optischer Komponenten eine gezielte Ausleuchtung ermöglicht. Auch die Nutzung von Technologien zum Dimmen von Natriumdampflampen führt zu einer deutlichen Reduktion der Lichtverschmutzung und hebt Energieeinsparpotenziale, da Natriumdampflampen eine

den LED-Lampen vergleichbare Lichtausbeute je kWh zugeführter Leistung haben (Kap. 4.2.2).

Zur wirksameren Ausnutzung der Energieeffizienzpotenziale der LED und der Verringerung der Lichtverschmutzung wäre hingegen die Verwendung neuer, besser abgeschirmter und mit optimierter Abstrahlung ausgestatteter Lampenmodelle förderlich (Kuechly et al. 2018). Zudem könnte der Mastabstand der Leuchten erhöht werden, da eine optimierte Abstimmung zwischen Leuchtmittel und Leuchtkörper mit Nutzung optischer Komponenten eine gezielte Ausleuchtung ermöglicht. Auch die Nutzung von Technologien zum Dimmen von Natriumdampflampen führt zu einer deutlichen Reduktion der Lichtverschmutzung und hebt Energieeinsparpotenziale, da Natriumdampflampen eine den LED-Lampen vergleichbare Lichtausbeute je kWh zugeführter Leistung haben (Kap. 4.2.2).

Des Weiteren ist zu beobachten, dass immer mehr Parkplätze (z. B. Autobahnparkplätze) beleuchtet werden und diese Beleuchtung auch außerhalb der Öffnungszeiten weiter betrieben wird. Umrüstungen oder Neuinstallationen resultieren ebenfalls hier oft in höheren Beleuchtungsintensitäten (Kuechly et al. 2018; Mohar 2013).

Selbst bei der Fahrzeugbeleuchtung ist die zunehmende Verwendung von LED-Leuchtmitteln mit hoher Leuchtdichte und hohen blauen Spektralanteilen festzustellen, die eine gute Ausleuchtung und eine natürliche Farbwiedergabe ermöglichen sollen. Diese Scheinwerfer können allerdings insbesondere bei Nebel eine höhere Blendwirkung als herkömmliche Fahrzeugbeleuchtung erzeugen. Es ist jedoch nicht bekannt, dass die Gefahr einer direkten Schädigung der Augen durch die Blaulichtkomponente der LED-Fahrzeugbeleuchtung besteht, obwohl es bei einer Beeinträchtigung der Sicht des Fahrers zu Unfällen kommen kann (SCHEER 2018).

2.4.3 Trends bei Gestaltung, Inszenierung und Marketing mit Licht

In der Stadtplanung dominierte lange ein technisch orientierter Zugang zur Außenbeleuchtung, der auf die Planung der Straßenbeleuchtung fokussiert war (Meier et al. 2015). Eine stärker auf die Gestaltung des nächtlichen Stadtbilds orientierte Lichtplanung entstand erst Ende der 1990er Jahre (Hänsch et al. 2012). Inzwischen wird künstliche Beleuchtung als Mittel der Stadterneuerung und des Standort- bzw. Stadtmarketings eingesetzt (Wiemken/Froessler 2011). Mit ihr soll Orten ein neues bzw. ein unverkennbares Image gegeben sowie die Stadtidentität gefördert werden, und es sollen attraktive soziale Räume geschaffen werden (Schulte-Römer 2015).

Lichtinszenierungen werden durch die vielseitige und energieeffiziente LED-Beleuchtung maßgeblich vorangetrieben und sowohl von öffentlichen als

auch von privaten Akteuren initiiert und umgesetzt (Kuechly et al. 2018). Bedeutend ist, dass Licht mit den neuen technischen Möglichkeiten quasi nach Belieben individuell eingestellt werden kann: bewegte und statische Lichtquellen, Veränderungen und Flexibilität in Farbspektrum und Lichtstärke, Dimmung und sensorische Steuerbarkeit sowie wahrscheinlich zukünftig durch neue Technologie leuchtende Folien auf ganzen Flächen (Horx 2016).

Ein Trend im Bereich Gestaltung und Inszenierung der Stadtnacht ist die Veranstaltung temporärer Lichtevents bzw. Lichtfestivals (Schmidt 2007). Eine Vorreiterrolle in Deutschland spielten hier die Städte Frankfurt (Main) und Nürnberg, die mit der »Luminale« und »Blauen Nacht« bereits seit 2000 jährliche Lichtfestivals durchführen. Die Förderung des Städtetourismus in besucherärmeren Zeiten ist in der Regel ein zentrales Ziel (Kuechly et al. 2018).

Abb. 2.15 Leuchtpylon mit Angaben zur Leuchtdichte in cd/qm

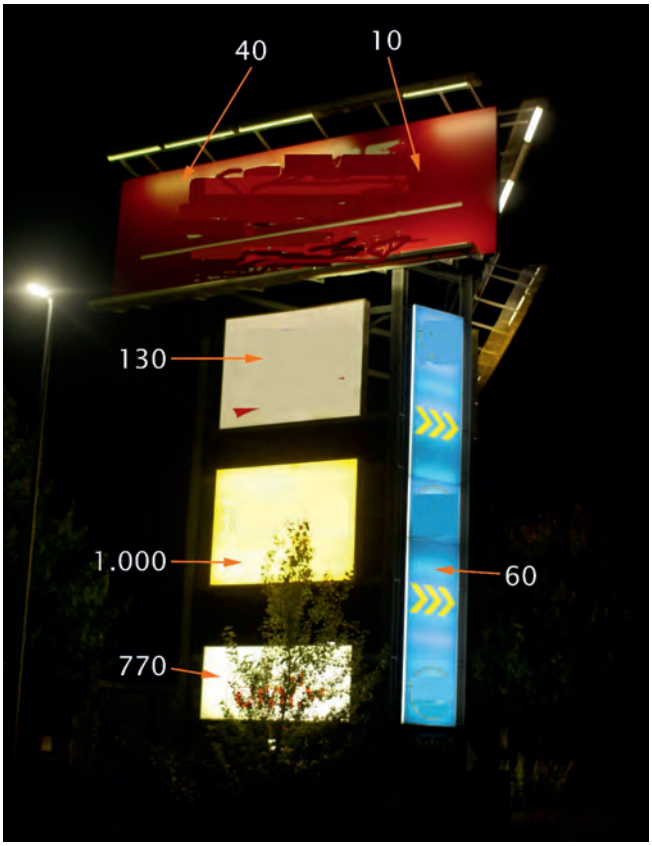


Foto: A. Hänel

Ermöglicht durch die neue Lichttechnologie fanden in den vergangenen ca. 15 Jahren in vielen Städten Mediascreens Verbreitung. Es handelt sich dabei um unterschiedliche Arten digitaler Lichtinstallationen wie Bildschirme oder Medienfassaden an Gebäuden, bei denen das Licht Teil der Architektur wird

(Mediatektur) (Heiden 2009; Kronhagel 2010). Die Installationen sind oft großflächig und interaktiv (McQuire et al. 2009; Neumann 2007). Häufig werden sie mit hohen Lichtintensitäten betrieben, um auch am Tag sichtbar zu sein (Abb. 2.15); eine Reduktion in der Nacht findet oft nicht statt (Commission Internationale de L'Eclairage 2017).

Zusätzlich wird beleuchtete großflächige Werbung an Baugerüsten, aber auch an Gebäudefassaden verwendet (Lehmann 2008). Allein in Berlin betrug der Umsatzzuwachs im Bereich beleuchteter Außenwerbung von 2007 bis 2012 307 % (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2014). Deutlich kleiner, aber seit ihren Anfängen Mitte der 1980er Jahre mittlerweile weit verbreitet sind Citylightposter, die häufig Bestandteil von Bus- und Straßenbahnhaltestellen sind, aber auch freistehend vorkommen (Lehmann 2008).

Auch außerhalb von Städten kommt künstliche Beleuchtung vermehrt zum Einsatz, insbesondere zur Ermöglichung klassischer Tagsportarten in der Nacht. Zu nennen sind insbesondere intensiv beleuchtete Skipisten (Hänel 2017b), aber z. B. auch Nachtgolf (Engler 2015).

2.4.4 Zurückhaltender Umgang mit künstlicher Beleuchtung

Lichtanlagen können miteinander konkurrieren. Ist eine Umgebung stark ausgeleuchtet, sind immer höhere Lichtintensitäten notwendig, um die gewünschte Aufmerksamkeit zu erreichen. Mit Ansätzen, mit denen dieser sich selbstverstärkenden Entwicklung Einhalt geboten werden soll, wird der Fokus auf minimal notwendiges, aber ästhetisches Licht gelegt (Appelt 2017).

Seit der Jahrtausendwende haben Kommunen und Städte begonnen, die Koordination der Außenbeleuchtung dezidiert zu thematisieren (Fisher/Junagade 2016). Zentrales Instrument sind Lichtkonzepte bzw. Lichtmasterpläne (Köhler 2015; Küster 2017) (Kap. 4.1.2.1). In den letzten Jahren wurden dabei vermehrt partizipative Ansätze in der Lichtplanung genutzt, z. B. durch Anwohnerbeteiligung in Berlin (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2016) oder in Chemnitz (Stadt Chemnitz 2016) oder durch das Einrichten von Teststrecken, auf denen innovative Beleuchtungstechnik in der praktischen Anwendung erlebbar wird, wie z. B. in Fulda oder Berlin (Kuechly et al. 2018). Auch professionelle Lichtdesigner und -planer zeigen ein zunehmendes Interesse am Erhalt der Dunkelheit (u. a. Schulte-Römer et al. 2018).

Ein weiteres Konzept, das auch in Deutschland zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist die Ausweisung von Sternenparks, bei denen Tourismus und Naturschutz die zentrale Motivation darstellen (Russ et al. 2015). Durch die Ausweisung als Lichtschutzgebiet kann nicht nur die Beleuchtung im eigenen Gemeindegebiet gestaltet werden, sondern es können auch benachbarte Gemeinden und Städte bei ihrer Beleuchtungsplanung beeinflusst werden. Aktuell trifft dies bei der Stadt Fulda zu, die in der Nähe des Sternenparks Rhön liegt. Sie ist

die erste Stadt Deutschlands, die von der International Dark-Sky-Association im Januar 2019 mit dem Titel »Sternenstadt« beschieden wurde.[10] Dazu wurde ein Plan entwickelt, die Lichtemissionen im Innenstadtbereich zu beschränken. Für zusätzliche Anstrahlungen soll die gleiche Lichtmenge beispielsweise bei übermaßiger Schaufensterbeleuchtung eingespart werden. Die öffentliche Beleuchtung soll zukünftig auf voll abgeschirmte Leuchten mit warmweißen oder PC-Amber-LED umgerüstet werden (NB 2017).

10 https://www.sternenstadt-fulda.de/ (5.6.2020)

3 Stand des Wissens zu den Wirkungen künstlicher Außenbeleuchtung in der Nacht

Die wissenschaftliche Beschäftigung mit den Wirkungen künstlicher Außenbeleuchtung in der Nacht hat in den letzten Jahren stark zugenommen. In verschiedenen Disziplinen werden die biologischen, ökologischen, gesundheitlichen, soziokulturellen und wirtschaftlichen Folgen künstlicher Beleuchtung in der Nacht untersucht. Der Begriff Lichtverschmutzung steht dabei der sonst weitgehend positiven Konnotation von (künstlichem) Licht entgegen und bietet daher sowohl begrifflich als auch inhaltlich Stoff für kontroverse Auseinandersetzungen (Bille 2019, Brox 2015; Edensor 2017; Meier, 2019). Ziel dieses Kapitels ist es, die wichtigsten gewünschten Wirkungen und unerwünschten Nebenwirkungen von künstlicher Beleuchtung in der Nacht zu erläutern. Dazu wird im Folgenden der aktuelle Erkenntnisstand in Bezug auf die wirtschaftlichen und soziokulturellen (Kap. 3.1), humanmedizinischen (Kap. 3.2) sowie ökologischen Wirkungen (Kap. 3.3) künstlicher Beleuchtung im Außenbereich dargestellt.

3.1 Wirtschaftliche und soziokulturelle Wirkungen

3.1.1 Wesentliche Innovationsschritte der Beleuchtungstechnik

Der Umgang mit und die Weiterentwicklung von künstlichen Lichtquellen sind in der Menschheitsgeschichte so zentral, dass sich die alltagspraktische Dimension des Beleuchtens nur schwer von gesellschaftlichen Kontexten und der kulturellen Bedeutungen von Licht trennen lässt. Davon zeugen auch die Bildwelt und Sprache unseres westlichen Kulturkreises. Lichtmetaphorik steht für göttliche Erleuchtung, die neue wissensbasierte Gesellschaftsordnung der Aufklärung, das Zusammenspiel aus technischem und kulturellem Fortschritt im 20. Jahrhundert in Form von Elektrifizierung und für elektrisierendes nächtliches Großstadtleben (Binder 1999; Böhme 1997; Hoormann 2003; McQuire 2008). Auch wenn sich Bezüge und Metaphern ändern, so erweist sich die Überhöhung des Mediums Licht im Sinne eines Zeichens oder Symbols als kulturgeschichtlich stabiles Phänomen. Was sich allerdings stark gewandelt hat, sind die Techniken des Beleuchtens.

Seit der frühen Neuzeit ereignen sich bedeutende lichttechnische Innovationen fast regelmäßig etwa alle 100 Jahre. Gegen Ende des 17. Jahrhunderts ließen europäische absolutistische Herrscher die ersten Öl- und Gaslaternen in ihren Städten installieren, allen voran der »Sonnenkönig« Ludwig XIV. in Paris. Historiker weisen darauf hin, dass diese erste stationäre Beleuchtung allerdings

kaum ausreichte, um nächtliche Stadträume wirklich zu erhellen (Brox 2010; Schivelbusch 1983).

Im ausgehenden 18. Jahrhundert änderten sich Effizienz und Effektivität öffentlicher Stadtbeleuchtung grundlegend durch die Einführung von Gaslicht und den städtischen Ausbau von Gasinfrastrukturen (Clegg 1859; Tomory 2009). Dank Skaleneffekten war großräumige städtische Beleuchtung erstmals vorteilhafter als punktuelle. Auch die Beleuchtungsdauer dehnte sich zunehmend auf die gesamte Nacht aus. Denn teuer war nicht mehr die einzelne Kerze oder Öllampe, sondern die Errichtung von Gasinfrastrukturen. Je mehr Haushalte und Straßenzüge angeschlossen werden konnten, desto lohnenswerter erschien bzw. war die Investition in den Infrastrukturausbau.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts bekam die Gasbeleuchtung Konkurrenz durch schadstofffreie, noch hellere und per Knopfdruck verfügbare elektrische Beleuchtungstechnologien. Dadurch wurde die Gasbeleuchtung im 20. Jahrhundert zunehmend verdrängt (Schivelbusch 1992). In Europa und Nordamerika war die Erfolgsgeschichte der Glühlampe eng verwoben mit dem flächendeckenden Ausbau von Elektrizitätsnetzwerken. Dies ermöglichte die Ausbreitung künstlicher Beleuchtung über die Städte hinaus auch in ländlichen Räumen (Binder 1999; Hughes 1983).

Im Zuge dieser Innovationen entwickelte sich künstliche Beleuchtung im Außenbereich ab dem 17. Jahrhundert zumindest in industrialisierten Ländern von einer mühseligen und oft von Bürgern selbst geleisteten Alltagstätigkeit (Feuer machen, Lampen anzünden und reinigen) zu einer von Experten bereitgestellten und allgemein verfügbaren Selbstverständlichkeit. Durch die jüngsten technologischen Entwicklungen wird diese Selbstverständlichkeit allerdings infrage gestellt, da durch sie neue technische Möglichkeiten eröffnet und gewohnte Beleuchtungspraktiken verändert werden und Experten vor neue Herausforderungen stellt: Der Übergang von elektrischer zu elektronischer Beleuchtung mittels LED läutet eine »digitale Revolution in der künstlichen Beleuchtung« ein (Schulte-Römer 2017). Einerseits ermöglichen die Innovationen neue Formen der Lichtgestaltung und Anwendungen, angefangen von gezielteren Anstrahlungen bis zu digital zeitlich und räumlich gesteuerten Straßenlaternen. Andererseits führen sinkende Energie- und Anschaffungskosten und die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von LED zu einer verstärkten Nutzung von künstlichem Licht in der Nacht (Kap. 2.3).

3.1.2 Erwünschte Beleuchtungswirkungen

3.1.2.1 Beleuchtungsfunktionen und Wahrnehmungstheorie

Die zentralen Funktionen von künstlicher Außenbeleuchtung haben sich trotz technologischer Innovationen und gesellschaftlicher Umbrüche kaum verändert. Zu den wichtigsten Beweggründen für künstliche Beleuchtung zählen die Ver-

kehrssicherheit, die Beobachtung und Kontrolle nächtlicher Aktivitäten in öffentlichen Räumen, festliche Anlässe und die politische oder kommerzielle Zurschaustellung (Auer 2007). Allerdings lassen sich diese Funktionen oft nur schlecht voneinander abgrenzen. So bemerkt der Historiker Wolfgang Schivelbusch (1983), dass bereits die erste stationäre Straßenbeleuchtung in Europa, die der Sonnenkönig Ludwig XIV. im Zuge einer Polizeireform 1667 in den Straßen von Paris installieren ließ, nicht nur zu mehr Sicherheit beitragen sollte, sondern zugleich als Symbol und Ausdruck absolutistischer Herrschaft verstanden werden konnte. Analog lässt sich in öffentlichen Räumen des 21. Jahrhunderts ein Wettstreit um die größte Sichtbarkeit beobachten, der nicht nur durch finanzielle, technische und gestalterische, sondern auch durch politische und kommerzielle Ressourcen entschieden wird (Franck 1998). Licht und Beleuchtung in Form von architektonischen Anstrahlungen, Leuchtreklamen, Lichtinstallationen und künstlerischen oder kommerziellen Medienfassaden dienen sowohl Repräsentations- als auch Werbezwecken (McQuire 2008). Lichtplaner raten Städten daher zunehmend zu einer integrierten Betrachtung und Lichtplanung, die im Idealfall alle beteiligten Akteure mit ins Boot holt, um Beleuchtungsfunktionen zu priorisieren und eine Kakophonie künstlicher Lichter in städtischen Räumen zu vermeiden (Brandi/Geissmar-Brandi 2006; Köhler/Sieber 2012; Narboni 2006).

Die Funktionen von künstlicher Außenbeleuchtung sind eng verknüpft mit unterschiedlichen Dimensionen der Lichtwahrnehmung, die sich auch überlagern können. Wahrnehmungstheoretisch betrachtet lässt sich Licht als Zeichen, Signal oder Teil einer Atmosphäre verstehen. Als Zeichen unterstreicht oder verweist es auf Bedeutsames, als Signal hat es einen eigenständigen Anteil an gesellschaftlicher Interaktion oder Kommunikation und als Medium schafft es gemeinsam mit Klangkulissen und Gerüchen dichte Atmosphären (Bille 2019; Edensor 2017). Beispielsweise setzt die Anstrahlung des Brandenburger Tors in Berlin zeichenhaft das Monument in Szene, das Licht wird reflektiert, wirkt atmosphärisch auf den davorliegenden Pariser Platz und trägt damit zu dessen nächtlicher Stimmung bei. Zu besonderen Anlässen besteht inzwischen die Möglichkeit, das Brandenburger Tor farblich anzustrahlen im Sinne eines medienwirksamen Signals oder einer politischen Geste. So signalisierte die blau-weiß-rote Anstrahlung des Brandenburger Tors nach den Pariser Anschlägen am 13. November 2015 die Solidarität Deutschlands mit Frankreich (Abb. 3.1).

Künstliche Außenbeleuchtung formt Nachtlandschaften, sie kann Raumstrukturen hervorheben oder in ihrem Schatten verschwinden lassen und beeinflusst damit maßgeblich die visuelle Wahrnehmung nächtlicher Orte (Haber 2013). Ihre Wirkung auf den Betrachter wird allerdings spezifisch geprägt durch kulturelle und historische Bedeutungshorizonte in Verbindung mit individuellen Licht- und Dunkelheitserfahrungen (Hirdina 1995). Beispiele hierfür sind persönliche kriegsbedingte Erfahrungen mit Verdunklung oder Stromausfällen, die mit dem romantisierten Ideal dunkler Naturräume wenig gemein haben

(Hirdina/Augsburger 2000). Entsprechend komplex und individuell unterschiedlich können Licht- und Dunkelheitsempfinden sein. Dies erschwert sachliche Diskussionen über das für den jeweiligen Beleuchtungszweck notwendige Maß künstlichen Lichts und die Abwägungen von Vor- und Nachteilen möglicher Lichtreduktionsmaßnahmen.

Abb. 3.1 Anstrahlung des Brandenburger Tors in Berlin

Quelle: Sandro Schroeder (www.flickr.com/photos/sandroschroeder/23028317551/, CC BY 2.0)

Die Vielschichtigkeit der Funktionen und der Wahrnehmungsdimensionen von Licht zeigt sich auch in der Diskussion um Lichtverschmutzung im Zuge des verstärkten Einsatzes von LED für die Außenbeleuchtung öffentlicher Räume. Während Lichtplaner LED-Beleuchtung mit Blick auf das menschliche physiologische Sehvermögen und damit verbundene Sicherheitsempfinden oft als vorteilhaft bewerten (Schulte-Römer et al. 2018), wird es wegen seines hohen Blauanteils aus ökologischen und gesundheitlichen Gründen kritisiert (Kap. 3.2 u. 3.3).

3.1.2.2 Beleuchtung und Sicherheitsempfinden

Sicherheitserwägungen spielen seit den Anfängen künstlicher Außenbeleuchtung eine zentrale Rolle. Dabei umfasst Sicherheit den Schutz vor Angriffen oder Überfällen, aber auch die sichere Fortbewegung in dunklen Räumen. Mit der Zunahme des motorisierten Individualverkehrs in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts hat die Verkehrssicherheit als Beleuchtungszweck an Bedeutung gewonnen (Jakel 2001; Rehsöft/Schneider 1998) und ist in Ländern wie Deutschland auch gesetzlich im Sinne der Verkehrssicherungspflicht an kom-

munale Beleuchtungsaufgaben geknüpft. Unbestritten ist, dass Außenbeleuchtung uns das Sehen in der Nacht und das schnellere Erfassen von Gefahrensituationen im Straßenverkehr ermöglicht. Die Kausalität statistischer Zusammenhänge zwischen Beleuchtung und Sicherheit ist allerdings umstritten (Krause 2013; Mosser 2007).

Mit Blick auf Kriminalität ist die wissenschaftliche Erkenntnislage uneindeutig, ob Außenbeleuchtung nur das individuelle Sicherheitsgefühl stärkt (Knight 2010; Lobão et al. 2015; Mattoni et al. 2017) oder auch tatsächlich zu einer Verringerung der Kriminalität führt (Jackett/Frith 2013; Lorenc et al. 2013; Schmidt 2007). Da veränderte Beleuchtungssituationen oft Teil größerer Maßnahmenprogramme sind und ein erhöhtes Sicherheitsgefühl oft mit belebteren öffentlichen Räumen und größerer sozialer Kontrolle einhergeht, sind statistische Nachweise schwer zu erbringen (Beyer/Ker 2009; Marchant 2010, 2017; Steinbach et al. 2015; Welsh/Farrington 2008). Zwar weisen Befragungsergebnisse auf die bedeutende Rolle von Beleuchtung für das subjektive Sicherheitsgefühl hin, z. B. beim Thema Angsträume[11] (Boomsma/Steg 2014; Krause 2013). Allerdings lassen sich diese Wahrnehmungen nicht eindeutig durch statistische Daten zu Kriminalität im öffentlichen Raum untersetzen. »Dunkle Orte weisen nicht mehr Zwischenfälle auf als hell beleuchtete, obwohl das Gefühl etwas anderes sagt.« (Pauen-Höppner/Höppner 2013, S. 107)

Auch bei der Verkehrssicherheit ist eine differenzierte Betrachtung sinnvoll, denn Beleuchtung kann die Sicht nicht nur verbessern, sondern auch einschränken oder Verkehrsteilnehmer blenden und ablenken (Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr 2003). Richtwerte zur Beleuchtungsstärke, wie sie in der DIN EN 13201 für Straßenbeleuchtung empfohlen werden, basieren auf fotometrischen Experimenten zur Erkennbarkeit von Hindernissen auf der Fahrbahn und zur Reaktionszeit der Probanden in Relation zu verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten. Diese auf Laborversuchen beruhenden lichttechnischen Richtwerte werden in der Praxis und auch durch empirische Studien kritisch hinterfragt. So zeigte eine Analyse verkehrsstatistischer Daten des Landes Berlin, dass die »einfache Formel ›mehr Licht, mehr Sicherheit‹ […] nicht überzeugend« ist, weil die Zahl der Unfälle bei Dunkelheit im Vergleich zum Tag nicht höher ist (Pauen-Höppner/Höppner 2013, S. 106). Eine Ausnahme bilden Unfälle mit Fußgängern an Lichtsignalanlagen, hier lag die Unfallrate bei Dunkelheit höher als am Tag. Als Gründe vermuten die Autorinnen eine ungeeignete Beleuchtung der Furten sowie die Blendung von Autofahrern durch starke Scheinwerfer. Ungleichmäßige Beleuchtung und Blendung (Kap. 3.1.3.1) sind Probleme, die auch in lichttechnischen Normen Thema

11 Der Begriff Angstraum bezeichnet meist öffentliche Räume, in denen das Gefühl einer Bedrohung durch Kriminalität, insbesondere Straßengewalt, bei vielen Menschen besonders stark ausgeprägt ist. Der Begriff kann sich sowohl auf ganze Straßenzüge beziehen als auch auf kleine Bereiche, etwa unübersichtliche Stellen in Parkhäusern oder dunkle Unterführungen.

sind und mit der Einführung von stärker gerichteter LED-Beleuchtung verstärkt als Qualitätsmerkmal von Beleuchtungsinstallationen betrachtet werden. Mit Blick auf ein sicheres Maß an Helligkeit auf der Straße hatten erste städtische Experimente mit gleichmäßig verteilter, aber gedimmter LED-Straßenbeleuchtung keine negativen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit. So zeigte eine Untersuchung in Wien, dass die Beleuchtungsstärke um die Hälfte reduziert werden konnte, ohne die Verkehrssicherheit negativ zu beeinflussen (Matt 2015; Posch 2013; Steinbach et al. 2015).

Die unter Lichtplanern verbreitete Annahme, dass vor allem eine gleichförmige Ausleuchtung gutes Sehen fördert (EURAC 2013; Richter 2005), ist nicht eindeutig wissenschaftlich belegt. So ermittelten Narendran und Zhu (2015), dass eine gleichmäßige Parkplatzbeleuchtung mit 3 lx besser bewertet wurde, als eine ungleichmäßigere Beleuchtung mit 30 lx. Auch Fotios et al. (2017) kamen zu dem Schluss, dass die Erkennbarkeit von Objekten durch Autofahrer direkt bei Erreichen der dunklen oder hellen Gebiete ab- bzw. zunahm, d.h., eine gleichmäßige Beleuchtung hat die Sichtbarkeit von Objekten erhöht. Es wurde zudem gezeigt, dass zwar Fußgänger ihre gefühlte Sicherheit bei gleichmäßiger Beleuchtung besser bewerten, allerdings ungleichmäßige Beleuchtung auf Straßen bessere Sichtbarkeit und Kontraste für Autofahrer ergeben kann (Northwest Energy Efficiency Alliance 2014). Jackett und Frith (2013) kamen zu ähnlichen Ergebnissen und begründeten dies durch die erhöhte Aufmerksamkeit bei leicht ungleichmäßiger Beleuchtung. Die Bewertung von Gleichmäßigkeit ist demzufolge aus unterschiedlichen Perspektiven zu sehen, wie z.B. Verkehrssicherheit gegenüber dem Sicherheitsempfinden. Eine allgemeine Aussage, dass Gleichmäßigkeit die Erkennbarkeit von Objekten ganz allgemein fördert, kann daher nicht gemacht werden (Kuechly et al. 2018).

Was bislang in lichtplanerischen Erwägungen zu Straßensicherheit und Straßenbeleuchtung keine Rolle spielt, ist die Gefährdung der Verkehrsteilnehmer durch Kollisionen mit Lichtmasten selbst, die laut Verkehrsstatistik des Statistischen Bundesamtes einen erheblich höheren Anteil an Unfällen haben als beispielsweise eine mangelhafte Auto- oder Straßenbeleuchtung (Hänel 2017a).

3.1.3 Unerwünschte Beleuchtungswirkungen

Neben den intendierten Wirkungen der Beleuchtung kann künstliches Licht im Außenbereich auch unerwünschte visuelle Auswirkungen auf den Menschen hervorrufen. Zudem ergeben sich Beeinträchtigungen für die erdgebundene Weltraumforschung. Darüber hinaus wird erforscht, ob Beleuchtung zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führt. Die hierzu vorliegenden Erkenntnisse werden gesondert in Kapitel 3.2 betrachtet.

3.1.3.1 Unerwünschte visuelle Nebenwirkungen: Blendung, Flimmern, Blinken

Zu den direkten negativen Auswirkungen von Außenbeleuchtung gehört Blendung. Nach DIN EN 12665:2018-08 für Licht und Beleuchtung ist Blendung ein »Sehzustand, der als unangenehm empfunden wird oder eine Herabsetzung der Sehfunktion zur Folge hat, verursacht durch eine ungünstige Leuchtdichteverteilung oder durch zu hohe Kontraste«. Dabei unterscheidet man zwischen physiologischer und psychologischer Blendung. Physiologische Blendung beschreibt eine direkte messbare Erhöhung des Erkennungsschwellenwerts. Das heißt, Hindernisse können schlechter oder nicht mehr wahrgenommen werden. Psychologische Blendung bezeichnet die subjektive Wahrnehmung von Beleuchtung als störend »durch die ständige und ungewollte Ablenkung der Blickrichtung zur Lichtquelle hin, die bei einem großen Unterschied der Leuchtdichte der Lichtquelle zur Umgebungsleuchtdichte die ständige Adaptation des Auges auslöst« (LAI 2012, S. 3). Die störende Wirkung von Blendung hat damit eine subjektive Dimension, die zudem durch individuelle körperliche Dispositionen beeinflusst wird. So sind z. B. viele ältere Menschen durch eine häufig altersbedingte Trübung der Augenlinsen und eine schlechtere Anpassungsfähigkeit der Augen schneller von künstlichem Licht geblendet (SSK 2006).

Blendung kann direkt durch die Lichtquelle oder indirekt durch Reflexion, z. B. auf einer nassen Fahrbahn, erfolgen (Wittlich 2010). Das Problem hat sich in den letzten Jahren durch neue Lichtquellen mit extrem hohen Leuchtdichten (bis zu über 10.000.000 cd/m^2), beispielsweise Entladungslampen mit Keramikbrennern, Hochleistungs-LED und Xenonleuchtmittel mit kleinen Lichtaustrittsflächen, vergrößert (OÖ Energiesparverband 2015). In einer Onlinebefragung im Auftrag der Carl Zeiss Vision GmbH (2015) gaben über 50 % der Befragten an, dass sie sich besonders stark durch moderne LED- und Xenonscheinwerfer bei Autos geblendet fühlen.[12] In einer Umfrage unter Licht- und Lichtverschmutzungsexperten erklärten 75 % der Befragten die Gefährdung von Personen durch Blendung zum Problem (negative Auswirkungen auf Lebewesen betrachteten über 90 % der Befragten als wichtig; Schulte-Römer et al. 2018).

Daneben wird in der DIN-EN 12665:2016-09 auch Flimmern, der »Eindruck der Unstetigkeit visueller Empfindungen, hervorgerufen durch Lichtreize mit zeitlicher Schwankung der Leuchtdichten oder der spektralen Verteilung«, genannt. In diesem Zusammenhang klagen lichtsensitive Menschen über Sehprobleme, Kopfschmerzen und andere gesundheitliche Beeinträchtigungen (Kap. 3.2), die allerdings meist in Zusammenhang mit Innenraumbeleuchtung genannt werden. Auf Kritik stoßen auch bewegte oder blinkende Lichtquellen, Farbveränderungen von Leuchtmitteln sowie Videoinstallationen, die sich durch LED-Technologien weiter verbreiteten. Ihre nichtintendierten visuellen

12 Weiterführende Informationen zur Blendung sind bei SSK (2006) und Wittlich (2010) zu finden.

Auswirkungen auf den Menschen sind generell noch relativ wenig erforscht. Nach Angaben von Schierz (2009) im Konsultationsentwurf des BAFU (2017) werden blaues Licht sowie blinkendes Licht mit geringer und mit hoher Blinkfrequenz als besonders störend wahrgenommen. Vergleiche können hier auch mit der rotblinkenden Nachtbeleuchtung von Windparkanlagen gezogen werden, die in einigen wenigen Studien untersucht wurden (z. B. Freiberg et al. 2019). Michaud et al. (2016) kamen zu dem Schluss, dass sich solche visuellen Stressoren negativ auf das Schlafverhalten auswirken können. Pohl et al. (2012) empfahlen, dass eine reduzierte Lichtintensität und synchronisierte Blinkzeichen die Störwirkung verringern können. Allerdings werden wahrgenommene Störungen auch von der Einbindung Betroffener in den Planungsprozess beeinflusst (Hübner et al. 2019; Rudolph et al. 2017).

Eine weitere nichtintendierte visuelle Auswirkung von Außenbeleuchtung ist die Raumaufhellung, die den Menschen bei der Nutzung seines Wohnraums einschränken kann (LAI 2012). Der Grad der Störung ist dabei abhängig vom Zeitpunkt, von der Zeitdauer, von der Nutzung des Gebiets sowie von der individuellen Empfindlichkeit der Betroffenen. Auch das persönliche Problembewusstsein spielt eine Rolle (Rehmann 2013). Wie schon von anderen Sinneseindrücken, insbesondere dem Lärm, bekannt, ist auch bei Licht davon auszugehen, dass gerade die persönliche Einstellung zu künstlicher Beleuchtung die sinnliche Wahrnehmung beeinflusst (Bille 2019; Radicchi et al. 2016). Nach in Deutschland und der Schweiz erhobenen Befragungsdaten zur Wahrnehmung von künstlicher Außenbeleuchtung in der Nacht fühlen sich 8 % im periurbanen[13] Raum und bis zu 45 % in der Großstadt von der allgemeinen Stadtbeleuchtung gestört (Besecke/Hänsch 2015; Honold 2009; Rehmann 2013; Schaub 2015). Drei Viertel der Antwortenden zur Befragung von Besecke und Hänsch (2015, S. 231) gaben an, dass ihre Wohnräume mindestens zeitweilig von künstlicher Beleuchtung aus dem Außenraum erhellt werden. Als Hauptquellen nannten die Befragten Straßenbeleuchtung (54 %), Licht vom eigenen Gebäude bzw. Grundstück (38 %, vor allem im periurbanen Raum), von umliegenden Gebäuden bzw. Grundstücken (46 %, vor allem im urbanen Raum), von Verkehrslicht (41 %) und Werbebeleuchtung in der Stadt (40 %). In der Studie von Honold (2009, S. 2) gaben 65 % der Befragten Schlafstörungen als negativen Effekt an. Abschließend lässt sich festhalten, dass visuelle Störwirkungen von Licht kontextspezifisch erlebt werden (Commission Internationale de L'Eclairage 2017, S. 4): Zum einen sind sie räumlich durch die gebaute oder natürliche Umgebung und die Umgebungsbeleuchtung beeinflusst, zum anderen wird Licht während der frühen Abendstunden anders wahrgenommen als zur Schlafenszeit.

13 Als periurban gelten Gebiete, die sich im Übergang zwischen ländlichen und städtischen Räumen befinden (http://inspire.ec.europa.eu/codelist/SupplementaryRegulationValue/7_1_4_7_PeriUrbanAreas, 2.12.2019).

3.1.3.2 Beeinträchtigungen der erdgebundenen Weltraumforschung

Die zunehmende Aufhellung des Nachthimmels wirkt sich schon seit Langem negativ auf die professionelle Astronomie aus. Wichtige Forschungssternwarten wurden aus den Randbereichen von Städten in weniger dicht besiedelte Gebiete verlagert (z. B. Hamburg, Berlin, Bonn, Heidelberg, Jena, München). Heute gibt es nur noch wenige geeignete Standorte weltweit, die für die professionelle Weltraumforschung infrage kommen (Kuechly et al. 2018). Neben der Himmelsaufhellung sind Luftstabilität und eine hohe Zahl klarer Nächte für die Auswahl von Standorten wichtig. Wüsten wie etwa die Atacama in Chile oder die Kanarischen Inseln und Hawaii bieten solche Bedingungen. Allerdings stehen auch diese Gebiete zunehmend unter Druck durch neue Siedlungen (Kuechly et al. 2018). Deswegen ist es inzwischen notwendig, auch in diesen abgelegenen Gebieten, Regulierungen gegen die zunehmende Lichtverschmutzung vorzunehmen, so z. B. auf der Kanareninsel La Palma, in Tucson (USA), in Nordchile und Hawaii (Schulte-Römer et al. 2018). Wesentliche Kriterien sind dabei, dass voll abgeschirmte Leuchten mit schmalbandigen (z. B. Natriumniederdruck) oder wenig blauhaltigen Leuchtmitteln verwendet werden und eine Reduzierung der Beleuchtungsstärke im Laufe der Nacht erfolgt. Diese Methoden ermöglichen eine effektive Reduzierung der Himmelsaufhellung, wie Messungen gezeigt haben (Kap. 2.2.2).

Einen viel größeren Einfluss hat die Lichtverschmutzung allerdings auf die zahlreichen Volkssternwarten sowie auf Hobby- und Amateurastronomen, die nur lokal tätig sind (Henderson 2010). Inzwischen hat sich ein Astrotourismus in Gegenden mit noch dunklem Nachthimmel entwickelt, etwa auf La Palma, in Marokko oder Namibia (Fayos-Solá et al. 2014). In diesem neuen Wirtschaftszweig sind mehrere Anbieter tätig, genaue Zahlen sind aber nicht verfügbar.

3.1.3.3 Beeinträchtigtes Erleben natürlich dunkler Nächte durch Lichtverschmutzung

Kein Europäer lebt heute unter einem natürlich dunklen Nachthimmel. Rund die Hälfte der europäischen Bevölkerung kann die Milchstraße nicht mehr erkennen (Kap. 2.2.2). Diesen Verlust bewerten nicht nur Astronomen, sondern auch eine steigende Zahl an Forschenden aus kultur- und sozialwissenschaftlichen Disziplinen als problematisch (Edensor 2013; Gwiazdzinski 2015).

Der positive Wert der Nacht ist eng mit der kulturellen und anthropologischen Bedeutung des Sternenhimmels verbunden. Wird dieser durch künstliche Beleuchtung erhellt, ist das Betrachten der Sternenkörper nicht mehr möglich und damit der Gefühlsbezug zum Universum, das Erleben dessen immensen räumlichen Ausmaßes und des kleinen Raums, den die Menschen dabei selbst einnehmen (Blair 2017; Smith 2008). Kulturtechniken wie die Orientierung anhand von Sternbildern verlieren ihren Bezugspunkt (Huth 2013), ebenso wie

kulturelles Erbe (Sagen und Mythen, kalendarisches Wissen etc.), das fast überall auf der Welt mit dem Sternenhimmel und seinen Konstellationen verbunden ist (Ruggles/Cotte 2010). Dieses Erbe ist auch in Bauwerke eingeschrieben, deren Gestaltung sich nach dem Sternenhimmel als integralen Bestandteil und Bezugspunkt richtete (Marín et al. 2010).

Die Dunkelheit wird zudem als Zeitraum beschrieben, der Schutz bietet und Kreativität, Intimität und Transformationen fördern kann (Bach/Degenring 2015; Ekirch 2005; Stone et al. 2009). In einer in Berlin und Umgebung durchgeführten Befragung erhielt beispielsweise die Aussage, dass die Dunkelheit eine Phase der Ruhe bedeutet, die größte Zustimmung (rund 70 %), dicht gefolgt von dem Wunsch, dass die Nacht vor zu viel künstlicher Beleuchtung geschützt werden sollte (rund 65 %). Der Aussage, dass Dunkelheit ihnen ein Gefühl der Unsicherheit vermittelt, stimmten rund 55 % der Befragten zu (Besecke/Hänsch 2015). Die seelisch ausgleichende Funktion der Dunkelheit betont auch der Autor Ernst Peter Fischer in einem Zeitungsinterview, wenn er die Nacht als Zeit der Besinnung, frei von den Ablenkungen des Tages beschreibt (von Bergen 2015): »Wir brauchen sie, um unsere Besonnenheit zu bewahren. Alles, was wir nicht gedacht oder getan haben, ist noch im Dunkeln. Die Dunkelheit ist voller Potenzial, wir sollten ihr eine Chance geben. Wir sprechen nicht von ungefähr von einem Nachtleben. Nicht aber von einem Tagleben. Denn am Tag arbeitet man und plagt sich. Nachts aber lebt man. […] wir arbeiten seit der Aufklärung an der Abschaffung der Dunkelheit. Heute sehen nicht mehr alle Menschen einen richtigen Nachthimmel. Wer ihn sieht, staunt über die Erhabenheit und Schönheit. Wir Menschen brauchen die Nacht, weil wir in der Ruhe der Nacht am besten herausfinden, wer wir sind und was wir wollen.«

Künstliche Beleuchtung verändert aber auch das besondere ästhetische Erlebnis nächtlicher Natur und natürlicher Dunkelheit grundlegend (Meier et al. 2015, S. 186 f.; Edensor 2017). In der Dunkelheit tritt nicht nur der Nachthimmel, sondern es treten auch nichtvisuelle Sinneswahrnehmungen wie das Hören in den Vordergrund (Edensor 2013). Dieser veränderten Wahrnehmung werden positive Effekte auf die Kreativität und Selbstwahrnehmung zugeschrieben (Steidle et al. 2013; Steidle/Werth 2013). So werden Dunkelheitserfahrungen auch für Team- und Strategieentwicklung bei Unternehmensseminaren eingesetzt (Walther 2014). Demgegenüber wird argumentiert, dass negative Assoziationen mit Dunkelheit stärker in den Vordergrund treten, wenn natürliche Dunkelheit nicht mehr erlebt werden kann (Edensor 2013). Neben den genannten Studien gibt es allerdings bislang nur wenige sozialwissenschaftliche Analysen zur Wahrnehmung, Bewertung und Funktion von Dunkelheit und des Erlebens natürlicher Nächte (Krause 2013; Kuechly et al. 2018).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich das menschliche Verhältnis zur Nacht seit dem Beginn der künstlichen Beleuchtung und der mit ihr eintretenden Industrialisierung stark verändert hat und insbesondere Menschen in

Städten natürliche Dunkelheit kaum noch erleben. Bogard (2013, S. 252) geht davon aus, dass künstliche Beleuchtung den Referenzzustand für normale Helligkeit und Dunkelheit allgemein verschiebt und eine Amnesie der Existenz der Sterne und Dunkelheit hervorgebracht hat. Jüngere Generationen wissen folglich gar nicht, was sie verlieren. Wer in seinem Leben noch nie die Milchstraße oder einen von Sternen bedeckten Himmel gesehen hat, wird dieses Erlebnis und den Schutz des Kulturguts Sternenhimmels auch nicht einfordern (Luginbuhl 2008, S. 202). So ist das Erleben natürlicher nächtlicher Dunkelheit in Europa gewissermaßen zum Luxusgut avanciert (Entwistle et al. 2015; Hasenöhrl 2015). Dies zeigt sich auch darin, dass das Erlebnis natürlicher Dunkelheit touristisch an Bedeutung gewinnt (Kap. 3.1.3.2). Fehlende Beleuchtungsinfrastrukturen können so über die Ausweisung als Sternenpark bzw. Nachtschutzgebiet sogar zu einer Entwicklungschance für strukturschwach und schwach besiedelte Regionen avancieren (Mazenauer 2015; Weaver 2011; Witzel 2018).

3.2 Humanmedizinische Wirkungen

3.2.1 Visuelle und nichtvisuelle Wirkungen von Licht

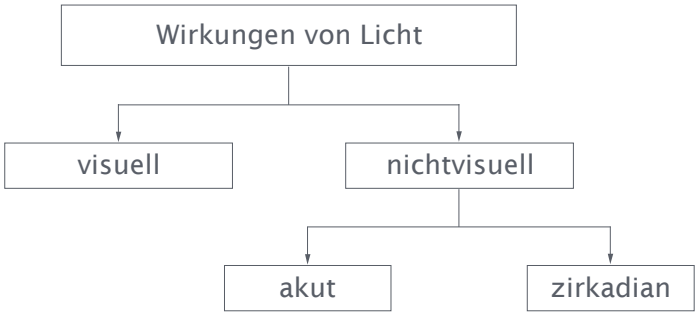
Licht ist physikalisch betrachtet elektromagnetische Strahlung innerhalb eines Wellenlängenbereichs, der durch Rezeptoren im menschlichen Auge wahrnehmbar ist und durch das Gehirn interpretiert werden kann. Es lassen sich grundsätzlich zwei Aspekte der Wirkung von Licht auf den Menschen unterscheiden, die bei der Betrachtung der humanmedizinischen Wirkung von Lichtverschmutzung relevant sind: eine visuelle Wirkung von Licht und eine nichtvisuelle Wirkung von Licht (Kantermann 2018) (Abb. 3.2).

Die *visuelle Wirkung von Licht* ermöglicht die visuelle Wahrnehmung und die Orientierung im Raum. Ein Grund für künstliche Beleuchtung ist das Ermöglichen des Sehens zu Zeiten von natürlicher Dunkelheit. Die visuelle Wirkung von Licht ist jedoch nicht humanmedizinisch relevant. Das charakteristische Merkmal der *nichtvisuellen Wirkung von Licht* ist, dass es sich um Wirkungen von elektromagnetischer Strahlung handelt, die im Wellenlängenbereich des Sichtbaren liegt, jedoch nicht für visuelle Aufgaben verwendet wird. Diese Wirkungen stehen im Verdacht, von humanmedizinischer Relevanz zu sein.[14]

14 Die Produktion von Vitamin D in der Haut durch elektromagnetische Strahlung im ultravioletten Bereich (UV-Strahlung) und das Wärmeempfinden durch Infrarotstrahlung (IR) zählen hingegen nicht zu den nichtvisuellen Lichtwirkungen, da es sich um Wellenlängenbereiche handelt, die nicht im Bereich des Sichtbaren liegen. Ebenfalls nicht betrachtet werden stroboskopische Lichteffekte (weil diese nicht zu den nichtvisuellen Lichtwirkungen zählen) sowie eine Blaulichtschädigung der Retina (Blue Light Hazard). Eine Blaulichtschädigung der Retina kann nur durch sehr hohe Lichtintensitäten erfolgen, die das Auge direkt erreichen (z. B. Laser, direkter Blick in die Sonne). Intensitäten herkömmlicher Beleuchtung im Innen- sowie im Außenraum sind nicht hoch genug für eine Blaulichtschädigung des Auges (Kantermann 2018).

Die nichtvisuelle Wirkung von Licht umfasst sowohl akute Wirkungen, die schnell einsetzen und durch einen eher kurzfristigen Charakter gekennzeichnet sind, als auch nachhaltige Wirkungen auf das zirkadiane System (Abb. 3.2).

Abb. 3.2 Wirkungen des Lichts auf den menschlichen Organismus



Eigene Darstellung

Unter *akuten nichtvisuellen Lichtwirkungen* werden die Erhöhung von – vor allem subjektiver und weniger objektiv messbarer – Wachheit bzw. Verringerung von Müdigkeit sowie die objektiv messbare Unterdrückung der Produktion des Hormons Melatonin in der Zirbeldrüse (Cajochen et al. 2005; Kantermann et al. 2012; Souman et al. 2018) verstanden (Kap. 3.2.2). Beispielsweise kann es aufgrund der akut wachmachenden Wirkung von Licht abends und nachts zu einer Verzögerung des Einschlafens kommen (Burgess/Molina 2014; Chang et al. 2015). Eine Folge davon ist verkürzter Schlaf, weil es oft nicht möglich ist, den späteren Schlafanfang durch späteres Aufwachen auszugleichen, da der Zeitpunkt des Aufwachens durch die innere Uhr mitbestimmt bzw. durch einen Wecker bestimmt wird. Die akuten Lichtwirkungen stellen sich innerhalb von Minuten ein und verringern sich innerhalb von Minuten oder wenigen Stunden, sobald keine Beleuchtung mehr vorhanden ist.

Im Gegensatz zu den akuten Lichtwirkungen betrifft die *Wirkung von Licht auf das zirkadiane System* die Synchronisation der körpereigenen Rhythmen mit dem natürlichen Wechsel von Tag (hell) und Nacht (dunkel) (Roenneberg et al. 2013; Wright et al. 2013).[15] Im Kern geht es um die Aufrechterhaltung der rhythmischen Regelmäßigkeit physiologischer Abläufe, wie z. B. der Regulation der Körpertemperatur, von Stoffwechselvorgängen oder des Schlaf-wach-Wech-

15 Die körpereigenen Prozesse des Menschen (aber auch jene von Tieren, Pflanzen und Mikroorganismen) unterliegen Rhythmen. Die prominentesten Rhythmen haben eine Periodenlänge von ungefähr 24 Stunden und heißen daher zirkadian (zu lateinisch circa = ungefähr, und lateinisch dies = Tag). Zudem gibt es noch die kürzeren ultradianen Rhythmen (z. B. Herzschlag, Atmung), die längeren infradianen (z. B. Menstruationszyklus) 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 (Schroer/Hölker 2018).

sels. Diese Körpervorgänge sind natürlicherweise zeitlich aufeinander abgestimmt (Archer/Oster 2015; Hastings et al. 2008), da sie voneinander abhängig sind bzw. aufeinander aufbauen und ein sequenzieller Ablauf auch energetisch sinnvoll ist. Ähnlich einem Orchester (nicht alle Musiker spielen wahllos zur selben Zeit, sondern in wohl arrangierter Reihenfolge und Taktung) sind Körpervorgänge zeitlich arrangiert (Kantermann 2018). Eine stabile Synchronisation der inneren Uhr, d. h. keine oder nur geringe Variationen der biologischen Rhythmen des Körpers von Tag zu Tag, ist wichtig für die Aufrechterhaltung von erholsamem Schlaf, Gesundheit und Leistungsfähigkeit (Foster et al. 2013; Neil-Sztramko et al. 2014).

3.2.2 Biologische Grundlagen nichtvisueller Wirkungen von Licht

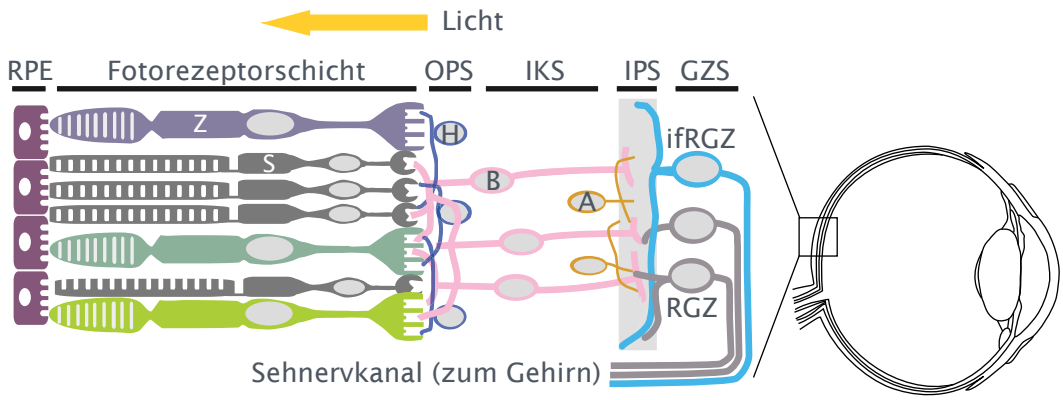
Sowohl akute als auch zirkadiane nichtvisuelle Wirkungen von Licht beeinflussen den Ablauf und die Synchronisation der menschlichen Körpervorgänge. Anzumerken ist dabei, dass eine ursächliche Unterscheidung zwischen der Störung bzw. Verkürzung des Schlafs (aufgrund akuter Lichtwirkungen), der Störung der inneren Uhr (durch die Beeinflussung des zirkadianen Systems) oder der Störung von beiden Faktoren nur schwer möglich ist. Dies wird verständlich, wenn man die biologischen Grundlagen der Entstehung nichtvisueller Wirkungen von Licht betrachtet.

Die Wahrnehmung von Licht erfolgt über lichtsensible Rezeptoren auf der Netzhaut. Diese enthalten Sehpigmente. Es sind chemische Verbindungen, die auf das einfallende Licht reagieren und elektrische Signale auslösen. Diese Signale werden über den Sehnerv des Auges an das Gehirn weitergeleitet (Goldstein 2015). Es existieren verschiedene Arten von Fotorezeptoren in der Netzhaut, wesentlich für das Sehen sind dabei Zapfen und Stäbchen. Diese unterscheiden sich nicht nur in ihrer Form, sondern auch in Funktion und Verteilung auf der Netzhaut. Die etwa 6 Mio. Zapfen in der Retina sind für die Farbwahrnehmung und das fotopische Sehen, also das Sehen bei Tageslicht, zuständig (Schandry 2006). Sie teilen sich in drei verschiedene Typen auf, die für kurzwelliges, mittelwelliges oder langwelliges Licht empfindlich sind, was in etwa den Farben Blau, Grün und Rot entspricht (Mangold 2015). Im Gegensatz zu den Zapfen sind die ca. 120 Mio. Stäbchen deutlich lichtempfindlicher und für das skotopische Sehen, also das Sehen in schwacher Beleuchtung bzw. Dämmerung, ausgelegt (Schandry 2006). Die Stäbchen können lediglich Graustufen wahrnehmen, also keine Farbreize verarbeiten.

Während für die Ermöglichung des Sehens (die visuellen Wirkungen von Licht) primär die Stäbchen und Zapfen verantwortlich sind, wird die nichtvisuelle Wirkung des Lichts über Ganglienzellen auf der Netzhaut realisiert (Abb. 3.3). Ein Teil der Ganglienzellen, die intrinsisch fotosensitive RGC, ent-

hält das lichtempfindliche Pigment Melanopsin und ist hauptsächlich für elektromagnetische Strahlung der Wellenlängen zwischen 460 und 490 nm sensitiv, die vom menschlichen Gehirn als blaues Licht wahrgenommen wird (Brainard et al. 2001; Hattar et al. 2002). Über den Sehnerv wird dieser Lichtreiz auch an den vorderen Hypothalamus im Gehirn geleitet. Ein Kern des vorderen Hypothalamus ist der Nucleus suprachiasmaticus (SCN), die Schaltstelle der zirkadianen Rhythmik (Abrahamson et al. 2001; Van den Pol 1980). Die SCN-Zellen werden durch Signale des natürlichen Wechsels von Tag und Nacht stimuliert (Rimmer et al. 2000).

Abb. 3.3 Schematische Darstellung des menschlichen Sehapparats



Z = Zapfen
S = Stäbchen
H = horizontale Zellen
B = bipolare Zellen
A = amakrine Zellen
GZS = Ganglienzellschicht
RPE = retinales Pigmentepithel
OPS = äußere plexiforme Schicht
IKS = innere Kernschicht
IPS = innere plexiforme Schicht
ifRGZ = intrinsisch fotosensitive retinale Ganglienzellen
RGZ = retinale Ganglienzellen

Licht durchdringt die Schichten der Netzhaut, bevor es auf die Stäbchen (S) und Zapfen (Z) (Fotorezeptorschicht) trifft. Die Information der Stäbchen und Zapfen wird über retinale Ganglienzellen (RGZ) verschaltet. Die Ausläufer der RGZ bilden den Sehnerv, der in das Gehirn zieht. Ein Teil der RGZ enthält das Pigment Melanopsin, diese Zellen werden als intrinsisch fotosensitive RGZ (ifRGZ) bezeichnet.

Quelle: nach Hatori/Panda 2010

Künstliche Beleuchtung beinhaltet Wellenlängen, auf die die fotosensitiven Ganglienzellen reagieren (Nowozin et al. 2017; Zeitzer et al. 2000). Dem Körper ist es dann nicht mehr möglich, zwischen Tag (hell) und Nacht (dunkel) zu unterscheiden. Eine Folge davon ist, dass die Ausschüttung des Hormons Melatonin unterdrückt oder zeitlich verschoben wird, welches durch die Zirbeldrüse im Gehirn natürlicherweise freigesetzt wird, wenn die Helligkeit der Umgebung gering genug ist. Melatonin ist maßgeblich an der Regulation des Schlafs und

der zeitlichen Koordination vieler Körpervorgänge beteiligt (Arendt 2005). So wird während der melatonininduzierten Tiefschlafphase die Ausschüttung des Wachstumshormons Somatropin stimuliert, dessen Mangel zu erhöhter Körperfettmasse, reduzierter Muskelmasse und einer verringerten Knochenmineraldichte führen kann. Ein weiterer Melatonineffekt liegt in seiner Wirkung als Antioxidans, von der eine krebshemmende Wirkung ausgeht.

Aufgrund der wichtigen Rolle des Melatonins hat sich die Messung entsprechender Melatoninwerte zur Beurteilung der nichtvisuellen Wirkung von Licht etabliert. Grundsätzlich bietet sich neben Melatonin jeder Parameter der menschlichen Physiologie als Marker der inneren Uhr an, jedoch hat sich Melatonin als sehr robust und reproduzierbar herausgestellt, da es z. B. auch gegenüber körperlicher Aktivität oder Nahrungsaufnahme weniger störanfällig ist (Kantermann/Eastman 2017). Gemessen wird dabei nicht die absolute Höhe des Melatoninspiegels, die individuell sehr verschieden sein kann, sondern der Zeitpunkt, zu dem Melatonin eine bestimmte Schwelle überschreitet. Hierzu werden über den Abend hinweg mindestens acht bis zehn Speichelproben im Abstand von 30 bis 60 Minuten bei Lichtintensitäten unter 10 lx gesammelt (Lewy/Sack 1989). Studien im Schlaflabor zeigen, dass die Freisetzung von Melatonin durch helles und vor allem blauhaltiges Licht gehemmt wird (Cajochen et al. 2005; Santhi et al. 2012; van de Werken et al. 2013). Dieser Effekt konnte z. B. auch für die LED-Beleuchtung von Monitoren oder E-Book-Readern nachgewiesen werden (Cajochen et al. 2011; Chang et al. 2015; Green et al. 2017).

Unterdrückung und Verzögerung der Melatoninausschüttung können zu einer Verschiebung der Rhythmen des Körpers führen (Rea et al. 2005). Künstliches Licht am Abend führt so zu einer Nachtverschiebung, d. h., der Schlafanfang sowie damit verbundene Parameter, wie das Minimum von Körperkerntemperatur oder die Kortisolkonzentration im Blut, verschieben sich auf spätere Zeitpunkte (Khalsa et al. 2003). Die verschobenen Rhythmen sind dann unter Umständen nicht mehr untereinander sowie mit dem natürlichen Wechsel von Tag und Nacht synchronisiert. Dies kann zur Beeinträchtigung körpereigener Vorgänge führen (Kantermann 2013; Roenneberg et al. 2013; Scheer et al. 2009). Mögliche gesundheitliche Folgen werden im nächsten Teilkapitel dargestellt.

3.2.3 Humanmedizinische Wirkungen von Licht in der Nacht

Humanmedizinisch relevante Wirkungen von Licht in der Nacht werden aus der akuten Unterdrückung der Ausschüttung des Hormons Melatonin abgeleitet und durch die damit verbundene Störung des zirkadianen Systems. Hinsichtlich der akuten nichtvisuellen Lichtwirkungen hat sich seit einigen Jahren in der humanmedizinischen Literatur die Light-at-Night(LAN)-Hypothese etabliert (Davis et al. 2001; Kantermann/Roenneberg 2009; Schernhammer et al. 2006). Die LAN-Hypothese stellt eine Verknüpfung der im Folgenden aufgeführten Einzelbeobachtungen dar:

1. Melatonin wird nachts in Dunkelheit ausgeschüttet.
2. Melatonin ist ein Radikalfänger.
3. Melatonin hat krebshemmende Wirkung.
4. Licht unterdrückt die Freisetzung von Melatonin.
5. Licht in der Nacht unterdrückt die onkostatische Wirkung von Melatonin und fördert das Wachstum von karzinogenem Gewebe.

Anzumerken ist, dass, obgleich die Punkte 1 bis 4 für sich individuell stimmig sind, die LAN-Hypothese in ihrer Gesamtheit (also Punkt 5) nicht kausal belegt ist (Kantermann 2018). Unklar ist insbesondere, ob eine Unterdrückung von Melatonin durch Licht zu einer Entstehung von Krebs führen kann oder ob fehlendes Melatonin lediglich das Wachstum von bereits bestehendem karzinogenem Gewebe fördert. Beispielsweise zeigt sich, dass in Nagetiere implantiertes humankarzinogenes Gewebe durch eine Gabe von Melatonin im Wachstum gehemmt werden kann. Dieser Zusammenhang ist auf die Humanforschung übertragen worden, primär auf den Bereich der gesundheitlichen Folgen durch Schicht- und Nachtarbeit (weil Nachtarbeit ohne Licht in der Nacht nicht möglich ist) (Akerstedt 2003; Folkard 2008; Frost et al. 2009). In diesen Studien deutet sich ein Zusammenhang zwischen Nacht- und Schichtarbeit und dem Risiko einer Brustkrebserkrankung an, eine eindeutige Kausalität lässt sich aber nicht ableiten (Wang et al. 2011). In Bezug auf die Rolle der Beleuchtung ist jedoch zu betonen, dass Schicht- und Nachtarbeit durch eine Vielzahl weiterer humanmedizinisch relevanter Faktoren gekennzeichnet sind, die für sich in ihrer Wirkung auf ein Erkrankungsrisiko ebenfalls noch zu erforschen sind. Aus diesem Grund ist die Übertragung von Hypothesen aus der Schichtarbeitsforschung auf den Bereich der Lichtverschmutzung nicht direkt möglich (Kantermann/Roenneberg 2009; Kyba/Kantermann 2016). So liegt derzeit keine Untersuchung vor, die einen eindeutigen kausalen Zusammenhang zwischen Licht bei Nacht und Krebsentstehung belegt (Kantermann 2018; Johns et al. 2018).

Die Interpretation einer humanmedizinischen Wirkung von Licht über die Verschiebung der zirkadianen Rhythmik ist ebenfalls nicht trivial, da Licht in der Nacht oftmals mit Nahrungsaufnahme und körperlicher Aktivität einhergeht, die selbst wieder eine Wirkung auf die Rhythmen des Körpers haben. So erhöht beispielsweise Nahrungsaufnahme zu den Zeiten des gewöhnlichen Schlafs die Wahrscheinlichkeit für Übergewicht und Fettleibigkeit (McHill et al. 2017; Scheer et al. 2009; Wyse et al. 2014). Für eine verlässliche Interpretation der Wirkung von Licht auf das zirkadiane System müssen Mehrfachmessungen bei denselben Personen unter verschiedenen Lichtbedingungen miteinander verglichen werden. Diese Parameter sind besser im Schlaflabor als unter natürlichen Bedingungen zu messen. Ohne eine Erfassung verschiedener physiologischer Marker sowie individueller Lichtverhältnisse über mehrere Tage oder Wochen hinweg können keine verlässlichen Aussagen über eine Lichtwirkung getroffen werden. Es müssen deshalb möglichst viele Einflüsse erfasst werden,

um zu beurteilen, wie viel Licht in der Nacht eine Person über welchen Zeitraum ausgesetzt war und welche weiteren und ebenfalls wirksamen Faktoren mit Licht in der Nacht lediglich assoziiert sind (Kantermann 2018).

Trotz noch bestehender Wissenslücken gilt, dass durch eine Störung des zirkadianen Systems über einen längeren Zeitraum negative Folgen für Schlaf, Leistungsfähigkeit und Gesundheit möglich sind. Für eine stabile Synchronisation der inneren Uhr sind Licht am Morgen, helle Tage und dunkle Nächte wesentlich. Künstliches Licht am Abend sowie nachts kann durch eine Störung des zirkadianen Systems zu Konzentrations- und Aufmerksamkeitsdefiziten (Banks et al. 2010; Lim/Dinges 2008) sowie zu einem erhöhten Unfallrisiko führen (Folkard 2008; Mitler et al. 1988). Ebenfalls stehen psychische Belastungen (Albrecht 2013; Wirz-Justice 2006), Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Diabetes (Scheer et al. 2009 u. 2010) sowie Übergewicht (McHill et al. 2017) auf der Liste der möglichen Folgen durch eine Störung des zirkadianen Systems. Auch ein erhöhtes Risiko für Krebserkrankungen wird im Zusammenhang mit der akuten und nachhaltigen Störung des zirkadianen Systems durch Licht in der Nacht beschrieben (Bullough et al. 2006; Erren et al. 2008; Stevens 2009). Dabei können fünf allgemeine Faktoren identifiziert werden, die die nichtvisuelle Wirkung von Licht beeinflussen (Kantermann 2018):

- Lichtintensität: Helleres Licht hat eine stärkere Wirkung als weniger helles Licht. Ein wissenschaftlich begründeter Grenzwert, ab wann eine bestimmte Lichtintensität humanmedizinisch relevante nichtvisuelle Wirkungen entfaltet, existiert jedoch nicht.
- Lichtspektrum: Licht mit vielen Anteilen im Wellenlängenbereich zwischen 460 und 490 nm (die der Mensch als blau wahrnimmt) hat eine stärkere Wirkung als Licht mit weniger solchen Anteilen.
- Zeitpunkt der Lichtexposition: Die Wirkung von Licht variiert mit der Tageszeit. In den Dämmerungsphasen und nachts können Wirkungen von künstlichem Licht sowohl das zirkadiane System stören als auch akut Müdigkeit reduzieren und Melatonin unterdrücken und somit auf unterschiedlichen Wegen den Schlaf stören.
- Dauer der Lichtexposition: Je länger die Lichtexposition, desto stärker der Effekt. Die Wirkung von hellem und blauem Licht nimmt allerdings mit zunehmender Dauer der Lichtexposition ab. Dies deutet auf ein Sättigungsverhalten des zirkadianen Systems gegenüber Licht hin. Inwieweit es Sättigungserscheinungen im Hinblick auf die nichtvisuelle Wirkung von Lichtverschmutzung gibt, ist nicht bekannt.
- Lichthistorie, d. h. Dauer (Intensität, Spektrum) vorheriger Lichtexposition (Chang et al. 2011 u. 2013): Ein Aufenthalt mehrerer Stunden in gedimmtem Licht (Dunkeladaptation) kann dazu führen, dass das zirkadiane System auf eine darauffolgende Exposition mit hellem Licht stärker reagiert als nach vorherigem Aufenthalt in hellem Licht. Es muss beachtet werden, dass

viele Laborstudien mit Licht nach einer Dunkeladaptation durchgeführt wurden. Eine unmittelbare Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Menschen, die nicht dunkeladaptiert sind, ist dann nicht möglich.

Unklar ist, ab welchem Ausmaß der Verschiebung von zirkadianen Rhythmen eine Gefährdung für die Gesundheit vorliegt. Schwellen- oder Referenzwerte gibt es weder für Lichtintensitäten noch für zeitliche Verschiebungsgrade zirkadianer Rhythmen (Kantermann 2018). Dies liegt zum einen daran, dass eine künstlich im Labor induzierte Desynchronisation nicht so lange aufrechterhalten werden kann bzw. darf, bis eine tatsächliche Gesundheitsgefährdung eintritt. Bei Feldstudien außerhalb des Schlaflabors hingegen liegen meist Endpunkte vor und es fehlen die notwendigen Daten der vorherigen individuellen Exposition, um verlässliche Aussagen treffen zu können. Ein noch wenig verstandener Einflussfaktor ist zudem die langfristige Adaptationsfähigkeit des zirkadianen Systems. Dies bedeutet, es ist noch nicht ausreichend verstanden, inwieweit sich das zirkadiane System an bestimmte Lichtverhältnisse anpassen kann und was hierbei Schwellenwerte sind. Dass solche Anpassungen stattfinden können, zeigen Ergebnisse einer niederländischen Studie (Gimenez et al. 2014) über den Einfluss eines dauerhaften Tragens von orangefarbenen Kontaktlinsen, die eine Reduktion des Einfalls von Licht in einem Spektralbereich zwischen 420 und 500 nm um mehr als 50 % bewirken. Nach 30 Minuten Tragen der Kontaktlinsen war die lichtinduzierte Unterdrückung von Melatonin reduziert. Nach 16-tägigem Tragen der Kontaktlinsen war die lichtinduzierte Unterdrückung von Melatonin allerdings genauso hoch, als ob die Kontaktlinsen nie getragen worden wären.

3.2.4 Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis zu den humanmedizinischen Wirkungen

Die eben skizzierten Erkenntnisse zu den humanmedizinischen Wirkungen von Licht beziehen sich auf die Exposition des Menschen mit künstlicher Beleuchtung in der Nacht in Innenräumen. Zu fragen ist daher, inwieweit sich solche Wirkungen auch aus der als Lichtverschmutzung bezeichneten unerwünschten Aufhellung der Umwelt und des Nachthimmels durch künstliches Licht im Außenbereich ableiten lassen. Dazu wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchung eine Literaturstudie durchgeführt (Kantermann 2018), die insgesamt 19 publizierte wissenschaftliche Studien zum Thema identifiziert hat (Tab. 3.1).

Alle 19 Studien sind vom Typ Beobachtungsstudie, d. h., es werden statistische Zusammenhänge zwischen Beleuchtung, ggf. Beleuchtungsintensitäten, in der Nacht und dem Auftreten verschiedener Krankheiten untersucht. Für die Bestimmung des Ausmaßes künstlicher Beleuchtung im Außenbereich wurden in 14 der 19 Studien Daten des U.S. Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) verwendet. Dort werden die nachts von der Erde in den Weltraum ab-

gegebenen Lichtmengen in einem ca. 3 Stunden großen Zeitfenster (uhrzeitlich unterschiedlich je nach geografischer Lage der Studienorte) dokumentiert. In 4 der 19 Studien wurde der Einfluss des von außen in den Innenraum scheinenden Lichts (z. B. Straßenbeleuchtung vor dem Schlafzimmerfenster) subjektiv mittels Fragebögen und/oder Interviews erhoben. In 1 der 19 Studien wurden objektive fotometrische Messungen im Außenbereich von Straßenzügen in Ortschaften durchgeführt.

Hinsichtlich der untersuchten Krankheitsbilder lag der Fokus bei 13 der 19 Beobachtungsstudien auf der Inzidenzrate für Brustkrebs. In 2 Studien wurden Zusammenhänge zwischen Licht in der Nacht im Außenbereich und Prostata-, Dickdarm- und Lungenkrebs untersucht, in 2 anderen der Einfluss auf Übergewicht und Fettleibigkeit. In 1 Studie wurden die Auswirkungen auf die Melatoninproduktion, in einer weiteren auf das Schlafverhalten analysiert.

Die Hypothese bei allen 19 Studien ist, dass Lichtverschmutzung eine Wirkung auf die Produktion von Melatonin und/oder die Funktion des zirkadianen Systems des Menschen hat. Diese Wirkung wird von den Autoren als das hauptsächliche Risiko für die Gesundheit vermutet. In keinen der 19 Studien wurde zwischen den Quellen der Lichtverschmutzung, wie z. B. öffentliche oder private Straßen-, Park-, Wege- und Uferbeleuchtung, dekorative oder werbliche Gebäudeanstrahlungen, Medienfassaden, Skybeamern oder Lichtkunst, unterschieden.

In 15 der 19 Studien wurde an Orten mit höherer nächtlicher Beleuchtung ein erhöhtes Risiko gefunden, von der jeweils untersuchten Krankheit betroffen zu sein. Dieser Zusammenhang besteht sowohl für das am häufigsten untersuchte Krankheitsbild Brustkrebs (10 von 13 Studien fanden einen positiven Zusammenhang) als auch für Fettleibigkeit und Prostatakrebs (jeweils beide Studien fanden einen positiven Zusammenhang). Allerdings handelt es sich bei den in Tabelle 3.1 aufgeführten Studien um Korrelations- und Regressionsanalysen. Diese zeigen zwar einen statistischen Zusammenhang zwischen der räumlichen Verteilung künstlicher Beleuchtung in der Nacht und dem Risiko einer Erkrankung auf, daraus lassen sich aber keine Schlussfolgerungen zu *kausalen* Zusammenhängen zwischen den beiden Beobachtungsgrößen ziehen. So könnte das hier gezeigte Ergebnis auch wie folgt interpretiert werden: Von Krebs betroffene Frauen leben im Vergleich zu Frauen ohne Krebs mit einer statistisch signifikant höheren Wahrscheinlichkeit an Orten, die nachts durch erhöhte Lichtwerte im Außenbereich gekennzeichnet sind (Kantermann 2018).

Unabhängig davon, in welcher Weise Kausalität bestehen mag, stellt sich die Frage: Welche Rahmenbedingungen kommen an Orten mit hohen Werten von Lichtverschmutzung zusammen, die zu einer erhöhten Inzidenz für beispielsweise Krebs führen? Notwendig zur Beantwortung dieser Frage sind personenbezogene Messungen der Exposition gegenüber dem allgemeinen Grad der Lichtverschmutzung und anderer Faktoren. Solche Daten fehlen bisher.

Tab. 3.1 Beobachtungsstudien zu den humanmedizinischen Wirkungen von Lichtverschmutzung

Nr.	Referenz	Ort	Lichtmessung	Geschlecht	Krankheitsbild	Ergebnis bezüglich Risikos
1	Kloog et al. (2008)	Israel	Satellit	Frauen	Brustkrebs	erhöht
2	Kloog et al. (2009)	Israel	Satellit	Männer	Prostatakrebs	erhöht
3	Kloog et al. (2010)	Israel	Satellit	Frauen	Brustkrebs	erhöht
4	Kloog et al. (2011)	Israel	Fragebogen	Frauen	Brustkrebs	erhöht
5	Bauer et al. (2013)	USA	Satellit	Frauen	Brustkrebs	erhöht (bei Kaukasierinnen)
6	Rybnikova et al. (2015)	weltweit	Satellit	Frauen u. Männer	Brustkrebs	erhöht (bei Europäer(inne)n
7	Keshet-Sitton et al. (2016)	Israel	Fragebogen	Frauen	Brustkrebs	erhöht
8	Keshet-Sitton et al. (2017a)	Israel	Luxmeter	Frauen	Brustkrebs	erhöht
9	Koo et al. (2016)	Japan	Satellit	Frauen u. Männer	Fettleibigkeit	erhöht
10	Kim et al. (2016)	Südkorea	Satellit	keine Angabe	Brustkrebs	erhöht
11	Ohayon/Milesi (2016)	USA	Satellit	Frauen u. Männer	Schlafdauer	reduziert
12	Portnov et al. (2016)	USA	Satellit	Frauen	Brustkrebs	erhöht
13	Rybnikova et al. (2016)	weltweit	Satellit	Frauen u. Männer	Fettleibigkeit	erhöht
14	James et al. (2017)	USA	Satellit	Frauen	Brustkrebs	erhöht (bei Raucherinnen und Schichtarbeiterinnen)
15	Kim et al. (2017)	Südkorea	Satellit	Männer	Prostatakrebs	erhöht
16	Li et al. (2010)	USA	Fragebogen	Frauen	Brustkrebs	nicht erhöht
17	Hurley et al. (2013)	USA	Satellit	Frauen	Melatonin	nicht erhöht
18	Hurley et al. (2014)	USA	Satellit	Frauen	Brustkrebs	nicht erhöht
19	Keshet-Sitton et al. (2017b)	Israel	Fragebogen	Frauen	Brustkrebs	nicht erhöht

Quelle: leicht verändert nach Kantermann (2018, S. 20 f.)

Des Weiteren geht aus den Studien hervor, dass z. B. Lifestyle, Rauchen, Alkoholkonsum, Schichtarbeit oder Einkommen stärkere humanmedizinisch relevante Einflussfaktoren sind als Lichtverschmutzung (allein). Die Erhebung dieser Daten und eine Interpretation möglicher Zusammenhänge ist eine Herausforderung. Denn Licht in der Nacht geht mit vielen dieser Faktoren einher bzw. macht z. B. Nahrungsaufnahme und Arbeiten in der Nacht erst möglich. Notwendig sind deshalb auch Studien über die Kontextabhängigkeit der Wirkung von Lichtverschmutzung. Eine zentrale Frage ist, wie bestimmte genetische Prädispositionen gegenüber bestimmten Pathologien, Umweltbedingungen (z. B. helle oder dunkle, aber auch laute oder ruhige Nächte etc.) sowie individuelle Verhaltensweisen (z. B. Nahrungsaufnahme oder Alkoholkonsum) während der Nacht zusammenwirken.

Ungeachtet der Einschränkungen der Aussagekraft der vorliegenden Ergebnisse sind die analysierten Studien durch eine Reihe von methodischen Schwächen gekennzeichnet, die sowohl die Durchführung der Datenerhebungen als auch die Auswertung der Daten, ihre Interpretation und die Darstellung der Ergebnisse betreffen. Einige zentrale Probleme sind (eine detaillierte Kritik zu den Studien findet sich bei Kantermann 2018):

Die zur Ermittlung der Niveaus der Lichtverschmutzung genutzten Satellitendaten haben nur eine sehr grobe räumliche Auflösung (zwischen 750 m und 5 km). Ungenaue oder gar falsche Zuweisungen von Lichtmessung und Ort sind daher nicht auszuschließen. Die Satelliten messen zudem nur Licht, das in den Weltraum abgestrahlt wird, nicht aber auf den Erdboden scheint (Kap. 2.1.3) (Kuechly et al. 2018; Kyba 2016).

In keiner der 19 Studien wurde ermittelt, ob die Menge an Licht, die durch die Satelliten erfasst wurde, repräsentativ war für die Menge an Licht, die Menschen an diesen Orten ausgesetzt waren. Auch wurde in keiner der Studien erhoben, welchen Anteil das Licht im Außenraum an den Lichtintensitäten im Innenraum hatte. So fanden z. B. Rea et al. (2011) in ihrer Untersuchung von 72 Teilnehmenden keinerlei Assoziation zwischen Licht im Außenraum und entsprechenden Lichtwerten im Schlafzimmer.

In 14 der 19 Studien wurden Jahresdurchschnittswerte der Lichtmessdaten der Satelliten verwendet. Inwieweit solche Mittelwerte valide Entsprechungen für tatsächliche Lichtexpositionen sind, ist nicht geklärt. Saisonale Unterschiede oder Unterschiede zwischen einzelnen Nächten können so nicht berücksichtigt werden.

Nur in einer der untersuchten Studien (Nr. 17, Hurley et al. 2013) wurden Melatoninwerte erfasst, obwohl bei allen 19 Studien als Begründung für die Ergebnisse eine Wirkung der Lichtverschmutzung sowohl auf die Produktion von Melatonin als auch das zirkadiane System herangezogen wurde. Gerade Hurley et al. (2013) fanden in ihrer Studie aber keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Lichtverschmutzung und veränderten Melatoninwerten.

Während des Schlafs selbst ist von keiner relevanten Wirkung der Lichtverschmutzung auf das zirkadiane System auszugehen, da geschlossene Augen den Lichteinfall auf die Netzhaut begrenzen und sich teilweise die Augäpfel nach oben in Richtung Schädelgrube drehen (Kantermann/Roenneberg 2009). Möglich wäre eine Wirkung beispielsweise im Fall von nächtlichem Erwachen mit ggf. Verlassen des Bettes. Da es hierzu keine Studien und somit auch keine Daten gibt, kann nur spekuliert werden.

Schließlich kann mit Studien auf Basis von Satellitendaten nicht erfasst werden, inwieweit sich subjektiv störendes Licht in der Nacht (langfristig) auf die Gesundheit auswirkt. Die »Psychologie der Lichtverschmutzung« ist bislang nicht hinreichend untersucht. Sollte durch das als störend empfundene Licht der Schlaf nachhaltig gestört sein (z. B. zu kurz und/oder nicht erholsam), so kann dies zu gesundheitlichen Problemen führen, auch wenn keine unmittelbare Wirkung durch Lichtverschmutzung nachweisbar ist. So zeigt die Studie Nr. 11 (Ohayon/Milesi 2016), dass ein Wohnen in der Nähe von Quellen für Lichtverschmutzung zu größerer Unzufriedenheit mit der Schlafqualität und Schlafdauer führen kann. Dadurch kann sich die Wahrscheinlichkeit erhöhen, eine Störung der zirkadianen Rhythmen zu entwickeln. Es wurden allerdings keine objektiven Merkmale für den zirkadianen Rhythmus erhoben, sondern lediglich subjektive Erhebungsdaten als Maß für eine Störung des zirkadianen Rhythmus interpretiert. Dennoch ist gestörter Schlaf für sich ein Risikofaktor und Lichtverschmutzung könnte sich somit als subjektiver Stressor herausstellen.

3.2.5 Fazit aus humanmedizinischer Sicht

Die wissenschaftliche Evidenz hinsichtlich eines unmittelbaren (kausalen) Zusammenhangs zwischen Lichtverschmutzung und humanmedizinisch relevanten Wirkungen ist auf der Basis der vorliegenden Studien als eher gering einzuschätzen (Kantermann 2018). Die identifizierten Gesundheitsrisiken, die im Zusammenhang mit Lichtverschmutzung diskutiert werden, zeichnen sich durch geringe statistische Schätzwerte aus, d. h., nur ein geringer Anteil der beobachteten Unterschiede im Krankheitsrisiko lässt sich mit Unterschieden im Ausmaß der Lichtverschmutzung in der jeweiligen Untersuchungsregion begründen. Im Gegensatz dazu zeichnen sich z. B. die Faktoren Pro-Kopf-Einkommen, Alkoholkonsum oder Schichtarbeit durch eine höhere statistische Signifikanz mit humanmedizinisch relevanten Wirkungen aus.

Die ausgewerteten Studien lassen keine separate Betrachtung einer humanmedizinischen Wirkung von Licht im Innenraum gegenüber Licht im Außenraum (Lichtverschmutzung) zu. Die Erhebungsmethoden lassen auch keine Aussage darüber zu, inwieweit einzelne Personen durch Lichtverschmutzung betroffen waren. Es liegen keine ausreichenden Daten darüber vor, wie viel Licht der Lichtverschmutzung im Außenraum tatsächlich im Innenraum (z. B. im

Schlafzimmer) ankommt. Ohne eine validierte Expositionsmatrix, um betroffene Personen zu identifizieren, können keine validen Risikoabschätzungen durchgeführt werden.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Innenraumbeleuchtung sowie der Gebrauch von lichtemittierenden elektronischen Geräten (Laptop, Smartphone etc.) ebenfalls einen Einfluss auf das zirkadiane System haben können (Burgess/Molina 2014; Chang et al. 2015; Green et al. 2017). Inwieweit hier das Licht der Lichtverschmutzung im Außenraum eine zusätzliche Rolle zum Licht im Innenraum spielt, ist jedoch nicht untersucht worden.

Die Datenlage (auf Basis der Studien in Tabelle 3.1) erlaubt keine Festlegung auf Referenz- oder Grenzwerte hinsichtlich einer humanmedizinisch relevanten Wirkung von Lichtverschmutzung. Es gibt keine Studien, aus denen eine Dosis-Wirkungs-Beziehung bezüglich der Höhe der Lichtverschmutzung und dem Ausmaß humanmedizinisch relevanter Wirkungen abgeleitet werden könnte.[16] Zudem fehlen sowohl eine eindeutige Definition von Lichtverschmutzung hinsichtlich visueller und nichtvisueller Wirkungen als auch entsprechende Kriterien, um Lichtverschmutzung valide zu erfassen. Dies schließt eine messbare Trennung zwischen Lichtverschmutzung und der allgemeinen Beleuchtung im Innenraum mit ein.

Für eine Gesamteinschätzung können die Empfehlungen der SSK (2001) zur Beurteilung von wissenschaftlichen Zusammenhängen bezüglich elektromagnetischer Felder herangezogen werden:

- Wissenschaftlich *nachgewiesen* wäre demnach ein Zusammenhang zwischen einer humanmedizinisch relevanten Wirkung und Lichtverschmutzung, wenn wissenschaftliche Studien voneinander unabhängiger Forschungsgruppen diesen Zusammenhang reproduzierbar zeigen und das wissenschaftliche Gesamtbild das Vorliegen eines kausalen Zusammenhangs stützt.
- Ein wissenschaftlich *begründeter Verdacht* läge vor, wenn Ergebnisse bestätigter wissenschaftlicher Untersuchungen einen Zusammenhang zeigen, aber die Gesamtheit der wissenschaftlichen Untersuchungen das Vorliegen eines kausalen Zusammenhangs nicht ausreichend stützt. Das Ausmaß des wissenschaftlichen Verdachts richtet sich nach der Anzahl und der Konsistenz der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeiten.
- *Wissenschaftliche Hinweise* lägen vor, wenn einzelne Untersuchungen auf einen Zusammenhang hinweisen, aber nicht durch voneinander unabhän-

16 Die Studie von Keshet-Sitton et al. (2017a) kann als ein erster Ansatz für eine Schwellenwertberechnung verstanden werden. Sie empfehlen auf Grundlage ihrer Untersuchungsdaten, dass die Melatoninausschüttung ab Beleuchtungsintensitäten von etwa 16 lx beeinflusst wird. Ob sich ein Grenzwert von 16 lx tatsächlich als effektiv herausstellen könnte, müsste jedoch in Experimenten überprüft werden. Unklar bleibt auch, in welchem Abstand zu einem Haus, einer Wohnung oder einem Schlafzimmer dieser Wert im Außenbereich gelten soll.

gige Untersuchungen bestätigt sind und durch das wissenschaftliche Gesamtbild nicht gestützt werden.

Aufbauend auf dieser Abstufung kann hinsichtlich der humanmedizinischen Wirkung von Lichtverschmutzung zusammengefasst werden:

- Es besteht ein wissenschaftlich begründeter Verdacht, dass eine direkte nächtliche Lichtexposition in Innenräumen eine nachteilige Wirkung auf die Gesundheit haben kann.
- Es liegen wissenschaftliche Hinweise vor, dass Lichtverschmutzung in der Nacht im Außenraum zu nachteiligen Auswirkungen für die Gesundheit führen könnte.
- Es liegen jedoch für beide Hypothesen keine wissenschaftlichen Nachweise vor.

3.3 Ökologische Wirkungen

Tiere und Pflanzen sind auf deutliche, regelmäßige Unterschiede in ihrer Lichtumgebung angewiesen, um ihr saisonales und tagesrhythmisches Verhalten und die damit verbundenen physiologischen Prozesse mit der Außenwelt synchronisieren zu können. Die Eigenschaften dieser endogenen Rhythmen wurden an einer Vielzahl von Tieren, Pflanzen und Mikroorganismen im Labor und im Freiland untersucht. Dabei zeigte sich, dass fast alle untersuchten Organismen Rhythmen unterliegen, wie sie auch für den Menschen in Kapitel 3.2.2 erläutert wurden (Schroer/Hölker 2018).

Die unterschiedlichen Lichtphasen zu Tag, Nacht, Sonnenauf- und -untergang bieten temporale Nischen, an die sich Organismen evolutionär angepasst haben. Ein Drittel der Wirbeltiere ist nachtaktiv, dazu gehören alle Fledermausarten und fast alle Amphibien. Bei den Wirbellosen sind sogar zwei Drittel der bekannten Arten nachtaktiv (Hölker et al. 2010).

Seither steigt die Erhellung der nächtlichen Hemisphäre rasant an (Kap. 2.3). Die Erhellung von Nachtlandschaften kann insbesondere Organismen beeinträchtigen, die sich in den Nischen der Dämmerung und der Nacht entwickelten und sich deren Wahrnehmung auf die dann herrschenden Lichtverhältnisse einstellte (Rich/Longcore 2006). Lichtinduzierte Veränderungen des Verhaltens und in der Artzusammensetzung könnten dabei kaskadenartige Auswirkungen auf Ökosysteme haben und verändern daher nicht nur die Bedingungen für nachtaktive, lichtsensible Arten, sondern auch indirekt die Bedingungen für tagaktive Arten und das Funktionieren ganzer Ökosysteme (Bennie et al. 2015; Knop et al. 2017; Manfrin et al. 2017).

Im Folgenden wird auf Basis des Gutachtens von Schroer und Hölker (2018) dargestellt, welche wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Wirkung von

Lichtverschmutzung auf Pflanzen (Kap. 3.3.1) bzw. auf verschiedene Tierarten (Kap. 3.3.2) vorliegen und wie die damit ausgelösten Belastungen und Verhaltensänderungen in einen ökologischen Gesamtkontext einzuordnen sind (Kap. 3.3.3).

3.3.1 Wirkungen auf Pflanzen

Die Auswirkungen von künstlichem Licht auf Pflanzen sind in zahlreichen wissenschaftlichen Studien beschrieben und werden weltweit in Gewächshäusern und Laboren genutzt, um beispielsweise Gemüse und Zierpflanzen über ihre natürlichen Wachstumsrhythmen hinaus zu stimulieren. Nichtintendierte Auswirkungen durch künstliches Licht in der Nacht sind hingegen noch weitgehend unerforscht, obwohl Pflanzen, Pilze, Flechten, Algen und Periphytongemeinschaften (Aufwuchsgemeinschaften aus Grün- und Kieselalgen, Cyanobakterien und andere Mikroorganismen) sehr stark auf Licht reagieren und ihr Wachstum oft eine essenzielle Grundlage für ganze Ökosysteme darstellt (Schroer/Hölker 2018).

Pflanzen antworten auf Lichtreize mit Bewegung der Stomata (Atemöffnungen) und der Chloroplasten (Zellkompartimente für die Fotosynthese) sowie mit veränderten Wachstumseigenschaften. Die Signale regulieren das Wachstum nach den tagesrhythmischen und saisonalen Bedürfnissen, z. B. durch Blütenbildung, Samenreifung oder Laubabwurf. Lichtverhältnisse steuern das Wachstum der Pflanze nach ihren Lichtbedürfnissen, beispielsweise in den Schatten oder hin zum Sonnenlicht. Eine Verzögerung des Laubabwurfs durch Straßenbeleuchtung wurde schon in den 1930er Jahren bei einigen Laubbäumen beobachtet (Matzke 1936). Am stärksten betroffen von den Auswirkungen der Lichtverschmutzung sind Pflanzen, die empfindlich auf die Tageslänge reagieren (Chaney 2002). Künstliches Licht, vor allem die Emissionen im längerwelligen Bereich (rotes und infrarotes Lichtspektrum), kann die Tageslänge und somit zugleich die Signalwirkung für die Blüteninduktion und den Laubabwurf verändern. Veränderte Blütezeiten und ein verspäteter Laubabwurf können zur Folge haben, dass plötzlich einbrechende Fröste das Gewebe beschädigen oder die Synchronisation der Blüten mit dem Auftreten der Bestäuber beeinträchtigen. Zusätzlich steigt das Risiko der Pflanzen, durch Luftverschmutzung oder Wasserdefizite geschwächt zu werden, weil das tagesrhythmische Öffnen und Schließen der Stomata unter dem Einfluss künstlichen Lichts reduziert wird und die Poren für längere Zeit geöffnet bleiben (Chaney 2002).

Obwohl die Regulierung von Pflanzenwachstum durch Licht in der Pflanzenproduktion eine sehr große Rolle spielt (z. B. Dutta Gupta 2017; Johansen et al. 2011; Vänninen et al. 2010), finden sich relativ wenige Literaturhinweise auf nichtintendierte Auswirkungen von künstlichem Licht. Manchmal wird dieser Faktor sogar komplett übersehen. Beispielsweise verglichen Pretzsch et al.

(2017) in ihrer Studie das Wachstum ruraler und urbaner Bäume über einen Zeitraum von 150 Jahren an unterschiedlichen Standorten weltweit. Die Autoren ermittelten, dass Bäume wegen der Klimaerwärmung in den Metropolen schneller wachsen, aber auch schneller altern. Während der Faktor Temperatur sehr ausführlich erläutert wurde, war der Faktor künstliche Beleuchtung in der Nacht völlig ignoriert worden. Hingegen zeigten Somers-Yeates et al. (2016) in ihrer Studie an vier Laubbaumarten, dass eine verfrühte Knospenbildung vor allem in beleuchteten Gebieten stattfindet und nicht so stark in wärmeren, urbanen Gebieten.

In einigen wenigen wissenschaftlichen Studien wurden überdies Auswirkungen der Straßenbeleuchtung auf saisonale Lebensgemeinschaften von Mikroorganismen in aquatischen Sedimenten nachgewiesen (Hölker et al. 2015). Bei einer Beleuchtungsexposition der Stärke 7 bis 8 lx über einen Zeitraum von 5 bis 6 Monate (zwischen Juli und Dezember) auf der Sedimentoberfläche eines Entwässerungsgrabens nahm die Anzahl fotosynthesetreibender Kieselalgen und der Cyanobakterien zu. Nach 1 Jahr Exposition hatte das künstliche Licht die natürlichen Zeitgeber Tageslänge und Temperatur so weit überlagert, dass sich die Sommer- und Winterlebensgemeinschaften nicht mehr in ihrer Zusammensetzung unterschieden. In anschließenden Laborversuchen reichten den Mikroorganismen 70 lx künstliches Nachtlicht (70 lx entsprechen starker Straßenbeleuchtung) während eines im Labor simulierten Sommerszenarios aus (20 °C mit einem Hell-dunkel-Zyklus von 16,5 Stunden Tag und 7,5 Stunden Nacht), um während der Nacht Fotosynthese zu betreiben (Kyba et al. 2014), was ein zu dieser Tageszeit unnatürliches, in der Evolutionsgeschichte der Organismen noch nie dagewesenes Phänomen darstellt (Hölker et al. 2015).

In einem subalpinen Flusslauf wurden weiterhin durch experimentelle Beleuchtung während der Nacht mit 20 lx Beleuchtungsstärke auf der Wasseroberfläche in jungen Periphytonstadien eine Abnahme der Biomasse der typischen Primärproduzenten des Aufwuchs (Grün- und Kieselalgen, Cyanobakterien) und eine gleichzeitige Änderung der Zusammensetzung der Lebensgemeinschaft festgestellt (Grubisic et al. 2017). Diese Auswirkungen auf die frühen Periphytonstadien können potenziell Bottom-up-Effekte auf höheren Ebenen des Nahrungsnetzes hervorrufen und die Funktion der Ökosysteme ändern.

Viele Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung auf die Flora werden indirekt durch lichtinduzierte Verhaltensänderung der Fauna hervorgerufen (Schroer/Hölker 2018). Gerade die Auswirkungen der Beleuchtung auf Insekten spielen dabei eine sehr große Rolle (Kap. 3.3.2). Veränderungen der Vegetation können aber auch durch Verhaltensänderungen der Herbivoren hervorgerufen werden, die für die Samenausbreitung verantwortlich sind, wie Vögel (Levey 2005) oder Fledermäuse (Lewanzik/Voigt 2014). Durch den Verlust einzelner Bestäuber, die beispielsweise auf spezifische Blütenformen angepasst sind, wird die Stabilität im Gefüge von Pflanzengemeinschaften gefährdet (Fontaine et al. 2006).

Welche Rolle dabei die Auswirkungen von künstlichem Licht auf nachtaktive Bestäuber hat, ist heute noch vergleichsweise wenig erforscht. Macgregor et al. (2015) listeten fast 300 Pflanzenarten auf, die nachweislich zumindest teilweise auf Nachtbestäubung angewiesen sind. Die geringere Fruchtbildung kann wiederum zu indirekten Systemeffekten führen, da sich viele Tagbestäuber von den Früchten ernähren, was sich wiederum auf das Angebot der tagbestäubenden Insekten und damit auf deren Leistung auswirken könnte (Knop et al. 2017). Der Verlust einzelner spezifischer Funktionen kann demnach Konsequenzen für die Struktur von Lebensgemeinschaften und Ökosystemprozesse nach sich ziehen, die sich kaskadenartig in Ökosystemen ausweiten (Bennie et al. 2015).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass nur eine kleine Anzahl wissenschaftlicher Studien zu Wirkungen künstlicher Beleuchtung auf Pflanzen vorliegt und noch erheblicher Forschungsbedarf besteht, insbesondere im Hinblick auf damit verknüpfte ökosystemare Wirkungen (siehe auch Kap. 3.3.3).

3.3.2 Wirkungen auf Tiere

3.3.2.1 Insekten

Insekten sind in fast allen Lebensräumen der Erde zu finden und erfüllen dort wesentliche Funktionen. Zum einen ernähren sich viele Tiere (Vögel, Frösche, Eidechsen, Fische etc.) überwiegend von Insekten oder deren Frühstadien. Zum anderen werden zahlreiche Kulturpflanzen sowie die meisten Bäume und Sträucher von Insekten bestäubt. Schließlich sind Insekten wichtige Regulatoren der Nährstoff- und Energieflüsse, indem sie beispielsweise die Abbauprozesse organischen Materials (Pflanzen, Tiere, aber auch Kot) beschleunigen (Schroer/Hölker 2018).

Die wissenschaftlichen Ergebnisse zum Insektenrückgang haben in jüngster Vergangenheit erhebliche politische und gesellschaftliche Resonanz gefunden. Die Gefährdung von Insektenarten durch den Faktor künstliches Licht wird bislang noch wenig diskutiert (Schroer/Hölker 2018). Eine Studie über die Entwicklung von Falterpopulationen in den letzten 30 Jahren in den Niederlanden (van Langevelde et al. 2018) zeigte jedoch deutlich, dass tagaktive Arten weniger gefährdet sind als nachtaktive Arten und Letztere umso gefährdeter sind, je lichtsensitiver sie sind. Inwieweit unterschiedliche Insektenarten durch den Faktor künstliches Licht in der Nacht in welcher Quantität gefährdet sind und welche Ökosystemfunktionen dadurch betroffen sein könnten, ist bis heute jedoch unzureichend erforscht. Da ein Großteil der Arthropoden nachtaktiv ist und extrem empfindlich auf künstliches Licht in der Nacht reagiert, muss mit deutlichen Auswirkungen gerechnet werden.

Ein alltäglich beobachtbares Phänomen ist die Anziehungskraft, die künstliches Licht in der Nacht auf Insekten ausübt. Abend- und nachtaktive Insekten

orientieren sich im Flug an den UV-Strahlen der Abendsonne sowie am Mondlicht und fliegen daher oft bis zur völligen Erschöpfung künstliche Lichtquellen an, da sie nicht in der Lage sind, diese von den natürlichen Lichtquellen zu unterscheiden. Eine Straßenleuchte allein kann bis zu tausend Insekten in einer Nacht anziehen (Eisenbeis 2006; Eisenbeis/Eick 2011). Die orientierungslosen Insekten werden im Schein der Lampen leichte Beute für ihre Jäger (z. B. lichttolerante Fledermäuse oder Spinnen). Viele andere Arten von Jägern sind hingegen sehr lichtscheu. Sie müssen sich mit den Insekten begnügen, die nicht von Beleuchtung angezogen werden. Es wird vermutet, dass dies langfristig zu Verschiebungen ganzer Nahrungsnetze und der Artenzusammensetzung von Ökosystemen führen kann (Manfrin et al. 2017).

Obwohl an Straßenleuchten bis zu 70 % mehr Falter zu beobachten sind als an unbeleuchteten Standorten, sinkt die Vielfalt der auftretenden Falterarten um über 25 % (Macgregor et al. 2017). Weiterhin tragen Falter an beleuchteten Standorten deutlich weniger Pollen als in natürlicher Dunkelheit. Damit kann die Reproduktionsleistung von Pflanzen gemindert werden. Zusätzlich produzieren Nachtfalter unter Beleuchtung weniger körpereigene Pheromone, d. h., ihre eigene Reproduktionsleistung nimmt ebenfalls ab (van Geffen et al. 2015). Schließlich konnte gezeigt werden, dass männliche Nachtfalter stärker als weibliche von künstlichem Licht angezogen werden (Degen et al. 2016). Die kontinuierliche Entnahme von männlichen Faltern vor der Reproduktion kann empfindliche Populationen in ihrer Existenz bedrohen (Degen et al. 2017).

Je breitbandiger das Spektrum des Lichts eines Leuchtmittels ist (Abb. 2.13), desto mehr Insekten sind von der anziehenden Wirkung betroffen (Davies et al. 2013). Die von der EU bereits per Verordnung vom Markt gerufene Quecksilberdampfhochdrucklampe zeigte eine bis zu 7-fach höhere Attraktion als andere Leuchtmittel (van Grunsven et al. 2014). Natriumdampfhochdrucklampen ziehen wiederum mehr Insekten an als Natriumdampfniederdrucklampen. Durch Filter auf Halogenmetalldampflampen, die die Wellenlängen des ausgestrahlten Lichts unter 420 nm ausschließen, kann die Attraktion auf Insekten um den Faktor 6 und auf Nachtfalterarten um den Faktor 4 reduziert werden (Verovnik et al. 2015). Eine ähnlich reduzierte Attraktion auf viele Arten stellen dieselben Autoren auch für gelbe Natriumdampfbeleuchtung fest.

Die insektenfreundliche Wirkung von LED-Beleuchtung ist umstritten. Bei den vorliegenden wissenschaftlichen Studien kommt es zu teils konträren Ergebnissen; über die Gründe für diese Unterschiede kann gegenwärtig nur spekuliert werden (Macgregor et al. 2019). Eisenbeis und Eick (2011) wiesen 80 % weniger Attraktion durch LED-Beleuchtung im Vergleich zu Quecksilberdampfleuchten nach. Auch im Vergleich zu Natriumdampfhochdruckleuchten schneidet LED-Beleuchtung ein wenig besser ab. Hümer et al. (2011) bestätigten diese Ergebnisse (Tab 3.2); als Grund für die geringere Attraktion wurde genannt, dass die LED-Lampen kaum bis keine UV-Lichtemissionen aufweisen, die die Insekten zur Orientierung nutzen. Auch Longcore et al. (2015) wiesen

eine geringere Attraktion durch LED auf verschiedene Insektenarten nach. Pawson und Bader (2014) widersprachen diesen Ergebnissen und zeigten in ihrer Studie, dass vor allem Falter und Zweiflügler stärker von LED-Beleuchtung als von Natriumdampfhochdruckleuchten angezogen werden. Die Autoren machten vor allem den höheren Anteil der kurzwelligen Lichtemissionen der LED-Lampen verantwortlich. Auch Macgregor et al. (2019) fanden in ihrer Untersuchung, dass die Pflanzenreproduktion auf mit Natriumdampfhochdruck beleuchteten Flächen höher ist als auf mit LED beleuchteten Flächen.

Die verschiedenen Ergebnisse könnten auf einen unterschiedlichen Experimentalaufbau der Studien zurückzuführen sein, denn nicht nur die spektrale Zusammensetzung, sondern auch die Beleuchtungsstärke und die Lichtverteilungskurve variieren bei den unterschiedlichen Leuchtmitteln und nehmen daher Einfluss auf die Attraktion auf Insekten (Schroer/Hölker 2018). Dringend werden daher Studien benötigt, bei denen LED mit anderen Leuchtmitteln bei vergleichbarer Beleuchtungsstärke und Abstrahlungsgeometrie bewertet werden. Weiterhin wurden in keiner dieser Studien mögliche Leuchtdichteschwankungen bei LED berücksichtigt, die zwar für den Menschen kaum wahrnehmbar sind, bei Insekten aber zu Irritationen führen und daher eine geringere oder eventuell auch stärkere Attraktion durch Beleuchtung ausüben können (Barroso et al. 2017).

Schließlich werden künstliche Beleuchtungsanlagen nicht isoliert betrieben, sondern bilden räumliche Muster, z. B. entlang eines Straßenverlaufs. Die kontinuierliche Anordnung von Straßenbeleuchtungssystemen kann Barriereeffekte für Insekten auslösen, die mithilfe einer Experimentalinfrastruktur (Abb. 3.4) untersucht wurden (Degen et al. 2016). Es konnte gezeigt werden, dass Natriumdampfhochdruckbeleuchtung Attraktionsradien von über 20 m auf Nachtfalter ausübt. Bei typischen Mastabständen von 20 bis 45 m in den europäischen Straßenbeleuchtungssystemen überschneiden sich diese Radien. Das bedeutet, dass Nachtfalter sehr viel Zeit und Energie an solchen Barrieren verbrauchen, die dann beispielsweise für eine erfolgreiche Fortpflanzung fehlen. Lebensräume können durch solche Lichtbarrieren fragmentiert werden. Eine Umrüstung von Straßenbeleuchtung auf LED-Technologie ergab, dass zwar insgesamt weniger Insekten gefangen wurden, die Attraktionsradien sich aber vor allem für aquatische Insekten vergrößerten (Schroer/Hölker 2018).

Die Insektenfänge in diesem Experiment zeigten, dass der Anteil an aquatischen Insekten überproportional zunimmt und dass sich das Verhältnis der Insektenordnungen im Vergleich zu dem Verhältnis ohne Beleuchtung im gleichen Gebiet verschiebt (Manfrin et al. 2017). Diese Verschiebungen im Ökosystem wirken sich auch auf Prädatoren wie Spinnen, Weberknechte und Fledermäuse aus (Davies et al. 2012; Manfrin et al. 2017) und können sich kaskadenartig auf das gesamte Nahrungsnetz ausweiten (Bennie et al. 2015).

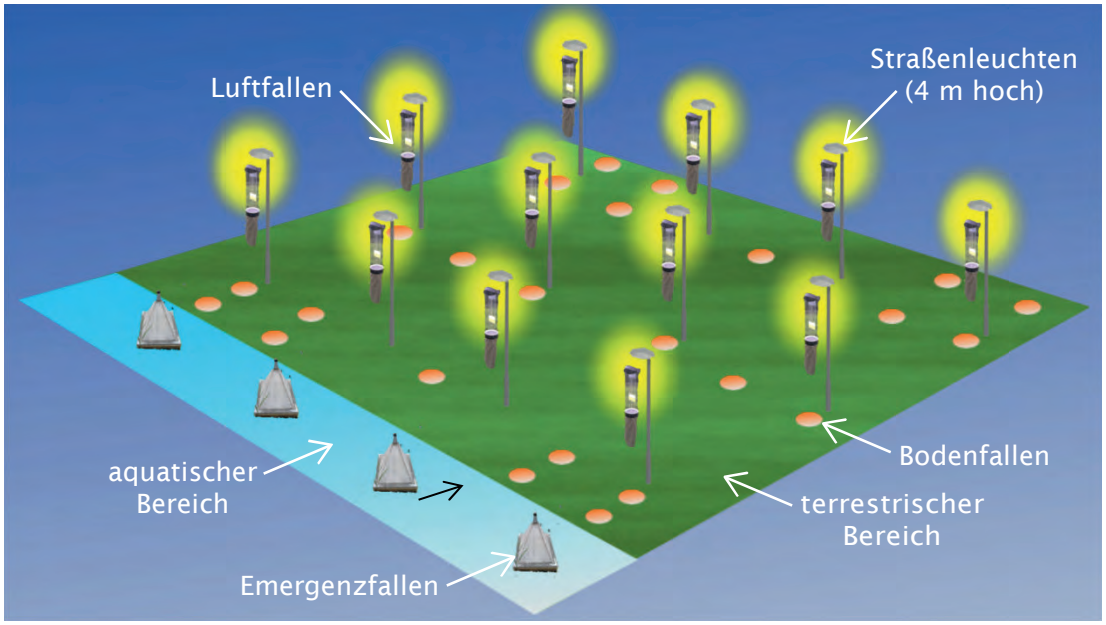
Tab. 3.2 Insektenattraktion durch unterschiedliche Leuchtmittel bei einer Feldstudie in Tirol (Österreich); Anzahl Individuen

Taxa	HQI TS 5.600 K	HCI TT 3.000 K	HCI EIP 4.200 K	NAV 2.000 K	LED 1 6.000 K	LED 2 3.000 K	Summe
Schaben (Blattodea)	1	1	1	3	3	3	12
Käfer (Coleoptera)	486	427	277	137	135	117	1.579
Zweiflügler (Diptera)	103	109	75	50	53	36	426
Kleine Dipteren (< 2mm)	2.820	3.400	1.830	1.650	750	421	10.871
Eintagsfliegen (Ephemeroptera)	13	14	10	12	5	7	61
Wanzen (Heteroptera)	298	242	126	93	73	46	878
Zikaden (Auchenorrhyncha)	46	38	17	117	17	14	249
Pflanzenläuse (Sternorrhyncha)	108	282	129	84	29	14	646
Falter (Lepidoptera)	1.249	1.160	740	494	127	107	3.877
Hautflügler (Hymenoptera)	227	819	206	171	88	42	1.553
Netzflügler (Neuroptera)	69	38	17	11	2	2	139
Köcherfliegen (Trichoptera)	12	6	6	1	2	0	27
Staubläuse (Psocoptera)	52	63	35	26	13	11	200
Summe	5.484	6.599	3.469	2.849	1.297	820	20.518

HQI TS = Metallhalogendampfhochdrucklampe mit Quarzbrenner, 78 W
HCI TT = Metallhalogendampfhochdrucklampe mit Keramikbrenner, 74 W
HCI EIP = Metallhalogendampfhochdrucklampe mit Keramikbrenner, 73 W
NAV = Natriumdampfhochdrucklampe, 70 W
LED 1 = kaltweiß, 2 x 25 W
LED 2 = warmweiß, 2 x 25 W

Quelle: Hümer et al. 2011

Abb. 3.4 Experimentalinfrastruktur zur Erforschung struktureller und funktioneller Auswirkungen von künstlichem Licht auf ein Ökosystem



In den Emergenzfallen werden Insekten gesammelt, die aus dem Boden oder einem Gewässer in die Luft aufsteigen (= emergieren).

Quelle: nach Manfrin 2017

Ein weiteres Problem für die Reproduktion von aquatischen Insekten ist die Polarisation künstlichen Lichts auf Straßen und anderen glatten Flächen. Das polarisierte Licht ähnelt dem Signal, das aquatische Insekten zur Orientierung für ihre Eiablage nutzen (Horváth et al. 2009). Durch eine mögliche Fehlablage der Eier reduziert sich der Reproduktionserfolg der betroffenen Populationen. Zwar wurde kürzlich nachgewiesen, dass für viele Insektenarten der Attraktionseffekt bei polarisierten Flächen mit dem Abstand zu einem Gewässer sogar zunimmt (Robertson et al. 2018); insgesamt ist dieses Phänomen wissenschaftlich aber noch nicht ausreichend untersucht und verstanden (Schroer/Hölker 2018).

Auch im Wasser kommt es zu Verhaltensänderungen von Insekten und anderen Arthropoden.[17] Beispielsweise halten sich Wasserflöhe unter natürlichen Bedingungen tagsüber in tieferen dunklen Wasserschichten von Seen auf, um in der Nacht an der Wasseroberfläche Algen abzuweiden. Durch eine künstliche Aufhellung des Nachthimmels kann die tagesperiodisch gesteuerte Vertikalwanderung der Wasserflöhe gestört werden, indem sowohl die Amplitude der Wanderbewegung als auch die Anzahl der wandernden Individuen verändert wird (Moore et al. 2000). Wenn Wasserflöhe durch Lichteinwirkung nachts nicht

17 Zu den Arthropoden (auch Gliederfüßer) gehören Insekten, Tausendfüßer sowie Krebs- und Spinnentiere.

mehr in gleichem Maß an die Wasseroberfläche wandern, können sie weniger Algen fressen, sodass eine Zunahme der Algenbiomasse und Eintrübung des Sees zu erwarten ist, obwohl die Nährstoffverhältnisse unverändert sind. Diese hätte negative Konsequenzen für die Wasserqualität des Sees (Hölker et al. 2018).

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

Andere Arten reagieren mit Vermeidungsstrategien. Signalkrebse suchen unter Straßenbeleuchtung verstärkt Refugien auf und graben sich z. B. in das Sediment ein (Thomas et al. 2016). Die Autoren erläutern, dass das aufgewühlte Feinsediment Organismen mit sensiblen Kiemen beeinträchtigen könnte, indem beispielweise die Überlebensrate von Fließgewässerarten, wie Lachsen, während des Ei- und Larvenstadiums durch eine nicht ausreichende Sauerstoffversorgung in den Zwischenräumen der Kieslaichplätze verringert wird.

Aber selbst Prädatoren, die sich auf Beute spezialisieren, die von Licht angezogen wird, profitieren nicht automatisch von künstlichem Licht. Durch hohe Fluktuation in der Biomasse der Beute erhöht sich das Risiko mancher Spinnenarten, während der Häutung zu sterben, wenn ihre Körpermasse zu schnell anwächst (Marczak/Richardson 2008). Brückenspinnen, z. B. die an der Hamburger Elbphilharmonie angesiedelte Larinioides sclopetarius, reagieren auf erhöhtes Nahrungsangebot mit einer um bis zu 300-mal erhöhten Reproduktionsrate (Kleinteich 2009). Das erhöhte Auftreten dieser Spinnenart ist nicht nur unangenehm für Anwohner und kostenintensiv in der Säuberung, es ist ein starkes Zeichen veränderter Räuber-Beute-Beziehungen im Ufergebiet.

Zusammenfassend ist zu konstatieren, dass die Auswirkungen durch künstliches Licht in der Nacht auf die Insektenfauna in vielen Analysen bisher übersehen oder verharmlost werden. Zu welchem Anteil Lichtverschmutzung am beobachteten Insektenrückgang mitverantwortlich ist, kann derzeit nicht beantwortet werden. Deutlich ist allerdings, dass Beleuchtung in der Nacht erhebliche Attraktionswirkung auf Insekten ausübt und daher das Verhalten der Insekten, aber auch Jäger-Beute-Interaktionen verändert. In der Literatur wird die Wirkung verschiedener Leuchtmittel teils kontrovers diskutiert. Es ist zu schlussfolgern, dass LED nicht pauschal als insektenfreundlich bezeichnet werden kann. Vor allem in Gewässernähe können hohe Beeinträchtigungen der Insektenfauna auftreten.

3.3.2.2 Vögel

Obwohl Vögel vorwiegend tagaktiv sind, werden sie wegen ihres ausgeprägten visuellen Sinns stark durch künstliches Licht, insbesondere mit Wellenlängen

im UV-Bereich, beeinflusst. Beobachtbare Verhaltensänderungen betreffen vor allem die Desorientierung der Tiere und damit eine steigende Kollisionsgefahr und eine verlängerte Tagesaktivität.

Künstliches Licht lenkt Zugvögel von ihren Routen ab und erhöht somit das Risiko, von Räubern gefangen zu werden oder an Gebäuden oder anderen Hindernissen, wie z. B. Windkraftanlagen oder Mobilfunkmasten, zu kollidieren. So zeigten Gehring et al. (2009), dass die Zahl der getöteten Vögel an Mobilfunkmasten um mehr als 50% reduziert werden kann, indem dauerhaft leuchtende rote Warnlichter entfernt werden.[18] Neben wandernden Vögeln kollidieren auch viele See- und Sturmvögel mit Gebäuden oder Küstenformationen, wenn diese stark beleuchtet sind (Evans Ogden 1996; Miles et al. 2010; Rodríguez et al. 2014 u. 2015). Abhilfe kann z. B. an Leuchttürmen oder Windkraftanlagen durch blitzendes oder stroboskopisches Licht statt rotierender oder stationärer Leuchten geschaffen werden (Jones/Francis 2003). Dies kann allerdings zu Belästigungen der Anwohner führen, die besonders durch blinkende Beleuchtung gestört werden (Kap. 3.1.3).

Natriumdampfhochdruckleuchten mit einer Farbtemperatur von 2.000 K bewirken weniger Kollisionen von Sturmvögeln als LED-Beleuchtung mit einer Farbtemperatur von 4.000 K (Rodríguez et al. 2017). An Ölplattformen zeigte sich, dass blaues oder grünes Licht zu weniger Kollisionen führt als rotes oder warmweißes Licht (Poot et al. 2008). Krijgsveld et al. (2015) zeigten, dass die Lichtintensität größeren Einfluss auf die Orientierung der Vögel hat als die Lichtfarbe. Daher empfehlen die Autoren die Abschaltung der Beleuchtung bzw. reduzierte Beleuchtungsstärken während der Wanderzeiten in den Monaten Oktober und März und während des Sinkfluges der Vögel zur Landung nach Mitternacht.

Ein weiterer Effekt künstlicher Beleuchtung ist die verlängerte Tagesaktivität insbesondere von Singvögeln, die bei vielen Arten von der Beleuchtungsstärke beeinflusst wird (da Silva et al. 2017; Dominoni et al. 2013b; Nordt/Klenke 2013). Bei Kohlmeisen wird bereits ab 0,15 lx eine verlängerte Tagesaktivität festgestellt; bei 5 lx verlängert sich die Tagesaktivität um 5 Stunden und mehr (de Jong et al. 2016b). Die empfindliche Reaktion von Singvögeln auf künstliches Licht ist abhängig von der Art, dem jeweiligen Verbreitungsraum und dem jeweiligen Wellenbereich (da Silva/Kempenaers 2017; da Silva et al. 2014; Kempenaers et al. 2010; Welbers et al. 2017). Welche fitnessrelevanten Auswirkungen eine verlängerte Tagesaktivität auf Vögel hat, ist noch nicht ausreichend erforscht. Vordergründig könnte eine verlängerte Aktivitätszeit sogar von Vorteil sein, weil mehr Zeit für die Nahrungssuche genutzt werden kann. Allerdings

18 Allerdings ist der Zusammenhang zwischen Befeuerung, z. B. von Windkraftanlagen, und Kollisionsschäden komplex und von zahlreichen Faktoren abhängig, wie Marques et al. (2014) in einem Review der bis dahin vorliegenden wissenschaftlichen Literatur zum Thema zeigen. Beleuchtung wird in dieser Studie als Risikofaktor benannt, stellt aber keine Priorität dar, um Kollisionen zu vermeiden.

zeigen die Vögel, welche länger in die Nacht hinein aktiv sind, auch reduzierte Aktivitätsleistungen während des Tages (Dwyer et al. 2013). Das kann am höheren Nahrungsangebot durch den Attraktionseffekt bei Straßenbeleuchtung liegen oder daran, dass die Vögel fehlende Ruhephasen ausgleichen (Welbers et al. 2017). Es wird vermutet, dass das erhöhte Vorkommen einiger Vogelarten an beleuchteten Flächen mit dem erhöhten Nahrungsangebot zusammenhängt (Spoelstra et al. 2015).

In Waldrandgebieten, welche partiell mit 5 bis 7,5 lx auf dem Boden erleuchtet wurden, konnte jedoch keine Beeinflussung auf die Tagesaktivität beobachtet werden (da Silva et al. 2017). Es wird vermutet, dass Vögel beleuchtete Bereiche bewusst meiden. So zeigten Untersuchungen an mit Datenloggern ausgestatten Kohlmeisen, dass die in der Nähe einer Lichtquelle nistenden Vögel einer vergleichbaren Lichtexposition ausgesetzt waren wie Kohlmeisen, die in dunkleren Gebieten nisteten (de Jong et al. 2016b). Raap et al. (2017) stellten fest, dass freilebende Kohlmeisen beleuchtete Nistkästen meiden. Werden Kohlmeisen während der Nestpflege mit Licht direkt an ihrem Nistkasten konfrontiert, weisen sie in der zweiten Woche der Nestpflege eine erhöhte Nahrungssuchaktivität auf (Titulaer et al. 2012). Eine Aufhellung innerhalb der Nistkästen, z. B. durch hereinscheinende künstliche Beleuchtung, bewirkt, dass die Mütter später einschlafen, früher aufwachen und allgemein weniger schlafen (Raap et al. 2016b). Auch die Nestlinge verlangen stärker nach Nahrung während einer beleuchteten Nacht, was das Schlafverhalten der Mütter beeinflusst und umgekehrt.

In Revieren an mit Straßenbeleuchtung gesäumten Waldrändern ist doppelt so viel Polygynie bei Blaumeisen zu beobachten wie in Revieren im unbeleuchteten Zentrum des Waldes (Kempenaers et al. 2010). Kempenaers et al. (2010) verwiesen darauf, dass durch die Beleuchtung Selektionsfaktoren beeinflusst werden könnten, indem nicht das stärkste Erbgut in die Reproduktion eingebunden wird. Gleichzeitig könnte diese bevorzugte Wahl des Männchens in Beleuchtungsnähe aber auch eine Adaptation der Vögel an künstliche Beleuchtung beschleunigen.

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

Es wird vermutet, dass die Gründe für die Veränderungen im Verhalten der Vögel überwiegend hormonellen Ursprungs sind (Schroer/Hölker 2018). Bei Amseln und Spatzen wurden Änderungen in der Ausschüttung von Hormonen

festgestellt, die die Fortpflanzung regeln (Dominoni et al. 2013b; Russ et al. 2015). So nimmt der Spiegel verschiedener Sexualhormone unter Beleuchtung ab und ihr Verhältnis zueinander ändert sich (Schoech et al. 2013). Weiterhin ermittelten Ouyang et al. (2015) bei Kohlmeisen steigende Kortikosteronwerte und eine verminderte Anzahl an Nachkommen fest, je näher diese an einer künstlichen Lichtquelle nisteten. Auch der Spiegel des Hormons Melatonin, das die physiologischen Stoffwechselprozesse während der nächtlichen Ruhephase reguliert (siehe auch Kap. 3.2.2), wird durch künstliche Beleuchtung unterdrückt (de Jong et al. 2016a; Dominoni et al. 2013b). Der Grad der Unterdrückung variiert mit der Vogelart und der Beleuchtungsintensität. Bei einer Melatoninsuppression wurden Veränderungen physiologischer Parameter festgestellt, die für die Immunabwehr verantwortlich sind (Raap et al. 2016a). Es besteht jedoch noch großer Forschungsbedarf, welche (weiteren) fitnessrelevanten Auswirkungen eine Veränderung des Melatoninspiegels mit sich führt.

Im Ergebnis ist zusammenzufassen, dass künstliches Licht in der Nacht erhebliche Auswirkungen auf tagesrhythmisches und saisonales Verhalten von Vögeln hat. Welche fitnessrelevanten Folgen dies hat, ist jedoch noch nicht hinreichend erforscht. Einige Vögel nutzen visuelle Vorteile für die Futtersuche, andere scheinen Lichtexpositionen in ihrem Lebensraum während der Nacht zu meiden. Kurzwelligeres Licht mit höheren Grün- und Blauanteilen scheint sich aber stärker auf die Hormonausschüttung, auf das zirkadiane und saisonale Verhalten auszuwirken als rotes Licht.

3.3.2.3 Fische

Licht kann die Oberflächen von Gewässern durchdringen und wirkt auch dort als Taktgeber für das Leben. Wie empfindlich Fische auf Licht reagieren, hängt stark von der Art ab und vor allem davon, welches Habitat die Art besetzt. Da Wasser dichter als Luft ist, hat Licht dadurch einen anderen Brechungsindex und wird stärker absorbiert. In reinem Wasser werden kürzere Wellenlängen (blaues Licht) weniger absorbiert als längerwelliges rotes und gelbes Licht. Die kurzwellige Strahlung dringt dadurch tiefer in die Wassersäule ein. Unterschiedliche Schwebstoffe wie Huminstoffe, Phyto- und Zooplankton sind optisch wirksame Partikel, die das Licht streuen und absorbieren. Mit zunehmendem Schwebstoffanteil können, je nach Eigenschaften dieser Partikel, längere Wellenlängen gestreut und die kurzen absorbiert werden. Deshalb erscheinen nährstoffreiche Seen meist grün-gelblich (Brüning/Hölker 2015).

Auf künstliches Licht reagieren die Fischarten entweder lichtscheu oder werden vom Licht angezogen. Für die lichtscheuen Aale können beleuchtete Staudämme oder Brücken erhebliche Barrieren darstellen, vor allem wenn das Licht stromaufwärts gerichtet ist. In einem Test zeigten die Tiere Aufwärtsbewegungen entgegen des Stroms zur Vermeidung des Lichts über die gesamte

Dauer des Versuchs (30 Minuten) (Lowe 1952). Königslachse hingegen können Beleuchtung nutzen, um Dämme stromabwärts erfolgreicher zu überwinden (Kemp/Williams 2009). Untersuchungen mit der Fischbrut atlantischer Lachse zeigten, dass die Tiere von künstlicher Beleuchtung angezogen werden und lange in beleuchteten Bereichen verweilen, sodass die Ausbreitung verzögert wird (Riley et al. 2013). Der Raumwiderstand einer Gewässerlandschaft nimmt durch künstliches Licht zu. Dadurch wird die Wanderung zeit- und energieaufwendiger, was insbesondere bei weiten Strecken für wandernde Arten, wie dem Aal oder dem Lachs, die natürliche synchronisierte Fortpflanzung gefährden kann (Hölker et al. 2018).

Durch künstliche Beleuchtung können sich Räuber-Beute-Interaktionen verändern, weil für größere Raubfische die visuelle Wahrnehmung zunimmt (Villamizar et al. 2011) und mehr Beute vom Licht angezogen wird (Keenan et al. 2007). Das Verhalten der meisten Fischarten unterliegt einer natürlichen Tagesrhythmik, die durch künstliche Beleuchtung gestört werden kann. So kommen kleine Fische oft erst nach Einbruch der Dunkelheit in höhere Ebenen des Wassers, weil die Dunkelheit sie vor Räubern schützt. Becker et al. (2013) beobachteten, dass die Aktivität von Fischen unter 10 cm Länge in oberflächennahen Wasserschichten durch Beleuchtung unterdrückt wird und ihr Schwarmverhalten weniger stark ausgeprägt ist. Bei Fischen mit einer Länge über 30 cm nimmt das Schwarmverhalten hingegen unter Beleuchtung zu. Junge Lachse halten sich bei Beleuchtung in wärmeren und weniger salzhaltigen Wasserschichten auf, was wahrscheinlich durch das erhöhte Nahrungsangebot hervorgerufen wird. In diesen Schichten steigt jedoch die Gefahr des Parasitenbefalls, wie Untersuchung an in beleuchteten Netzkäfigen gehaltenen Zuchtlachsen zeigten (Oppedal et al. 2001). Für die Fischzucht wird trotzdem häufig starke Beleuchtung eingesetzt, weil sich dadurch das Wachstum vieler Fischarten steigert (Kissil et al. 2001; Rad et al. 2006). Allerdings kann Dauerbeleuchtung bei Jungfischen zu Missbildungen führen und die Entwicklung der Schwimmblase bei karpfenartigen Fischen verlangsamen (Brüning et al. 2011; Villamizar et al. 2009).

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

Wie schon für Vögel beschrieben, beeinflusst künstliche Beleuchtung auch bei Fischen den Hormonhaushalt und wirkt sich auf die Reproduktion aus. In der Fischzucht ist das oft gewollt, weil konstante Beleuchtung die Entwicklung der Geschlechtsreife verzögert, was oft mit besserem Wachstum einhergeht (Ben Ammar et al. 2015). So ist z. B. für Seezungen Licht ein wichtigerer Faktor

für die Regulierung der Sexualreife als Temperatur (García-López et al. 2006). Es ist aber zu beobachten, dass permanente Beleuchtung den Reproduktionserfolg insgesamt mindert und sogar zur Sterilität männlicher Fische führen kann (Migaud et al. 2006; Riley et al. 2013 u. 2015).

Auch bei Fischen ist Melatonin der Botenstoff, der den Tag-Nacht-Rhythmus im Körper regelt. Schon geringe Beleuchtungsstärken reichen aus, um die Melatoninproduktion bei vielen Fischarten zu unterdrücken (Brüning et al. 2017). Dabei beeinflusst vor allem rotes oder grünes Licht den Melatoninspiegel von Flussbarschen und Karpfenfischen wie der Plötze (Brüning et al. 2016), hingegen reagieren Küstenfische wie Seezunge, Zebrabärbling oder Seebarsch stärker auf blaues Licht (Carazo et al. 2013). Wahrscheinliche Ursache für diese Unterschiede sind die durch Wasserinhaltsstoffe bestimmten Farben der Gewässer, in denen die Fische natürlicherweise vorkommen (Hölker et al. 2018).

Untersuchungen zum Stresshormon Kortisol zeigen, dass künstliches Nachtlicht aber nicht als Belastung empfunden wird, sodass es für die Fische keinen wahrnehmbaren Anlass gibt, beleuchtete Habitate zu meiden (Brüning et al. 2015; Newman et al. 2015). Nur sehr starke Lichtimpulse mit LED in einer Beleuchtungsintensität von über 160 lx rufen bei Lachsen Stressreaktionen mit erhöhtem Kortisolspiegel hervor (Migaud et al. 2007). Es liegen bislang jedoch noch keine Studien über die Stresssymptome lichtempfindlicher Fischarten vor (Schroer/Hölker 2018).

Zusammenfassend wird deutlich, dass nächtliche Beleuchtung die Räuber-Beute-Interaktionen in Gewässern verändern kann und tagesrhythmisches und saisonales Verhalten von Fischen beeinflusst. Auch nichtintendierte Lichtexpositionen in der Nacht verändern das Verhalten vieler Fischarten, allerdings sind die vorhandenen wissenschaftlichen Untersuchungen über die Auswirkungen von Brücken- und Uferbeleuchtung auf Fischpopulationen und auf das Wanderverhalten nicht ausreichend. Dies betrifft auch Fischarten, die für die Fischerei wichtig sind.

3.3.2.4 Amphibien

Amphibien sind größtenteils nachtaktiv und zeichnen sich durch sehr gutes skotopisches Sehen, also das Sehen in schwacher Beleuchtung bzw. Dämmerung, aus (Buchanan 1998). Diese an nächtliche Bedingungen angepasste visuelle Wahrnehmung kann durch künstliche Beleuchtung stark gestört werden. Schon leichte Steigerungen der Beleuchtungsintensität, die durch nahe gelegene künstliche Lichter oder sogar durch natürliche Himmelslichter verursacht werden, können das Jagdverhalten oder die Räuberabwehrreaktion von Fröschen und Kröten verändern (Baker/Richardson 2006).

Nur mit wenigen Ausnahmen werden Amphibienarten vor allem in jungen Stadien von künstlichem Licht in der Nacht angezogen (Buchanan 2006). Das

Verhalten einiger Kröten während der Wanderzeit weist allerdings darauf hin, dass die Tiere nicht unbedingt direkt von Licht angezogen werden, sondern in jüngeren Stadien dem Nahrungsangebot folgen, in späteren Lebensphasen, z. B. während der Wanderung zum Paarungsort, hingegen dunkle Orte bevorzugen und z. B. Straßen ganz überwiegend an unbeleuchteten Stellen queren (van Grunsven et al. 2017). Bei Salamandern führt Beleuchtung zu Verhaltensänderungen in der Habitatwahl. Sie bevorzugen im Hellen öfter Nadelbaumstreu als Laubabfall. Feuka et al. (2017) vermuteten, dass diese Verhaltensänderungen die Gefahr bergen, dass die Amphibien Substrate wählen, die sie normalerweise nicht bevorzugen würden, und sich möglicherweise in trockeneren Lebensräumen niederlassen, als sie es in natürlich dunklen Arealen tun würden.

Die Hell- oder Dunkeladaption bei Änderung der Beleuchtungssituation kann bei Amphibien bis zu 1 Stunde betragen. Straßen- und auch Fahrzeugbeleuchtungen stellen daher ein hohes Risiko dar, wenn die Tiere beim Übergang aus dunklen Bereichen geblendet werden. Die Tiere bleiben auf der Straße sitzen und laufen dadurch Gefahr, von Fahrzeugen überrollt zu werden (Coelho et al. 2012). Kurzzeitige Blendung durch Licht führt auch dazu, dass viele Krötenarten schlechtere Fangerfolge erzielen (Buchanan 2006).

Allerdings können manche Amphibienarten von künstlicher Beleuchtung profitieren. So zeigen in Zentralamerika beheimatete Laubfrösche stärkeres Rufverhalten an beleuchteten Orten, wahrscheinlich deshalb, weil sie ihre Räuber, z. B. Fledermäuse, hier besser erkennen können (Tuttle/Ryan 1982). Beispielsweise nimmt die Zahl der Riesenkröten, eine invasive Art[19] in Australien, vor allem dort zu, wo Beute zahlreich vorkommt, z. B. in der Nähe beleuchteter Häuser (Gonzalez-Bernal et al. 2016). Diese Ausbreitung kann sich möglicherweise negativ auf heimische Insekten (gesteigerter Fraßdruck) und andere Amphibien (gesteigerter Konkurrenzdruck) auswirken.

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass künstliche Beleuchtung mit überwiegend negativen Konsequenzen für Amphibien einhergeht. Beleuchtung kann Amphibien immobilisieren und geeignete Habitate für die oft bedrohten und hauptsächlich nachtaktiven Tiere beschränken.

3.3.2.5 Säugetiere

Viele Säugetiere sind nachtaktiv. Künstliches Licht während der Dämmerung und der Nacht kann das Verhalten verändern sowie den Lebensraum beeinträchtigen (Schroer/Hölker 2018). So zeigen kleinere Säugetiere unter Beleuchtung erhöhtes Fluchtverhalten während der Nahrungssuche (Bengsen et al. 2010; Farnworth et al. 2016). Auch meiden bestimmte Säugetierarten beleuch-

19 Als biologische Invasion bezeichnet man allgemein die durch den Menschen verursachte Ausbreitung einer bislang nicht in einem Gebiet vorkommenden, also gebietsfremden Art, deren Einbringung oder Ausbreitung die Biodiversität und die damit verbundenen Ökosystemleistungen gefährden oder nachteilig beeinflussen.

tete Orte, so hält sich z. B. auch die bei uns heimische Waldmaus bevorzugt in Dunkelheit auf. Wenn beleuchtet wird, toleriert sie eher langwelliges rotes vor kurzwelligerem grünem Licht (Spoelstra et al. 2015). Es wird vermutet, dass die Meidung beleuchteter Habitate durch heimische Arten zu ungenutzten temporären Nischen führt und dies Eintrittspforten für invasive Arten, z. B. lichtunsensible Nagetiere eröffnet (Rotics et al. 2011).

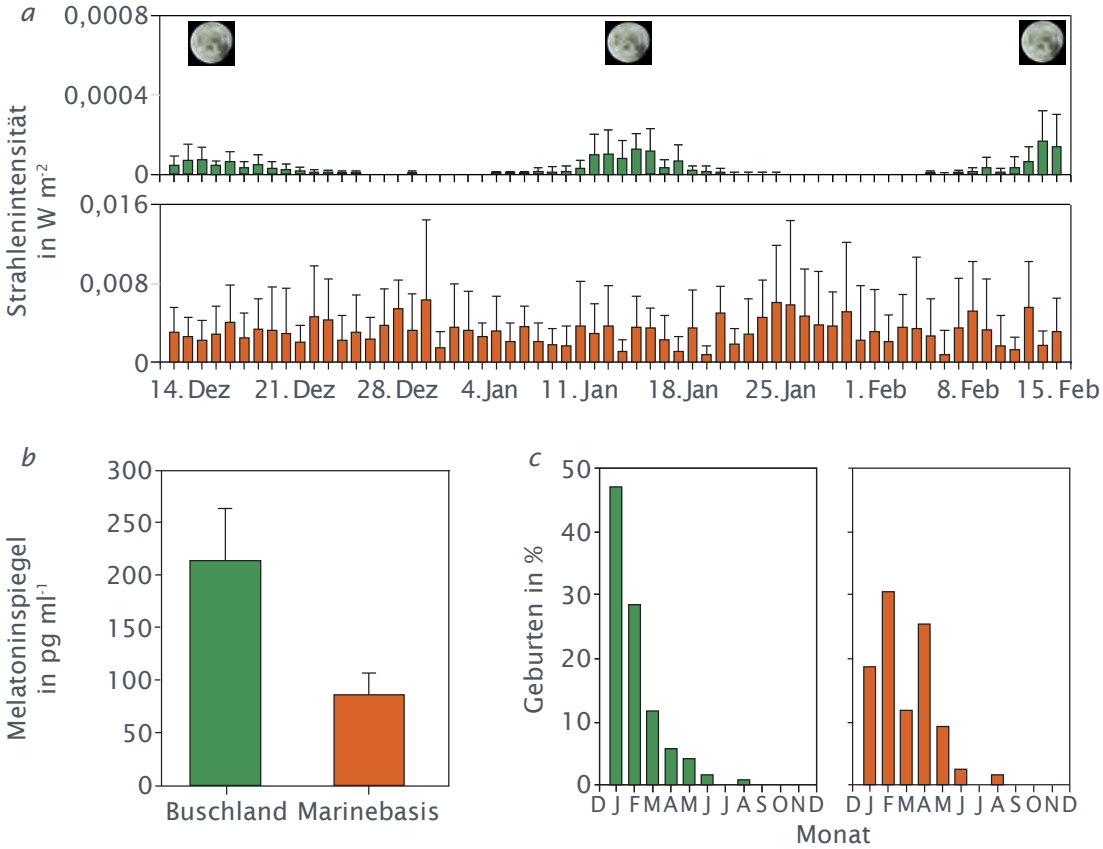
In Laborstudien konnten weitere Effekte künstlicher Beleuchtung festgestellt werden. So verändert sich bei kleinen Säugetieren durch konstante Beleuchtung in geringer Stärke während der Nacht der Rhythmus ihrer verschiedenen Tagesaktivitäten, d. h., für nachtaktive Säugetiere nimmt die Aktivität in der Dunkelphase ab und in der Lichtphase zu (Le Tallec et al. 2013). Für die Abnahme der Aktivitätsunterschiede reicht bei Mäusen schon 1 lx Beleuchtungsstärke während der Nacht aus (Shuboni/Yan 2010). Bei Ratten verringert sich der Rhythmus der schnellen Augenbewegungen in der Aktivitäts- sowie der Ruhephase, wie auch der Rhythmus der Temperaturmaxima (Ikeda et al. 2000). Es werden schwächere Insulinrhythmen und höhere arterielle Glukose- und Milchsäurespiegel festgestellt (Blask et al. 2014; Dauchy et al. 2015). Durch den fehlenden natürlichen Hell-Dunkel-Wechsel wird die zirkadiane Rhythmik der tageszeitlich geregelten Stoffwechselaktivitäten gestört. So nehmen Ratten allein durch die lichtinduzierte Änderung der Nahrungsaufnahmezeiten an Gewicht zu, ohne dass ihre Tagesration an Futter erhöht wird. Besonders stark ist dieser Effekt bei fettreicher Nahrung zu beobachten (Fonken et al. 2013). Die Tiere zeigen zudem depressionsähnliches Verhalten, indem sie geringere Präferenz für Zucker oder verhaltene Aktivität gegenüber Gefahr zeigen (Hogan et al. 2015; Okuliarova et al. 2016). An Zwerghamstern wurden diese Verhaltensänderungen mit einer geringeren Anzahl ausgebildeter Dornenfortsätze im Hypothalamus in Zusammenhang gebracht (Bedrosian et al. 2011). Besonders weißes und blaues Licht rufen diese Veränderungen der Nervenstrukturen und möglicherweise damit in Verbindung stehende Verhaltensweisen hervor (Bedrosian et al. 2013).

Weiterhin nehmen sowohl die Immunabwehr durch konstante Beleuchtung in der Nacht ab als auch die Regeneration nach Einwirkungen von Umweltstressoren (Aubrecht et al. 2014). Tumorwachstum kann ebenfalls durch konstante Beleuchtung in der Nacht begünstigt werden (Bukalev et al. 2013; Dauchy et al. 2014) und gleichzeitig werden schlechtere Wirkungen von tumorhemmenden Pharmaka attestiert (Blask et al. 2014).

Obwohl alle diese Laborstudien originär darauf ausgelegt sind, Auswirkungen von Schichtarbeit auf den zirkadianen Stoffwechsel des Menschen zu demonstrieren, weisen die Ergebnisse auch auf mögliche Veränderungen der zirkadianen Rhythmen von Wildtieren durch Lichtverschmutzung im Außenraum hin. Es bleibt allerdings zu untersuchen, ob die Zunahme von künstlichem Licht im Außenraum den zirkadianen Rhythmus und in der Folge auch saisonales Verhalten von Wildtieren beeinträchtigen könnte.

In Freilanduntersuchungen wurden zwar noch keine Veränderungen der Immunantwort gemessen, dafür aber gravierende Veränderungen saisonaler Rhythmen beobachtet (Aubrecht et al. 2014; Ikeno et al. 2014). Besonders die Reproduktion verliert unter ständiger Beleuchtung ihre saisonale Taktung. Bei einer Känguruart in Australien, dem Tammar-Wallaby, wurde eine zeitliche Verschiebung des Reproduktionszyklus zwischen Tieren, die in unbeleuchtetem Buschland, und solchen, die auf einem Marinestützpunkt frei leben, festgestellt (Abb. 3.5) (Robert et al. 2015).

Abb. 3.5 Nachtlichtintensitäten und Wirkungen auf Melatoninspiegel und Geburtenverteilung von Tammar-Wallabies



a mittlere Himmelshelligkeit von Sonnenuntergang bis zum Sonnenaufgang im Buschland (grüne Balken) und auf der Marinebasis (orange Balken)
b Melatoninspiegel der untersuchten Tiere im Buschland (grüner Balken) und auf der Marinebasis (oranger Balken)
c Verteilung der Geburten im Busch (n = 119, grüne Balken) und auf der Marinebasis (n = 118, orangene Balken)

Quelle: nach Robert et al. 2015, S. 4

Anhand von Lichtsensoren wurde eine deutlich höhere Lichtexposition der Tiere auf dem Marinestützpunkt gemessen. Die Tiere im Buschland erfuhren dagegen eine zyklische Veränderung der Lichtniveaus in der Nacht durch Mondlicht. Während im Buschland über 70 % der Geburten im Dezember und Januar stattfanden, verzögerten sich die Geburten auf dem Marinestützpunkt bis spät in den April. Diese Studie zeigt deutlich, wie Wildtiere in beleuchteten Gebieten ihre saisonale Taktung verlieren. Auch bei Grauen Mausmakis, einer Lemurenart, beeinträchtigt Licht während der Nacht die Reproduktion, indem sich die Bewegungsaktivität während des Östrus (paarungs- bzw. empfängnisbereite Zeit) verringert, der Östrus früher und/oder verkürzt eintritt (Le Tallec et al. 2015).

Ziegen paaren sich natürlicherweise im Herbst; für sie verlängert nächtliche Beleuchtung die typische Helligkeitsdauer eines Herbsttages und vermindert daher die jahreszeitlich vorgesehene fotoperiodische Antwort, d.h., die Fortpflanzungsorgane bleiben kleiner (Yasuo et al. 2006). Auch bei Zwerghamstern bewirkt Beleuchtung während der winterlichen kurzen Tage eine Rückbildung der Gonaden, gesteigertes Wachstum und Haarwechsel zum Sommertyp (Aubrecht et al. 2014). Alle diese Studien liefern Hinweise, dass bei Wildtieren das Abgleichen von Körperfunktionen und Verhalten mit der Jahreszeit und dadurch die Reproduktion durch künstliches Licht in der Nacht beeinträchtigt werden können.

Verantwortlich sind dabei ähnliche hormonelle Veränderungen, wie schon bei Vögeln und Fischen beschrieben. Licht in der Nacht unterdrückt oder verändert die zeitliche Ausschüttung von Melatonin (Blask et al. 2014; Dauchy et al. 2014), Sexualhormonen (Aubrecht et al. 2014) und des stoffwechselrelevanten Kortikosterons (Dauchy et al. 2015). Untersuchungen an Nagetieren im Labor zeigten weiterhin, dass sich die Expression von Genen verändert, die für die saisonale Physiologie und zirkadiane Stoffwechselaktivitäten eine Rolle spielen (Fonken/Nelson 2014; Ikeno et al. 2014).

Weißes bzw. blaues Licht wird als stärkerer Auslöser für ein erhöhtes Wachstum von immunrelevanten Zellen und auch für depressionsähnliche Verhaltensänderungen bei Laborratten diskutiert als rotes Licht (Bedrosian et al. 2013). Diese Ergebnisse korrelieren mit der Annahme, dass das zirkadiane System höherer Wirbeltiere anhand von Melanopsinfotorezeptoren am empfindlichsten auf blaues Licht im Spektralbereich um 480 nm reagiert (Kap. 3.2.2). Allerdings zeigen Dauchy et al. (2015), dass Melatonin und der zirkadiane Stoffwechsel bei Laborraten auch mit rotem Licht (Spektralbereich um 630 nm) in geringer Beleuchtungsstärke, wie beispielsweise durch Notlichtlampen in Krankenhäusern, unterdrückt werden kann. Die Autoren erläuterten, dass die Anzahl der Photonen einen höheren Einfluss auf Stoffwechselbeeinträchtigung hat, als die Wellenlänge. Das lässt darauf schließen, dass bei diesen empfindlichen nachtaktiven Tieren bislang noch unerforschte Fo-

torezeptoren an zirkadianen Stoffwechselantworten involviert sein könnten (Schroer/Hölker 2018).

Zusammenfassend kann künstliches Licht in der Nacht als Störfaktor für zirkadiane und saisonale Aktivitätsmuster von Säugetieren eingeschätzt werden. Auch nichtintendierte Lichtexpositionen tragen zu Verhaltensänderungen bei, die bis hin zu depressionsartigem Verhalten führen können. Es fehlen jedoch Studien darüber, ob aus diesen Verhaltensänderungen Verschiebungen in Artengemeinschaften und Ökosystemen zu erwarten sind und wie diese die Ausbreitung invasiver Arten beeinflussen könnte.

3.3.2.6 Fledermäuse

Fledermäuse sind vollständig dämmerungs- oder nachtaktiv und damit besonders von künstlicher Beleuchtung in der Nacht betroffen. Die hierunter beobachtbaren Verhaltensänderungen sind stark von der jeweiligen Art abhängig. Lichttolerante Arten sind an Jagdzeiten im Zwielicht angepasst und schnelle Flieger; sie fangen ihre Beute meist aus der Luft. Lichtintolerante Arten sind hingegen meist später in der Nacht aktiv und auf nichtfliegende Beute spezialisiert (Lacoeuilhe et al. 2014). Die meisten untersuchten Arten sind aktiver an unbeleuchteten als an beleuchteten Orten (Schroer/Hölker 2018). Es gibt aber Ausnahmen, z. B. der Kleine Abendsegler in Europa (Mathews et al. 2015) oder die in Afrika beheimatete Kap-Kleinohrfledermaus (Minnaar et al. 2015). An Sportstadien sind Arten ansässig, die von der Beleuchtung in ihrem Jagdverhalten profitieren können (Schoeman 2016). Doch selbst für lichttolerante Arten kann der Jagderfolg durch Desorientierung beeinträchtigt werden (Mathews et al. 2015). Die Vorteile für das Jagdverhalten einiger Arten können zudem zu einer Verdrängung von lichtsensibleren Arten und damit zu artenärmeren Fledermausgemeinschaften führen (Polak et al. 2011; Schoeman 2016). So erklärt sich auch, dass an beleuchteten Kirchen in Schweden ein Verschwinden von über 20 % der Fledermauskolonien gemessen wurde, an unbeleuchteten Kirchen hingegen blieben alle beobachteten Kolonien über 25 Jahre lang erhalten (Rydell et al. 2017). Weiterhin kann sich dieser Jagdvorteil durch Beleuchtung auf das Verhältnis der Insektengemeinschaften auswirken, die ohnehin durch die Beleuchtung verändert wird (Kap. 3.3.2.1). So konsumiert z. B. die Kap-Kleinohrfledermaus in beleuchteten Gebieten bis zu sechsmal mehr Nachtfalter als in natürlich dunklen Gebieten, in welchen sie sich hauptsächlich von Käfern ernährt (Minnaar et al. 2015).

Die Beleuchtungsstärke korreliert mit der negativen Beeinflussung der Ausflugzeiten aus dem Quartier. Das wurde an Hufeisennasen- und zwei Mausohrenfledermausarten nachgewiesen (Boldogh et al. 2007). Die Beleuchtungsstärke korreliert weiterhin mit der Anzahl der aus dem Quartier ausfliegenden Tiere, z. B. bei der Mückenfledermaus (Downs et al. 2003). Selbst bei der licht-

toleranten Zwergfledermaus ist zu beobachten, dass die Beleuchtungsstärke und die Breite der beleuchteten Infrastruktur ausschlaggebend dafür sind, ob die Fledermaus die beleuchtete Fläche durchfliegt oder sich lieber in unbeleuchtetes Gebiet zurückzieht (Hale et al. 2015). Auch wenn Teichfledermäuse in beleuchteten Gebieten mehr Nahrung finden können, ist die Nahrungsaufnahme erheblich reduziert (Kuijper et al. 2008). Noch stärker als die Nahrungsaufnahme wird bei manchen Arten das Trinkverhalten durch Beleuchtung beeinträchtigt (Russo et al. 2017). Das bedeutet, dass Fledermäuse empfindlicher bei der Wasseraufnahme reagieren als im Jagdverhalten. Zukünftige Forschung und auch Maßnahmen zum Schutz von Fledermäusen sollten verstärkt den Zugang zu Wasser berücksichtigen, z. B. keine Beleuchtungen von Brücken oder Ufern.

Über die Auswirkungen von Beleuchtung auf zirkadiane Stoffwechselaktivitäten ist bei Fledermäusen noch wenig bekannt (Schroer/Hölker 2018). Das liegt u. a. daran, dass invasive Studien relativ aufwendig in der Genehmigung sind, weil die meisten Fledermausarten unter Schutz stehen. Eine Studie zeigt aber, dass die Entwicklung von Jungtieren in beleuchteten Kolonien in den ersten Wochen verzögert ist (Boldogh et al. 2007).

Studien über die Auswirkungen durch spektrale Unterschiede oder verschiedene Leuchtentypen auf Fledermausverhalten ergaben sehr widersprüchliche Ergebnisse. Die Aktivität der Zwergfledermausarten wird durch Licht unterschiedlicher Spektren positiv beeinflusst, höchstwahrscheinlich wegen des erhöhten Nahrungsangebots durch die Ansammlung von Insekten (Spoelstra et al. 2017). Die Aktivität des Großen Abendseglers wird vor allem durch weißes Licht beeinträchtigt, dagegen beeinflusst oranges Licht die Aktivität der Breitflügelfledermaus stärker als weißes (Lacoeuilhe et al. 2014). Mausohren- und Langohrfledermäuse vermeiden weißes und grünes Licht, verhalten sich hingegen unter Beleuchtung mit rotem Licht ähnlich wie in natürlicher Dunkelheit (Spoelstra et al. 2017). An wandernden Fledermausarten wurde festgestellt, dass sie ausgerechnet auf das für Zugvögel empfohlene grüne Lichtspektrum (Poot et al. 2008) besonders empfindlich reagieren und ihre Routen in Küstengebieten dadurch besonders beeinträchtigt werden können (Voigt et al. 2017).

Vergleicht man verschiedene Beleuchtungstechnologien, so zeigt sich, dass die Aktivität von lichttoleranten Fledermausarten wie der Zwergfledermaus an Metallhalogenleuchten höher ist als Natriumdampfniederdrucklampen, wahrscheinlich weil das kurzwelligere Spektrum der Halogenleuchten mehr Insekten anzieht (Stone et al. 2015). Hingegen ergab ein Vorher-nachher-Vergleich bei einer Umstellung von Natriumdampfniederdruck- auf LED-Beleuchtung keine Aktivitätssteigerung dieser lichttoleranten Arten (Rowse et al. 2016). Die Umrüstung von Quecksilberdampfhochdruck- auf LED-Beleuchtung kann sich positiv auswirken, denn während für lichttolerante Zwergfledermäuse die durch Quecksilberdampfhochdruckbeleuchtung gesteigerte Aktivität um 45 % reduziert werden kann, steigern lichtintolerante Mausohrenfledermäuse ihre Akti-

vität an LED-Leuchten um das 4,5-Fache (Lewanzik/Voigt 2017). Die Autoren sehen daher die Möglichkeit, das Verhältnis der Auswirkungen künstlicher Beleuchtung auf lichtintolerante und lichttolerante Arten durch den Einsatz von LED zu verbessern. Die erhöhte Aktivität lichttoleranter Arten ist kein für die Population lebenswichtiger Vorteil, denn die Attraktion durch Leuchten ist eher ein Zeichen veränderter Räuber-Beute-Interaktionen. Die geringere Beeinträchtigung der lichtintoleranten Arten zeigt jedoch, dass diese das mit LED-Beleuchtung erhellte Habitat besser nutzen.

Die zeitliche Abschaltung von Licht provoziert artabhängig unterschiedliche Effekte. An fünf von acht getesteten Fledermausarten erzielte eine zeitliche Abschaltung der Beleuchtung keine signifikanten Aktivitätsunterschiede verglichen mit durchgängiger Beleuchtung (Azam et al. 2015). Nur für spät ausfliegende Arten, wie Maus- und Langohrenfledermäuse, wirkte sich die zeitliche Abschaltung positiv aus. Aber die Ergebnisse sind selbst für diese lichtintoleranten Arten nicht eindeutig.

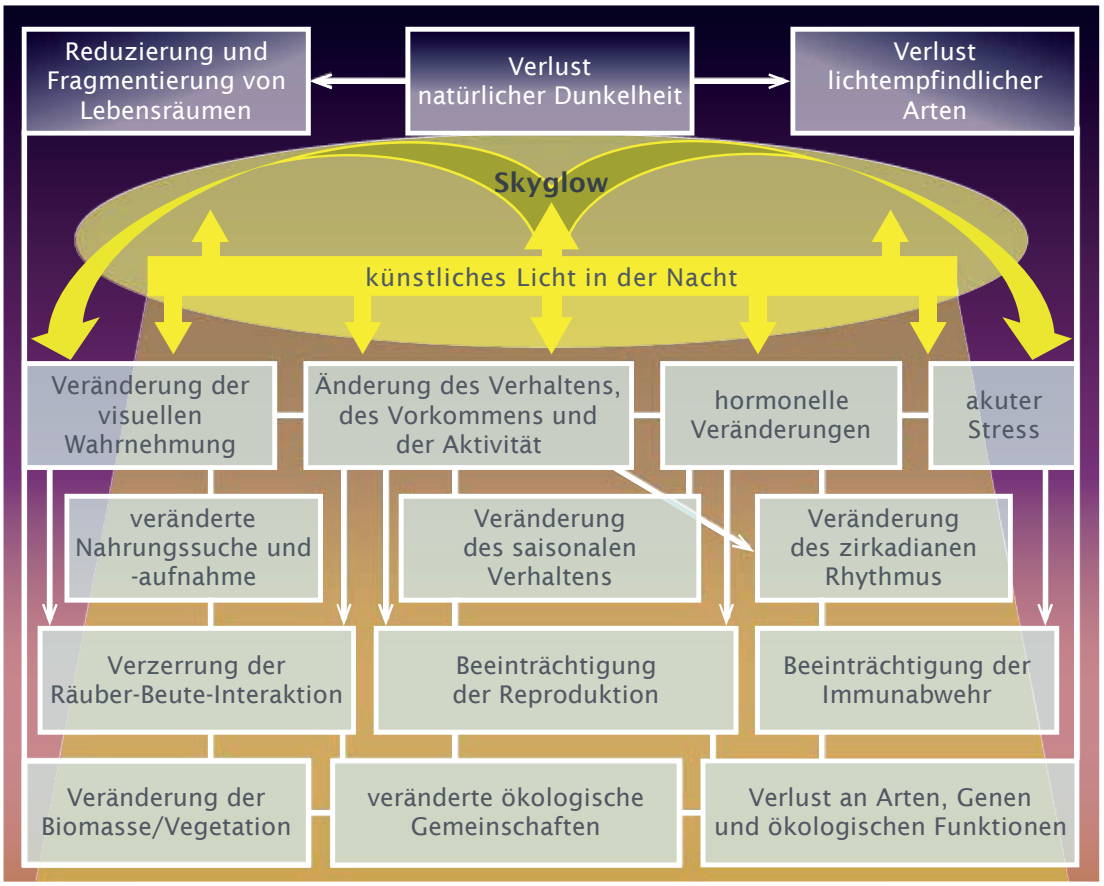
Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Fledermäuse als ausschließlich nacht- und dämmerungsaktive Tierarten in besonderer Weise von der Ausbreitung künstlicher Beleuchtung bei Nacht betroffen sind. Während einige wenige Arten lichttolerant sind und von Beleuchtung insbesondere in ihrem Nahrungssuchverhalten profitieren können, sind zahlreiche andere Arten lichtsensibel und daher teils erheblich negativ betroffen. Die bisher vorliegenden wissenschaftlichen Untersuchungen zur Wirkung verschiedener Beleuchtungsspektren oder Beleuchtungstechnologien sind entweder uneindeutig oder zeigen deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Fledermausarten. Unter Experten herrscht Konsens, dass ein Schutz der in vielen Fällen stark gefährdeten Fledermausarten komplett beleuchtungsfreie Unterschlüpfe und Korridore für Wanderung und Nahrungsaufnahme erfordert.

3.3.3 Wirkungen von Lichtverschmutzung im ökosystemaren Zusammenhang

Die Wirkungen von künstlicher Beleuchtung auf Pflanzen und verschiedene Tierarten machen deutlich, wie vielfältig, unterschiedlich und komplex die Auswirkungen auf unterschiedliche Organismen sind. Viele der Nachweise entstanden in Laborversuchen und sind daher nicht ohne Weiteres für das Freiland zu verallgemeinern. Jede einzelne Studie ist jedoch ein Hinweis darauf, dass Funktionen in Ökosystemen durch Licht in der Nacht verändert werden. Diese Veränderungen können kaskadenartig Veränderungen in Ökosystemen hervorrufen und die Biodiversität beeinträchtigen, mit heute noch nicht abschätzbaren Folgen für lebenswichtige Ökosystemfunktionen. In Abbildung 3.6 ist die Komplexität der Auswirkungen durch den Faktor künstliches Licht in der Nacht schematisch abgebildet: Künstliches Licht in der Nacht führt einerseits zu den

in den hellen Kästchen dargestellten Auswirkungen auf einzelne Lebewesen (helle Kästchen von der Mitte nach unten hin) und andererseits insgesamt zur Reduzierung und Fragmentierung von Lebensräumen durch den Verlust natürlicher Dunkelheit und letztlich dem Verlust lichtempfindlicher Arten (dunkle Kästchen in Pfeilrichtung oben).

Abb. 3.6 Die Komplexität der Auswirkungen künstlicher Beleuchtung bei Nacht auf Pflanzen und Tiere



Quelle: Schroer/Hölker 2018, S. 38

Im Folgenden werden die wichtigsten Wirkungen auf Pflanzen- und Tierarten übergreifend zusammengefasst und dargestellt, welche wissenschaftlichen Erkenntnisse sich hinsichtlich der Folgen für Lebensgemeinschaften, Ökosysteme oder Landschaften ergeben können.

3.3.3.1 Verhaltensänderungen: Aktivität und Artenvielfalt

Während viele Fluginsekten einem sogenannten Staubsaugereffekt durch künstliches Licht in der Nacht unterliegen, vermeiden andere Organismen beleuchtete Gebiete. Die Verhaltensänderungen können sich auf weitere Ebenen im Nahrungsnetz auswirken. So profitieren manche Jäger von der Akkumulation der Nahrung an Leuchtquellen und können eventuell auf Nahrung zugreifen, die für sie sonst nur schwer erreichbar wäre (Manfrin et al. 2017; Minnaar et al. 2015). Von vielen Räubern (Singvögel, Watvögel, Frösche, Fische etc.) ist bekannt, dass sie in beleuchteten Gebieten durch gesteigerte visuelle Wahrnehmung besser ihre Beute finden. Für andere Prädatoren, wie etwa im Fall lichtintoleranter Fledermausarten, verschlechtert sich durch die Verhaltensänderungen ihrer Beute der Zugang zu ihrer natürlichen Nahrung. Wie hoch dadurch die Beeinträchtigung auf Populationsebene ist, kann heute noch nicht beziffert werden. Es ist wahrscheinlich, dass durch die dokumentierten Änderungen ökosystemrelevante Ökosystemfunktionen verlorengehen und die Verhaltensänderungen dadurch maßgeblich zum Rückgang der Biodiversität beitragen können (Fontaine et al. 2006; Knop et al. 2017; Lewanzik/Voigt 2014).

Lineare Beleuchtungsstrukturen (wie Straßenbeleuchtung) können zudem einen Barriereeffekt erzeugen (Abb. 3.4 in Kap. 3.3.2.1). Individuen können dann nicht mehr von einem Lebensraum zum anderen migrieren, mit entsprechenden Auswirkungen z. B. auf den Reproduktionserfolg (Kap. 3.3.3.3). In diesem Zusammenhang wird auch die Rolle von Fahrzeugbeleuchtung diskutiert. Es wird vermutet, dass die ökologischen Auswirkungen der Lichtemissionen durch Fahrzeugscheinwerfer hoch sein könnten, da sie Straßenränder mit hohen Intensitäten und weit über den Aktivierungsschwellen für viele biologische Prozesse beleuchten (Kap. 3.3.4), zudem weitgehend horizontal projiziert werden und somit lange Strecken erhellen und am Straßenrand als eine Reihe von Lichtimpulsen (erzeugt durch die Durchfahrt von Fahrzeugen) erlebt werden können; eine Dynamik, von der bekannt ist, dass sie große biologische Auswirkungen hat (Gaston/Holt 2018).

Es gibt allerdings keine quantitativen Schätzungen, welche Quelle der Lichtverschmutzung wie bedeutsam ist oder wie viele Arten alleine durch die Auswirkungen von künstlichem Licht in der Nacht heute schon verschwunden sind. Es existieren lediglich Einzelnachweise zu ausgesuchten Arten. So zeigen Choi et al. (2009), dass sich eine lichtscheue asiatische Riesenwanze aus einem Gebiet im Umkreis von 1 km um eine Beleuchtungsquelle zurückzieht. Es liegen jedoch noch nicht ausreichend Studien darüber vor, welche Arten in welchem Radius rund um beleuchtete Gebiete beeinträchtigt werden, ab welcher Helligkeit ihr Vorkommen gefährdet ist und in welchen Flächen lichtscheue Arten Schutz vor künstlicher Beleuchtung benötigen.

Wenn einzelne Arten ihren Lebensraum durch Beleuchtung nicht nutzen, können Eintrittspforten für invasive Arten entstehen, die aufgrund ihrer Herkunft oder genetischen Prädisposition besser an den Faktor Beleuchtung angepasst sind. Dies zeigten australische Studien anhand der Zunahme invasiver Amphibien (Gonzalez-Bernal et al. 2016) und Reptilien (Newbery/Jones 2007) rund um beleuchtete Grundstücke. Problematisch wird dies dann, wenn die invasiven Arten eine zu große Konkurrenz für heimische Arten werden und/oder sie Nahrung erbeuten, die von den heimischen Prädatoren nicht konsumiert werden. Denn dieser Beute (Pflanzen wie Tiere) fehlen häufig effektive Abwehrmechanismen gegen den neuen Jäger.

Welchen Anteil künstliches Licht in der Nacht an dem Schwund an Insektenbiomasse hat, ist ebenfalls bisher noch nicht ausreichend erforscht. Eine Straßenleuchte alleine kann bis zu tausend Insekten in einer Nacht anziehen (Eisenbeis 2006; Eisenbeis/Eick 2011). Auch bei Fledermäusen zeigen Modellrechnungen, dass die Auswirkungen auf die Artenvielfalt durch Licht in der Nacht, diejenigen, die durch Flächenversiegelung entsteht, überlagert und mit intensiver Landwirtschaft zu vergleichen ist (Azam et al. 2016).

3.3.3.2 Zirkadianer Rhythmus

Mit der Abnahme der Lichtunterschiede zwischen Tag und Nacht nimmt auch die Stärke des Impulses der tagesrhythmischen Stoffwechselprodukte ab. Das wurde bei Fischen und Vögeln nachgewiesen (Kap. 3.3.2). Bei Säugetieren wurde weiterhin der Nachweis geführt, dass sich durch stetige Beleuchtung während der Nacht die Aktivitätsmuster verschiedener Zeitgebergene, welche die innere Uhr beeinflussen, verändern können (Blask et al. 2014). Ob und wie weit durch diese Desynchronisation bestandsgefährdende Veränderungen im Verhalten der Tiere hervorgerufen werden, ist nicht bekannt.

Auch die saisonale Taktung kann unschärfer werden, da die tatsächliche Tageslänge als Zeitgeber zum Teil nicht mehr korrekt wahrgenommen werden kann. Häufig ist neben der Tageslänge auch die Umgebungstemperatur ein saisonaler Zeitgeber, so für Pflanzen (Cathey/Campbell 1975) oder Fische (Porter et al. 1999). Werden bestimmte Schwellenwerte durch einen Anstieg der Temperatur im Zuge des Klimawandels nicht mehr erreicht, könnte der Zeitgeber für saisonales Verhalten sogar komplett entfallen. Über ein solches Szenario gibt es heute noch keine wissenschaftlichen Modellrechnungen oder Voraussagen, wie sich Arten, Populationen und Ökosysteme bei fehlenden Signalen für saisonale Veränderungen verändern werden.

3.3.3.3 Reproduktion

Vor allem aus der Fischzucht ist bekannt, dass durch Licht Reproduktionsprozesse gesteuert werden können. Verspätete oder ausgesetzte Reproduktionsphasen begünstigen bei vielen Fischarten eine längere Wachstumsphase und bessere Nahrungsumsetzungsraten, deshalb werden Jungfische häufig unter Dauerbeleuchtung gehalten (Ben Ammar et al. 2015). Es ist zudem bekannt, dass Beleuchtung zu einer Verzögerung des Eischlupfs führt (Brüning et al. 2011). Im Freiland könnte dies die sensible Phase des Wachstums beeinträchtigen, bevor die Tiere ihre Wanderung antreten, und sich auf die Fitness der Tiere auswirken. Daten über die tatsächlichen Auswirkungen auf Größe und Fitness der Tiere zur Wanderung gibt es aber bislang noch nicht.

Es sind weiterhin nichtintendierte Auswirkungen durch künstliches Licht auf die Reproduktion vieler anderer Taxa bekannt, so z. B. bei Nachtfaltern, Fröschen, Vögeln und Säugetieren (Kap. 3.3.2). Auch bei Pflanzen werden verlagerte Reproduktionszeiten beobachtet. Welche Konsequenzen dieses veränderte Verhalten auf Ökosysteme hat, ist heute noch nicht ausreichend erforscht. Allerdings schwächen sich im Zuge der zunehmenden Erhellung der Nachtlandschaften und der Klimaerwärmung die wichtigsten saisonalen Signale für die Reproduktion ab, sodass befürchtet werden muss, dass gleichzeitig viele Populationen durch verändertes saisonales Verhalten beeinträchtigt sind (Schroer/Hölker 2018).

3.3.3.4 Hormonelle Veränderungen

Es gibt viele gesicherte Nachweise dafür, dass Beleuchtung während der Nacht die Hormonausschüttung bei verschiedenen Tierarten beeinträchtigt. Vor allem wird die Ausschüttung des Hormons Melatonin unterdrückt, das in den meisten Organismen – inklusive Pflanzen (Arnao/Hernández-Ruiz 2006) – während der Nacht gebildet wird (Kap. 3.3.2). Das Hormon ist verantwortlich für die Steuerung des zirkadianen Systems sowie ein Radikalfänger und Antioxidationsmittel (Tan et al. 2007). Die Unterdrückung des Melatonins wirkt sich auf die Immunabwehr und Regenerationsmöglichkeiten von Tieren aus.

Weiterhin gibt es gesicherte Nachweise, dass wichtige Hormone für die Fortpflanzung durch künstliches Licht in der Nacht beeinträchtigt werden. Diese Beeinträchtigungen führen zu den zuvor beschriebenen Veränderungen des Reproduktionszeitpunkts oder zu verminderter Reproduktionsaktivität; nachgewiesen u. a. bei Vögeln (Ouyang et al. 2015; Russ et al. 2015) oder Fischen (Rodríguez et al. 2005).

Welche Auswirkungen durch die veränderte Ausschüttung an Hormonen auf Populationen zu erwarten sind und wie sich die Verzerrungen des saisonalen Verhaltens auswirken könnten, ist allerdings noch unzureichend erforscht.

3.3.3.5 Immunabwehr

Eine Aufgabe des Hormons Melatonins ist die Einleitung nächtlicher Regenerationsprozesse. An Labormäusen- und Ratten konnte gezeigt werden, dass Licht während der Nacht die Anfälligkeit gegenüber Infektionskrankheiten, chronischen Erkrankungen des Atemapparates, grauer Star, Lungenentzündung, Ohren- sowie Nasenentzündungen und Erkrankungen des Reproduktionssystems oder auch die Empfindlichkeit gegenüber Tumoren erhöht (Bukalev et al. 2013; Molcan et al. 2014). Auch Heilungsprozesse werden bei Säugetieren durch Unterdrückung des Melatonins gehemmt (Dauchy et al. 2014).

Bei Vögeln wurden in vielen Studien fitnessrelevante Beeinträchtigungen durch die Unterdrückung des Melatonins vermutet. Ouyang et al. (2017) führten den ersten Nachweis, dass Kohlmeisen, die in mit weißem Licht beleuchteten Gebieten nisteten, weniger schliefen als Artgenossen, die in unbeleuchteten Gebieten oder in Lichtspektren mit längeren Wellenlängen nisteten (rot oder grün). Diese Vögel zeigten neben dem Schlafentzug eine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit, an einer Malariainfektion zu erkranken. Die Rastlosigkeit, die auch bei brütenden Vögeln festgestellt wurde, könnte die Fitness der Nachkommen beeinträchtigen (Titulaer et al. 2012). Über die tatsächlichen Auswirkungen auf die Fitness der Vögel und ihre Nachkommen liegen aber noch nicht genügend Studien vor. Die Immunabwehr von Vögeln könnte sich beispielsweise an reduzierte Schlafzeiten anpassen oder das erhöhte Nahrungsangebot in beleuchteten Gebieten Fitnessbeeinträchtigungen ausgleichen (Welbers et al. 2017). Dringend werden daher weitere Freilandstudien benötigt, um die Beeinträchtigung von Vogelpopulationen und anderen Tierarten durch Abnahme der Hell-Dunkel-Unterschiede zwischen Tag und Nacht zu erforschen. Dabei wurde sich bei den vorhandenen Studien über Auswirkungen von künstlichem Licht vor allem auf nichtgefährdete Arten konzentriert. Das Wissen über die Auswirkungen auf hochempfindliche Arten ist hingegen sehr gering.

3.3.4 Schwellenwerte zur Vermeidung negativer ökologischer Wirkungen von Lichtverschmutzung

In Tabelle 3.3 sind die Ausführungen aus den Kapiteln 3.3.2 und 3.3.3 komprimiert und die Schwellenwerte aufgelistet, bei denen in einzelnen Studien Verhaltensänderungen der betroffenen Organismen nachgewiesen wurden. Es wurden dabei nur Studien gelistet, in denen ein Gradient an Helligkeiten getestet wurde. Auffällig ist die relative Bandbreite der ermittelten Schwellenwerte, ab denen Verhaltensänderungen nachgewiesen wurden. Dabei lagen die in Laborexperimenten ermittelten Werte regelmäßig unter denen in Freilandexperimenten gefundenen. So wurden z. B. hormonelle Veränderungen bei Amseln im Labor schon bei 0,3 lx gemessen (Dominoni et al. 20103a), bei Spatzen wurde im Freiland allerdings ein Schwellenwert hormoneller Veränderungen von 6 lx ermittelt (Zhang

et al. 2014). Diese Unterschiede können durch den Einfluss multipler Faktoren des Freilands und auch mit Vermeidungsstrategien der Organismen begründet sein, die die beleuchteten Flächen im Freilandversuch nicht mehr oder deutlich weniger häufig aufsuchten.

Tab. 3.3 Schwellenwerte zum erstmaligen Nachweis einer Wirkung von künstlicher Beleuchtung auf Organismen bei Nacht

Effekte	gefundene Schwellenwerte (Intensität)	Tiergruppen
Aktivität und Vorkommen	~ 0,02 lx (Ryer/Olla 1998) ~ 0,03 lx (Keenan et al. 2007) 0,3 lx (Vera et al. 2005)	Fische
	0,05 bis 1,5 lx (de Jong et al. 2016a) 0,3 lx (Dominoni et al. 2013c)	Vögel
	Wegbreite 20 bis 40 m = 20 lx Wegbreite 60 bis 80 m = 10 lx (Hale et al. 2015)	Fledermäuse
akuter Stress	~ 162 lx (Migaud et al. 2007)	Fische
Nahrungssuche und -aufnahme	0,7 lx (Santos et al. 2010)	Vögel
zirkadiane Rhythmen	0,5 lx (Dauchy et al. 2010)	Säugetiere
	> 0,3 lx (Dominoni et al. 2013c)	Vögel
	5 lx roter Spektrabereich, 1 lx infraroter Spektralbereich (Carazo et al. 2013)	Fische
Reproduktion	~ 1 lx (Brüning et al. 2016)	Fische
	0,3 lx (Dominoni et al. 2013c)	Vögel
hormonelle Veränderungen	2,3 lx (Deveson et al. 1990) 0,5 lx (Dauchy et al. 2010)	Säugetiere
	0,3 lx (Vera et al. 2005) 1 lx (Brüning et al. 2016 u. 2017) 1 lx (Porter et al. 2001) 5 lx roter Spektralbereich (Carazo et al. 2013) 16 bis 41 lx (Bayarri et al. 2002) 36 lx (Oliveira et al. 2007)	Fische
	0,3 lx (Dominoni et al. 2013a u. 2013c) 6 lx (Zhang et al. 2014)	Vögel
Wachstum und Entwicklung	0,3 lx (Dominoni et al. 2013c)	Vögel
Immunabwehr	keine	keine

Quelle: nach Schroer/Hölker 2018, S. 46

Insgesamt zeigt die Tabelle 3.3, dass für viele Organismen die Intensität einer Vollmondnacht von etwa 0,3 lx einen Schwellenwert für verändertes Verhalten und Hormonausschüttungen darstellt bzw. dass sogar bei noch geringeren Beleuchtungsstärken Reaktionen der Organismen nachgewiesen werden konnten. Es liegen allerdings noch keine Studien zur Bedeutung der natürlichen Rhythmik des Mondlichts für die betreffenden Tierarten vor.

Sicher ist, dass Dauerbeleuchtung zu einer Verminderung der Hell-dunkel-Unterschiede zwischen Tag und Nacht und zu einer Abnahme des zirkadianen Zeitgebers und saisonaler Signale führen kann. Es ist anzunehmen, dass die Zeitpunkte von Paarung und Reproduktion verändert werden. Die Abstimmung von Nahrungsangebot und -nachfrage könnte dadurch beeinträchtigt werden. Frühe oder späte Witterungseinbrüche könnten die Reproduktion, ungeschütztes Gewebe von Pflanzen und empfindliche Populationen gefährden (Schroer/Hölker 2018).

Die spektralen Empfindlichkeiten unterscheiden sich stark zwischen Arten und können nicht von der Beleuchtungsstärke abgegrenzt werden. Bei hohen Beleuchtungsstärken und bei einzelnen Lichtquellen hat die spektrale Zusammensetzung weniger Einfluss als die Intensität des Lichts. Sehr schwaches Licht in einer spektralen Zusammensetzung, auf die ein Organismus empfindlich reagiert, kann vergleichsweise stark wirken, genauso wie sehr intensives Licht mit spektralen Zusammensetzungen außerhalb des Empfindlichkeitsbereichs des Organismus. Trotzdem lässt sich festhalten, dass, je kurzwelliger das Licht ist (hoher Anteil im blauen und ultravioletten Spektralbereich), desto stärker sind die Auswirkungen und desto größer ist die Anzahl der betroffenen Taxa.

3.3.5 Fazit aus ökologischer Sicht

Durch die in diesem Teilkapitel zusammengetragenen Nachweise wird deutlich, dass Beeinträchtigungen durch künstliches Licht für viele unterschiedlichen Taxa nachweisbar sind. Es wird aber auch ersichtlich, dass es derzeit nicht möglich ist, wissenschaftlich gesicherte Aussagen zur Auswirkung der voranschreitenden Ausbreitung künstlichen Lichts auf der Ebene von Populationen, Lebensgemeinschaften oder Ökosystemen zu treffen oder gar konkrete Dosis-Wirkungs-Beziehungen im Sinne einzuhaltender Grenzwerte zu definieren. Forschungen darüber sind äußerst zeit- und kostenaufwendig und es besteht immer die Gefahr, dass Auswirkungen auf einzelne Taxa übersehen oder die komplexen Wirkungspfade im Ökosystem unverstanden sind und nur unzureichend berücksichtigt werden (können).

Allerdings verdeutlicht die Anzahl der vorliegenden Nachweise, dass die gegenwärtig zu beobachtende Ausbreitung künstlicher Beleuchtung möglichst reduziert werden sollte und eine Minimierung der Lichtverschmutzung beim Neubau von Beleuchtungsanlagen und bei der derzeit stattfindenden Umrüs-

tung bestehender Anlagen noch stärker beachtet werden sollte (Kap. 4). Da der Nachweis populationsgefährdender Auswirkungen durch nichtintendierte Lichteinwirkung sehr schwer oder gar nicht zu erbringen ist, sollten dabei jedoch nicht die Auswirkungen auf Flora und Fauna als Bemessungsgrundlage dienen. Eine sinnvollere Basis stellen die Quantität und die Qualität der verursachten Lichtemissionen dar. Hierbei können die in der wissenschaftlichen Literatur gefundenen Nachweise zu den ökologischen Wirkungen von Licht in der Nacht als Anhaltspunkte für die technische Optimierung einzelner Beleuchtungsanlagen im Hinblick auf Lichtverschmutzung bzw. einer Regulierung von künstlicher Beleuchtung im Außenbereich insgesamt dienen.

Zusammengefasst: Die Auswirkungen durch künstliches Licht in der Nacht auf Flora und Fauna sind hochkomplex, artabhängig und insgesamt noch wenig verstanden. Die global beobachtbare Zunahme künstlicher Beleuchtung könnte weitreichende Änderungen in Ökosystemen hervorrufen, die derzeit noch nicht kalkulierbar sind. Weiterhin können die zirkadianen und saisonalen Verhaltensänderungen durch eine gesteigerte Umgebungstemperatur im Zuge der Klimaerwärmung noch verstärkt werden. Forschung ist daher dringend erforderlich, um Veränderungen in Ökosystemen verstehen zu können, wenn die wichtigsten Zeitgeber für saisonale Rhythmen abgeschwächt werden.

4 Optionen zur Vermeidung von Lichtverschmutzung

In diesem Kapitel werden mögliche Optionen zur Verringerung und Vermeidung von Lichtverschmutzung durch künstliche Beleuchtung im Außenbereich behandelt. Da zahlreiche Akteure an Planung, Errichtung und Betrieb der Anlagen beteiligt sind, ergeben sich auf vielen unterschiedlichen Ebenen Ansatzpunkte. Für die Darstellung sollen hier zwei zentrale Zugänge unterschieden werden. Erstens wird skizziert, welche Regelungen für die Gestaltung und Nutzung von künstlicher Außenbeleuchtung bestehen (Kap. 4.1). Diese können sowohl formalrechtliche als auch informale Ausprägung besitzen, z. B. Industrienormen oder Beleuchtungsempfehlungen von Verbänden und Gremien. Die Darstellung erfolgt für Deutschland und die EU sowie für ausgewählte europäische Nachbarländer, die nationale, teils gesetzliche Grundlagen für eine Reduzierung von Lichtverschmutzung erlassen haben. Zweitens werden technologische Optimierungsmaßnahmen angesprochen, die für eine Reduzierung ungewollter Lichtverschmutzung beim Betrieb von Beleuchtungsanlagen zur Verfügung stehen (Kap. 4.2). Dabei wird deutlich, dass mit den verfügbaren Regulierungsansätzen und Beleuchtungstechnologien es bereits heute möglich ist, Lichtverschmutzung erheblich zu reduzieren.

4.1 Regulierung von Außenbeleuchtung

Wie mit der Lichtverschmutzung regulatorisch umgegangen wird, hängt stark von den beteiligten Akteuren aus Politik und Verwaltung ab, die Aspekte von künstlicher Beleuchtung wie Sicherheit, Kosten- und Energieeffizienz, Ästhetik und Design sowie gesundheitliche und ökologische Gesichtspunkte unterschiedlich berücksichtigen. Aufgrund bestehender Unsicherheiten und eines oftmals fehlenden Problembewusstseins für Lichtverschmutzung wird häufiger mehr Licht eingesetzt, als für den Beleuchtungszweck notwendig wäre (Krause et al. 2014b). Dieses Missverhältnis beruht auch auf dem Mythos, dass mehr Licht auch mehr Sicherheit bedeutet (Schulte-Römer et al. 2018).

Unter den bestehenden Regulierungen in Deutschland und in der EU, in denen sich auf die Lichtverschmutzung bezogen wird, finden sich sowohl bindende Instrumente, wie Gesetze und Verordnungen (Kap. 4.1.1 bis 4.1.3), als auch orientierungsgebende Instrumente wie Lichtkonzepte oder Richtlinien zum Schutz der Nacht in Schutzgebieten (Kap. 4.1.4). Unter die orientierungsgebenden Instrumente fällt auch die Förderpolitik, die Anreize schafft und Standards definiert, die für eine Förderung zu erfüllen sind. Zudem besitzen Industrienormen hohe Bedeutung, insbesondere bei der Gestaltung der Straßenbeleuchtung.

4.1.1 Rechtliche Regelungen in Deutschland

In Deutschland stehen auf Bundesebene nur grobe bindende Instrumente zur Verfügung, um künstliche Beleuchtung zu steuern (Walkling/Stockmar 2013). Bislang gibt es zum Thema künstliche Beleuchtung und Optionen zur Vermeidung von Lichtverschmutzung nur ausgewählte Rechtsgutachten (z. B. WD 2019).[20] In diesem Kapitel werden daher die aus der Literatur bekannten rechtlichen Regelungen erläutert.

In Bezug auf die öffentliche Straßenbeleuchtung ist zu beachten, dass keine allgemeine Beleuchtungspflicht existiert, sondern nur eine Verkehrssicherungspflicht. Eine innerörtliche Beleuchtungspflicht für Kommunen besteht im Rahmen ihrer finanziellen Möglichkeiten nach Landesgesetz in Bayern, Baden-Württemberg, Berlin und Sachsen (Riedel et al. 2013; Ringwald/Engel 2013). Daraus ergeben sich Handlungsspielräume für viele Kommunen, zum einen grundsätzlich zum Einsatz von Straßenbeleuchtung und zum anderen auch hinsichtlich Maßnahmen wie Teil- oder Ganzabschaltungen. Zur Erfüllung der Verkehrssicherheitspflicht richten sich viele Kommunen nach der DIN EN 13201-5:2016-06 (Kap. 4.1.2.2). Diese ist zwar rechtlich nicht bindend, hat aber durch fehlende anderweitige Orientierungsrahmen mit offiziellem Charakter aktuell einen quasirechtlichen Status. Die Beleuchtung von Kraftfahrzeugen (mobiles Verkehrslicht) ist in § 17 Straßenverkehrsordnung (StVO) sowie in §§ 52 und 67 Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) geregelt und erlaubt z. B. auch Fernlicht an Fahrrädern.

4.1.1.1 Bundes-Immissionsschutzgesetz

Im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImschG) zählt künstliches Licht nach § 3 Abs. 2 und 3 »zu den schädlichen Umwelteinwirkungen«, »die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder für die Nachbarschaft herbeizuführen«. In den Anwendungsbereich des Immissionsschutzrechts auf Bundesebene fallen nur gewerbliche Anlagen. Das heißt, öffentliche sowie Vereinsbeleuchtung, z. B. von Sportstätten, sind nicht erfasst. Für diese Anlagen gilt, sofern vorhanden, das Immissionsschutzrecht der einzelnen Bundesländer, andernfalls deren Polizeirecht (Maaß 2003).

In Bezug auf die Lichtverschmutzung sind besonders die nichtgenehmigungspflichtigen Anlagen nach BImschG von Bedeutung, da Beleuchtung oft

20 Weiterer Aufschluss lässt das gegenwärtig an der Universität Münster in Bearbeitung befindliche FuE-Vorhaben »Licht und Glas: Rechtsfragen der Gefährdung von Arten durch Licht und Glas« erwarten. Ziel des Gutachtens ist die Identifikation von rechtlichen Anforderungen und Regelungsmöglichkeiten zur Vermeidung und Minimierung von Gefahren durch Licht und Glas für wildlebende Tierarten. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts war das Gutachten noch in Bearbeitung.

nicht als Teil der eigentlichen Betriebs- oder Gewerbeanlage gilt und damit keiner Genehmigungspflicht unterliegt. Für die nichtgenehmigungspflichtigen Anlagen gilt ein Vermeidungs- und Minderungsgebot nach Stand der Technik einzuhalten, wodurch Anordnungen zu Lampen, Leuchten und Betriebszeiten gemacht werden könnten (Hofmeister 2013).

Ab wann eine Lichteinwirkung als erhebliche Belästigung im Sinne des BImSchG einzuschätzen ist, lässt sich aufgrund der vielen subjektiven Parameter bei der Wahrnehmung von Licht als angenehm oder störend, jedoch oft nicht eindeutig feststellen. Grundlagen für einheitliche Messungen und Beurteilungen von immissionsschutzrechtlichen Erheblichkeitsgrenzen fehlen im Gesetz. Eine Technische Anleitung für Licht, in der immissionsbezogene Grenzwerte formuliert werden, wie dies beispielsweise für Lärmimmissionen der Fall ist, existiert bislang nicht (Krause et al. 2014b).

Aus diesem Mangel und zur Regelung des Einflusses privater Lichtquellen hat der Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI 2012) als Empfehlung die Richtlinie zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen (Licht-Richtlinie) in Form von Hinweisen zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen eingehend überarbeitet. Diese wurde als Arbeitsmittel für die Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen für den Vollzug des BImSchG erstellt und konkretisiert die zentralen Begriffe schädliche Umwelteinwirkungen und erhebliche Belästigung. In der Licht-Richtlinie wird sich im Hauptteil ausschließlich auf das Schutzgut Mensch bezogen und es werden Immissionsrichtwerte für die Bereiche Raumaufhellung und Blendung festgelegt. Als schutzwürdige Räume werden Wohn- und Schlafräume sowie Unterrichts- und Büroräume definiert (Völker/Krenz 2013). In Anhang 1 werden Hinweise über die schädliche Einwirkung von Beleuchtungsanlagen auf Tiere – insbesondere auf Vögel und Insekten – und Vorschläge zu deren Minderung formuliert, jedoch keine Erheblichkeitsschwellen definiert. Die Licht-Richtlinie ist nicht rechtsverbindlich und wurde bisher nur in einzelnen Bundesländern, z. B. in Brandenburg und Nordrhein-Westfalen, als Verordnung umgesetzt (Meier/Pottharst 2013). Andere Bundesländer haben Informationskampagnen geschaltet, um auf die teils negativen Wirkungen künstlicher Beleuchtung bei Nacht aufmerksam zu machen (BR 2019).

Zusammenfassend muss konstatiert werden, dass der Lichtimmissionsschutz in der jetzigen gesetzlichen Fassung vielen subjektiven Variablen unterliegt und nur ungenügend Gesetzesvorlagen für die Reduzierung bzw. Vermeidung von Lichtverschmutzung und für einen verbesserten Artenschutz bietet (Schroer/Hölker 2018).

4.1.1.2 Naturschutzrechtliche Regelungen

Weitere gesetzliche Handlungsmöglichkeiten bietet in Deutschland die Naturschutzgesetzgebung, insbesondere das Bundesnaturschutzgesetz (BNatschG)[21] für den Schutz besonders sensibler Bereiche:

- Landschaftsplanung, die negative Veränderungen von Natur und Landschaft, z. B. die Ausweisung von Erfordernissen und Maßnahmen zum Schutz von besonders empfindlichen Lebensräumen und deren Lebensgemeinschaften, behandelt;
- Eingriffsregelung, die vorschreibt, vermeidbare Beeinträchtigungen des Naturhaushaltes und des Landschaftsbildes durch vorrangige Eingriffe zu unterlassen und die verbleibenden erheblichen und nachhaltigen Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft mittels Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen zu kompensieren;
- Schutzgebietsvorschriften für konkrete Vorkehrungen und Maßnahmen, die Lichtimmissionen vermindern oder sogar verhindern können. In Verbindung mit der Richtlinie 92/43/EWG sind negative Einwirkungen von außen, u. a. auch Lichteinwirkungen, zu unterbinden, wenn sie den Erhaltungszustand der Lebensräume und Arten im Schutzgebiet negativ beeinflussen.

Die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung bezieht nicht nur Aspekte der Beeinträchtigung der Funktionen des Naturhaushalts ein, sondern ebenso Veränderungen des Landschaftsbildes, für das tages- und jahreszeitlich wechselnde Lichtverhältnisse eine Rolle spielen. Aufgrund mangelnder naturwissenschaftlicher Untersuchungen und Ungewissheiten über Art und Umfang der Beeinträchtigungen kommen aber in der Regel weder Ausgleichs- noch Ersatzmaßnahmen zum Tragen (Böttcher 2001; Schroer/Hölker 2018).

Die Naturschutzgesetzgebung bietet gute Anknüpfungsmöglichkeiten für Regelungen zur Vermeidung und Reduzierung von negativen Effekten künstlicher Beleuchtung – auch unabhängig vom Beleuchtungszweck (öffentlich/privat). Allerdings fallen nur die besonders sensiblen Gebiete unter diesen Schutz und es fehlen gegenwärtige vollzugstaugliche Abschätzungen zu den durch künstliche Beleuchtung verursachten Beeinträchtigungen.

4.1.1.3 Baurechtliche Regelungen

Das Baugesetzbuch (BauGB) selbst enthält keine Regelungen, die sich direkt auf Beleuchtungsanlagen oder Lichtemissionen beziehen. Es schafft jedoch die Grundlage für landesrechtliche Regelungen im Rahmen des Bauordnungsrechts (Rehmann 2013). Das Bauordnungsrecht wird in Form der Landesbauordnun-

21 Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz – BNatSchG)

gen durch die Bundesländer gestaltet und regelt die Genehmigungspflicht von Lichtanlagen. Dort wird neben den materiellen baulichen Anforderungen im Rahmen des Verunstaltungsverbots geklärt, ob und inwiefern von Lichtanlagen eine Beeinträchtigung ausgeht (Böttcher 2001; Hofmeister 2013). Beispielsweise wird nach § 9 Bauordnung für Berlin (BauO Bln) formuliert:

»(1) Bauliche Anlagen müssen nach Form, Maßstab, Verhältnis der Baumassen und Bauteile zueinander, Werkstoff und Farbe so gestaltet sein, dass sie nicht verunstaltet wirken.
(2) Bauliche Anlagen dürfen das Straßen-, Orts- oder Landschaftsbild nicht verunstalten.«

Auf dieser Grundlage kann die zuständige Bauaufsichtsbehörde die Genehmigung für bauliche Anlagen verwehren oder die Beseitigung von Mängeln einfordern. Aufgrund des sehr allgemein gefassten Begriffs der Verunstaltung haben solche Entscheidungen vor Gericht allerdings nicht zwingend Bestand (Rehmann 2013). Im Fall von Berlin bietet auch § 10 BauO Bln im Prinzip eine Regelungsmöglichkeit für künstliche Beleuchtung. Auch hier gilt das Verunstaltungsgebot inklusive der Unzulässigkeit einer störenden Häufung von Werbeanlagen. Jedoch führt der breite Ausnahmenkatalog dazu, dass viele Formen der gewerblichen Beleuchtung überhaupt nicht genehmigungspflichtig sind (Rehmann 2013).

Im Rahmen der den Gemeinden obliegenden Bauleitplanung besteht die Möglichkeit, Lichtquellen indirekt über den Ausschluss von Nutzungen gemäß § 1 Abs. 5 Baunutzungsverordnung (BauNVO)[22] zu regulieren. Es handelt sich hierbei eher um einen »Nebeneffekt der Planung« (Rehmann 2013), jedoch können auf diesem Wege bestimmte Arten von, ggf. besonders lichtintensiven, Gewerbebetrieben ausgeschlossen werden. Direkt können Lichtanlagen gemäß § 15 BauNVO unter dem Rücksichtnahmegebot verhindert werden (Hofmeister 2013; Maaß 2003).

Einen weiteren Anknüpfungspunkt für die Steuerung von Lichtanlagen bietet die nach § 172 BauGB formulierte Erhaltungssatzung: Sie ermöglicht es den Gemeinden, u. a. nach § 172 Abs. 1 zur »Erhaltung der städtebaulichen Eigenart eines Gebiets aufgrund seiner städtebaulichen Gestalt«, eine besondere Genehmigungspflicht für bauliche Maßnahmen im Satzungsgebiet einzuführen (Rehmann 2013). Die Anwendung einer Erhaltungssatzung ist eine der Möglichkeiten, städtebaulichen Denkmalschutz zu betreiben.

Darüber hinaus haben die Gemeinden die Möglichkeit, auf Grundlage des Baugesetzbuches bzw. der Landesbauordnungen Satzungen zu erlassen, im Rahmen derer künstliche Beleuchtung reguliert werden kann. Zu nennen sind hier insbesondere Gestaltungssatzungen, die auf die Sicherung der gestalteri-

22 Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (Baunutzungsverordnung – BauNVO)

schen Qualität des Ortsbildes abzielen, und Werbesatzungen, die die Zulässigkeit von Werbeanlagen im öffentlichen Raum regeln. Solche Satzungen stellen eine Möglichkeit dar, für konzeptionelle Festlegungen beispielsweise aus Lichtkonzepten (Kap. 4.1.4) eine allgemeine Verbindlichkeit herzustellen, wie es z. B. in Düsseldorf zumindest für Teile des Lichtkonzepts umgesetzt wurde (Küster 2017).

In Bezug besonders auf Werbeanlagen ist festzuhalten, dass sich deren Genehmigung überwiegend auf die bauliche Ausführung und nicht auf den Betrieb der Werbeanlage konzentriert. Beispielsweise werden in Berlin Charakteristika wie Größe und Farben einer geplanten Werbeanlage geprüft, während die Frage, ob und in welchem Intervall eine Leuchtwerbung sich bewegt oder blinkt, keine explizite Rolle spielt (Dannemann 2009).

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass die Bauleitplanung in besonderer Weise Möglichkeiten bietet, Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft durch Lichtimmissionen ex ante zu vermeiden und/oder zu reduzieren (Hofmeister 2013). Bauordnungs- und Bauplanungsrecht bieten die Möglichkeit, Lichtverschmutzung zu verhindern, bevor sie entsteht, anstatt entstandene Folgen durch bauliche Eingriffe beheben zu müssen. Es bestehen mehrere baurechtliche Ansatzpunkte, gerade auch privat betriebene künstliche Außenbeleuchtung zu regeln. Es handelt sich dabei jedoch um eine »fragmentierte Landschaft von Möglichkeiten« (Kuechly et al. 2018), die durch die zuständigen kommunalen Entscheidungsträger zunächst erkannt, ergriffen und wirksam ausgestaltet werden und für deren Umsetzung auch die Akzeptanz auf lokaler Ebene vorhanden sein muss.

4.1.1.4 Regulierung von Beleuchtung nach der Arbeitsstättenverordnung

Die Beleuchtung für den Arbeitsschutz im Außenbereich ist seit 1975 durch die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV)[23] geregelt. Der ASR (2014) konkretisiert in den »Technischen Regeln für Arbeitsstätten« dabei die Anforderungen der ArbStättV im Hinblick auf Außenbeleuchtung. Dabei geht es vor allem um Mindestwerte für Beleuchtungsstärken und die Farbwiedergabe für verschiedene Arbeitsbereiche und Tätigkeiten. Ebenso werden Grenzwerte für die Blendwirkung gesetzt. Dabei liegen die Untergrenzen für die meisten Bereiche zwischen 10 und 20 lx, in besonders kritischen Fällen, die eine hohe Sehleistung erfordern, aber auch bei bis zu 200 lx. Flughäfen müssen z. B. auf dem Vorfeld mindestens 20 lx und im Umschlagsbereich auf dem Vorfeld 30 lx Beleuchtungsstärke aufweisen.

Grundsätzlich bieten sich auch über diese Regelungen Anknüpfungspunkte für eine Reduzierung bzw. Begrenzung künstlicher Beleuchtung. Jedoch werden

23 Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung – ArbStättV)

im Rahmen der ArbStättV Mindestbeleuchtungsstärken definiert, die die Arbeitssicherheit gewährleisten sollen. Diese Beleuchtung erfüllt damit gerade nicht die Eigenschaften von Lichtverschmutzung im Sinne von Licht am falschen Ort und zur falschen Zeit.

4.1.2 Weitere Instrumente zur Reduzierung von Lichtverschmutzung

Neben den einschlägigen rechtlichen Regelungen gibt es verschiedene Ansätze, z. B. auf kommunaler Ebene, sowie orientierungsgebende Empfehlungen verschiedener Organisationen mit Bezug auf eine Reduzierung der Lichtverschmutzung. Aufgrund der geringen Orientierungswirkung rechtlicher Regelungen besitzen diese unverbindlichen Ansätze durchaus Bedeutung für die Gestaltung der künstlichen Außenbeleuchtung in Deutschland.[24]

4.1.2.1 Lichtkonzepte, Lichtschutzgebiete und Sternenstädte

Viele Kommunen und Städte haben erkannt, dass es wichtig ist, Außenbeleuchtung dezidiert zu thematisieren, und nutzen dazu das Instrument der städtebaulich orientierten Lichtkonzepte (Köhler 2015). Vorreiterrollen nehmen hier die Städte Lyon 1989 und Zürich 2004 mit ihrem jeweiligen »Plan Lumière« ein (Schulte-Römer 2015). Lichtkonzepte (oder auch Lichtmasterpläne, Lichtleitpläne, Aktionspläne) geben eine Zielrichtung für die konzeptionelle Entwicklung der städtischen Beleuchtung vor und erfüllen eine übergreifende Koordinierungsaufgabe (Küster 2017). Lichtkonzepte sind informelle Planungsinstrumente, d. h., sie sind für die Allgemeinheit unverbindlich, können aber durch politischen Beschluss behördeninterne Verbindlichkeit erlangen. Darüber hinaus können sie zur Vorbereitung formeller (verbindlicher) Planungen dienen oder zu bindenden Verordnungen fortentwickelt werden (Krause 2015).

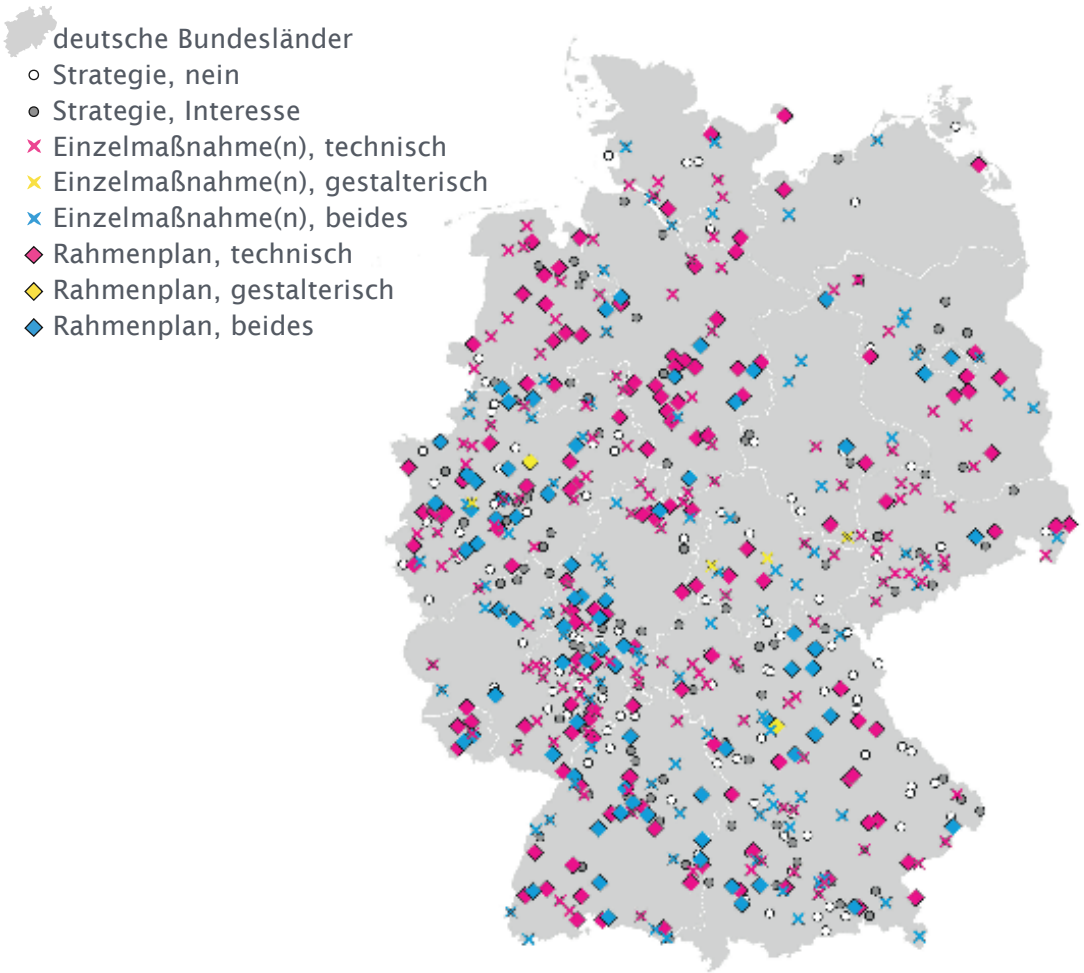
Von den bestehenden städtischen Lichtkonzepten im Jahr 2015 (Abb. 4.1) haben 500 Gemeinden eine Strategie für den Umgang mit künstlichem Licht entwickelt. Von den 14 Großstädten in Deutschland (über 500.000 Einwohner) hatten im Jahr 2017 nur Bremen, Essen und München keine Lichtkonzepte (Küster 2017).

Als flexibles, konzeptionelles Instrument besteht ein großes Spektrum an Lichtmasterplänen. Insbesondere unterscheiden sich diese in ihrer räumlichen Bezugsgröße (z. B. nur Innenstadt oder Gesamtstadt), in ihrer Fokussierung auf unterschiedliche Beleuchtungsarten (z. B. nur Straßenbeleuchtung oder auch

24 Etablierte Organisationen sind z. B. lichttechnische Gesellschaften wie die LiTG in Deutschland, die Illuminating Engineering Society IES oder die Institution of Lighting Professionals, die lichttechnische Empfehlungen veröffentlichen und dabei inzwischen auch Aspekte der Lichtverschmutzung berücksichtigen.

weitere Beleuchtungsformen), in der inhaltlichen Ausrichtung und Schwerpunktsetzung sowie in der Anzahl und Bandbreite an Akteuren, die an der Konzeptentwicklung beteiligt sind. Häufig behandelte Themen sind Energieeffizienz, finanzielle Einsparung, ökologische, demografische und kulturelle Aspekte, Architektur, Stadtdesign und Attraktivitätssteigerung des Standorts. In weniger als 10 % der Konzepte wird Lichtverschmutzung explizit berücksichtigt (Köhler 2015).

Abb. 4.1 Städte und Gemeinden in Deutschland mit Lichtkonzepten



Quelle: nach Köhler 2015

Gebiete mit verhältnismäßig geringer Lichtverschmutzung können als Nachtschutzgebiete bzw. Sternenparks ausgezeichnet werden. In der Regel handelt es sich dabei um bereits existierende Schutzgebiete, deren Schutzprogramme um das Element »natürliche Dunkelheit« bzw. »Nacht« erweitert werden (Meier 2015). Die Auszeichnungen werden von drei Nichtregierungsorganisationen

bzw. Stiftungen unabhängig voneinander verliehen: der International Dark-Sky Association (IDA), der Starlight Foundation und der Royal Astronomical Society of Canada (RASC). Bei den Auszeichnungen handelt es sich um Zertifizierungssysteme: Werden die Anforderungen hinsichtlich der Minimierung von Lichtverschmutzung erfüllt, können die Schutzgebiete das von der jeweiligen Organisation vergebene Label tragen und mit ihm werben. Die Zahl der Auszeichnungen hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen: 50 von insgesamt 55 Sternenparks wurden in den 10 Jahren zwischen 2004 und 2014 ausgewiesen (Meier 2015).

Ein zentrales Motiv für die Regionen ist es, durch die Auszeichnung den Bekanntheitsgrad der Region und die Besucherzahlen zu erhöhen. So werden etwa Sternführungen oder auch Teleskoptreffen angeboten. Erhebungen und Beobachtungen aus einigen der anerkannten Nachtschutzgebiete zeigen, dass die Präsenz in den Medien und die Besucherzahlen seit der Auszeichnung deutlich gesteigert werden konnten und sich getätigte Investitionen lohnen (Centre for Strategy & Evaluation Services 2013; EKOS 2011; Projektgruppe Dunkelheit als Chance 2014).

Die überwiegende Zahl der weltweiten Auszeichnungen für Sternenschutzgebiete wurde bislang von der IDA verliehen, die dabei drei Schutzniveaus unterscheidet (Kuechly et al. 2018):

- International Dark Sky Parks: öffentliche oder private Schutzgebiete mit minimaler, den Kriterien entsprechender Beleuchtung;
- International Dark Sky Reserves: Gebiete mit dunkler Kernzone, umgeben von einer Pufferzone, die besiedelte Gebiete enthalten kann, in denen die Beleuchtung so gehandhabt wird, dass die Kernzone dunkel bleibt;
- International Dark Sky Sanctuaries: besonders abgelegene Gebiete, die meist auch besonders dunkel sind, jedoch aufgrund ihrer schweren Erreichbarkeit nicht als Parks oder Reserves ausgezeichnet werden können.

Im dicht besiedelten Deutschland ist vor allem die Einrichtung von Dark Sky Reserves interessant: dunkle Gebiete, deren Zustand dadurch geschützt wird, dass sich umliegende Ortschaften zu einer nachhaltigen Beleuchtung bekennen. Bislang wurden von der IDA in Deutschland zwei International Dark Sky Reserves (Naturpark Westhavelland und Biosphärenreservat Rhön) anerkannt und ein Dark Sky Park (Nationalpark Eifel) vorläufig anerkannt. In beiden Reserves (Westhavelland und Rhön) hat sich eine Eigendynamik entwickelt: Um Teil des Sternenparks zu werden, haben – auch über die Grenzen der Schutzgebiete hinaus – weitere Kommunen die Beleuchtungsrichtlinien beschlossen (Kuechly et al. 2018).

Vergleichbar mit den Auszeichnungen für Schutzgebiete sind Zertifizierungen für Kommunen als Sternenstädte (Dark Sky Community). Hier sind nicht bestimmte Dunkelheitswerte ausschlaggebend, sondern vielmehr die Ausrich-

tung hin zu einer möglichst nachhaltigen Beleuchtung. Im Januar 2019 hat die International Dark-Sky-Association (IDA) die Bewerbung der Stadt Fulda um den Status Dark Sky Community positiv beschieden.[25] Im Vergleich zu den Nachtschutzgebieten ist das Konzept der Sternenstädte bislang kaum ausgearbeitet (Kuechly et al. 2018).

4.1.2.2 Industrienormen für Straßenbeleuchtung

Ein zentrales Anliegen der Lichtbranche ist die Normierung der Beleuchtungstechnologie, weil so Technikschnittstellen und -komponenten, sowie das Angebot an Beleuchtungstechnologie und die Nachfrage besser koordiniert werden können. Die Reduzierung bzw. Vermeidung von Lichtverschmutzung spielt dabei eine untergeordnete, aber zunehmende Rolle (Meier/Pottharst 2013).

Der Normenausschuss Lichttechnik (FNL) des Deutschen Instituts für Normung e. V. (DIN) bearbeitet – meist in Zusammenarbeit mit der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft (LiTG) – die Industrienormen (DIN- und EN-Normen) für Beleuchtung (Heuser et al. 2017). Die Normen, z. B. die DIN EN 13201 für Straßenbeleuchtung, haben als definierten Stand der Technik eine zentrale Orientierungsfunktion für die Planung der öffentlichen Straßenbeleuchtung (Kuechly et al. 2018). So stellt die DIN zwar keine Rechtsnorm dar und ist im Hinblick auf die begrenzten technischen und finanziellen Möglichkeiten einer Kommune auch in Rechtsstreitigkeiten nicht als zwingendes Maß für die Beleuchtungspflicht anwendbar (Riedel et al. 2013; Ringwald/Engel 2013). Jedoch besteht erfahrungsgemäß bei einem Rechtsstreit die große Wahrscheinlichkeit, dass sich das Gericht bei der Ermittlung des einschlägigen technischen Standards nach den DIN-Werten richten wird (Bodenhaupt 2019). Städtische und kommunale Entscheidungsträger, die an der Entstehung der Norm in Deutschland nicht beteiligt sind, betrachten die europäische Norm für Straßenbeleuchtung daher als verbindlich oder missverstehen sie als rechtlich bindend (Schulte-Römer 2015).

Die geforderten Lichtintensitäten werden in der DIN EN 13201-5:2016-06 in Energieeffizienzindikatoren ausgedrückt. Herangezogen werden dabei ein Indikator für die Leistungsdichte und ein Indikator für den jährlichen Stromverbrauch. Der Indikatorwert für die Leistungsdichte ergibt sich aus der Leistung der Beleuchtungsanlage, dem Wartungswert[26] und der Größe der beleuchteten Fläche. Zusätzlich werden verschiedene Straßenarten (unterschieden nach

25 https://www.sternenstadt-fulda.de/ (5.6.2020)

26 Der Wartungswert beschreibt den Mittelwert der Beleuchtungsstärke, der nicht unterschritten werden darf. Bei Projektierung einer Beleuchtungsanlage muss berücksichtigt werden, dass Leuchten, Lichtquellen und Räume im Laufe der Zeit altern und verschmutzen. In der Folge nimmt die Beleuchtungsstärke ab. Der Lichtplaner erfasst diese Abnahme mit dem Wartungsfaktor. Um den Verlust der Beleuchtungsstärke zu kompensieren, muss jede Neuanlage mit höheren Beleuchtungsstärken ausgerüstet sein (= Neuwert). Wartungswert = Wartungsfaktor x Neuwert.

zulässiger Geschwindigkeit, Verkehrsaufkommen, baulicher Ausgestaltung) unterschiedlichen Beleuchtungsklassen zugeordnet, für die verschiedene Mindestleistungsdichten gelten.

Grundlegende Kritikpunkte im Hinblick auf Lichtverschmutzung liegen darin, dass die Bewertungsgrundlagen für die Ableitung der geforderten minimalen Lichtintensitäten nicht benannt werden (Fotios/Goodman 2012). Nach DIN EN 13201-5:2016-06 wird zudem empfohlen, dass die festgelegten Lichtintensitäten erreicht werden sollten, »Überbeleuchtung aber auf das technisch mögliche Minimum reduziert« und aus »energieeffizienztechnischer und umweltbezogener Perspektive […] Korrekturmaßnahmen zur Verminderung jeglicher Überbeleuchtung ergriffen werden« sollten. Überbeleuchtung liegt dann vor, wenn die Mindestleistungsdichte für die nächsthöheren Beleuchtungsklasse überschritten wird (bzw. gilt für die höchste Klasse, dass das Beleuchtungsniveaus nicht um 50 % überschritten werden sollte). Trotz der theoretisch begrenzend wirkenden Empfehlung zur Vermeidung von Überbeleuchtung würde die konsequente Anwendung der Norm aber zu einer flächendeckenden Anhebung des Beleuchtungsniveaus führen und das energetische Einsparpotenzial bei der Sanierung der Straßenbeleuchtung drastisch schmälern (NABU 2011).

In der Praxis werden die minimal empfohlenen Beleuchtungswerte auf den meisten Verkehrswegen in Deutschland mit der derzeit installierten Beleuchtungstechnik nicht erreicht (Kuechly et al. 2018). Mit der neu verfügbaren effizienteren LED-Beleuchtung wäre dies aber möglich und würde somit zu einer weiteren Zunahme der Lichtverschmutzung beitragen (Kap. 2.4.1.).

Zusätzlich werden in den Industrienormen Lichtstärkeklassen definiert, um die Blendwirkung der Beleuchtungsanlage zu beurteilen. Durch die fortschreitenden technologischen Entwicklungen sind heute Leuchtdichten der Leuchtmittel möglich, die blendend oder sogar schädigend für die Augen sind. Dadurch sind so hohe Beleuchtungsstärken erreicht, dass die Einführung von Maximalwerten als sinnvoll erscheint, um künstliche Beleuchtung auf das für ihre Funktionen nötige Maß zu reduzieren (Kuechly et al. 2018). Die Lichtstärkeklassen bestimmen damit ganz wesentlich die visuelle Qualität der Beleuchtung. Die Beurteilung wird auch herangezogen, wenn Lichtimmissionen in Richtungen, in denen Licht weder erforderlich noch erwünscht ist, z. B. auch oberhalb der Horizontalen in die Atmosphäre unterbunden werden sollen. Die Lichtstärkeklassen G1 bis G3 entsprechen teilabgeschirmten bis abgeschirmten Leuchten. Die Klassen G4 bis G6 entsprechen stärker abgeschirmten Leuchten. Die Norm legt keine Mindestanforderung in Bezug auf die Einhaltung einer bestimmten Lichtstärkeklasse fest, allerdings schreiben z. B. die Vorgaben für eine Einstufung als Lichtschutzgebiet die Verwendung stark abgeschirmter Lampen der Klasse G6 vor (Kap. 4.1.2.1).

Zusammengefasst gilt, dass die zwar formaljuristisch unverbindlichen, faktisch aber höchst einflussreichen Industrienormen für Beleuchtung hervorragende Anknüpfungspunkte bieten, um auf eine Reduzierung der Lichtverschmutzung hinzuwirken. So haben z. B. Regionen in Italien die in der europäischen Norm geltenden Minimal- in Maximalwerte gewandelt, d. h., eine Beleuchtungsanlage darf die geforderten Leuchtdichten nicht überschreiten (Kap. 4.1.4.2). Auch bei der Einordnung von Straßen in verschiedene Beleuchtungsklassen oder der Begrenzung von Abstrahlwinkeln der Beleuchtungsanlagen, wie z. B. in Slowenien (Kap. 4.1.4.5), bieten sich Möglichkeiten, die Industrienormen im Hinblick auf eine Reduzierung der Lichtverschmutzung weiterzuentwickeln (Kap. 5.2).

4.1.2.3 Förderpolitik

Auch durch Förderprogramme können Entwicklungen im Bereich der künstlichen Beleuchtung erheblich beeinflusst werden. In Deutschland werden auf verschiedenen Wegen Modernisierung und Umrüstungen öffentlicher Beleuchtungsanlagen gefördert. Der Fokus liegt dabei aber vornehmlich auf der Steigerung der Energieeffizienz und dem Klimaschutz.

So werden auf Bundesebene z. B. Projekte zur Modernisierung der öffentlichen Straßenbeleuchtung mit LED-Leuchten u. a. durch die Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI)[27] und durch Förderung von Demonstrationsvorhaben innerhalb des Umweltinnovationsprogramms[28] unterstützt. Durch den inzwischen abgeschlossenen Bundeswettbewerb »Energieeffiziente Stadtbeleuchtung« wurden in Zusammenarbeit mit der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) und dem Umweltbundesamt (UBA) Pilot- und Demonstrationsprojekte zur kommunalen Energieeinsparung bei der öffentlichen Beleuchtung gefördert. Aktuell wird Unterstützung für Projekte im Bereich Außenbe-

27 Innerhalb der Klimaschutzinitiative ist vor allem die Kommunalrichtlinie relevant. In ihrer ab 1. Januar 2019 geltenden neuen Fassung bietet sie Kommunen und Akteuren aus dem kommunalen Umfeld zahlreiche neue Fördermöglichkeiten zur Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen. Dazu zählen u. a. kommunales Energie- und Umweltmanagement sowie Beleuchtungstechnik (https://www.klimaschutz.de/kommunalrichtlinie).

28 Das Umweltinnovationsprogramm ist ein Förderprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und unterstützt seit 1979 Unternehmen und auch kommunale Gebietskörperschaften und Zweckverbände dabei, innovative, die Umwelt entlastende technische Verfahren in die Praxisanwendung zu bringen. Aus dem Zukunftsinvestitionsprogramm der Bundesregierung stehen für die Umsetzung des Aktionsprogramms Klimaschutz 2020 auch Fördergelder für Klimaschutzprojekte im Umweltinnovationsprogramm zur Verfügung (https://www.umweltinnovationsprogramm.de/; 5.6.2020).

leuchtung durch die KfW in Form des »IKK – Investitionskredit Kommunen«[29] angeboten.

Seit Anfang 2012 betreibt das Bundesumweltministerium (2017) die »LED-Leitmarktinitiative«, um Klimaschutz, finanzielle Einsparmöglichkeiten und bessere Lichtqualität gemeinsam mit den Kommunen voranzubringen. Dabei wird auch der Wettbewerb »Kommunen im neuen Licht« durchgeführt. Förderungen sind hier auch für Projekte zur Minimierung der Lichtverschmutzung möglich, z. B. durch technische Optimierung bei der Lichtlenkung (Kap. 4.2). Weitere, zumeist abgeschlossene Förderprogramme und Forschungsprojekte, in denen sich indirekt auch mit künstlicher Beleuchtung befasst wurde, sind in Meier und Pottharst (2013) näher beschrieben.

Bei allen genannten Förderprogrammen stellen Energieeinsparung und die Minderung von Klimagasemissionen zentrale Ziele dar. Die Reduzierung bzw. Vermeidung von Lichtverschmutzung spielt oft nur eine untergeordnete Rolle (Kuechly et al. 2018). Ausnahme ist die Kommunalrichtlinie im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (siehe auch Fußnote 27). Ab 2019 werden hier nur Beleuchtungsanlagen mit Regelungs- und Steuerungstechnik gefördert, die entweder eine zeit- oder präsenzabhängige Beleuchtung ermöglichen oder über eine Technik zur adaptiven Nutzung der Beleuchtung, d. h. zur Anpassung an unterschiedliche Verkehrsdichten und Witterungsbedingungen, verfügen. Dadurch können Beleuchtungsdauer und -niveau an das tatsächliche Verkehrsaufkommen vor Ort angepasst und die Lichtimmissionen reduziert werden (Bundesregierung 2018).

Hier bestehen große Potenziale, den Aspekt der Lichtverschmutzung künftig stärker einzubinden und zur Nebenauflage für die ohnehin stattfindende und auf vielfältigen Wegen unterstützte Modernisierung der öffentlichen Beleuchtung aufzuwerten.

4.1.3 Regelungen auf EU-Ebene

Die Europäische Union hat keine dezidierten Lichtverschmutzungsregelungen,[30] jedoch wirken sich insbesondere Regelungen zum Handel mit Beleuchtungsprodukten auf die Entwicklung der Außenbeleuchtung aus. Die EU-Aktivitäten im Beleuchtungsbereich werden durch die 20-20-20-Ziele von 2008 bestimmt: Diese sehen die Etablierung einer integrierten Klima- und Energie-

29 Mit dem IKK – Investitionskredit Kommunen fördert die KfW kommunale Investitionen in die kommunale und soziale Infrastruktur, z. B. Anpassung der technischen Infrastruktur oder Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur (https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunen/Infrastruktur/F%C3%B6rderprodukte/Investitionskredit-Kommunen-(208)/; 5.6.2020).

30 Eine Auseinandersetzung mit der Frage, ob die EU die Kompetenz hat, Regelungen gegen Lichtverschmutzung zu erlassen, und auf welche Weise dies erfolgen könnte, findet sich in Volgger (2015).

politik vor, die dem Klimawandel entgegenwirkt und die Energiesicherheit sowie die Wettbewerbsfähigkeit der EU erhöht. Ein zentrales Instrument war die Richtlinie 2005/32/EG[31] (Richtlinie 2009/125/EG Neufassung), die Bestandteil sowohl der Wettbewerbs- und Handelspolitik als auch der Umwelt- und Energiepolitik der EU war. Die Richtlinie setzte den rechtlichen Rahmen für den Ausschluss von energieverbrauchsrelevanten Produkten vom Handel in der EU und wurde 2011 durch das Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG)[32] in deutsches Recht umgesetzt (Morgan-Taylor 2015).

Mit der Verordnung (EG) Nr. 245/2009[33] (Europäische Kommission 2009) zur Umsetzung der Richtlinie 2005/32/EG werden die Ökodesignanforderungen an Lampen, Leuchten und Vorschaltgeräte definiert, die auch in der Außenbeleuchtung zum Einsatz kommen. Die darin enthaltenen verbindlichen Vorgaben beziehen sich aktuell allerdings nur auf die Energieeffizienz und den Quecksilbergehalt der Produkte, haben also für Lichtverschmutzung keine unmittelbare Bedeutung. Allerdings steht es nach Auffassung von Volgger (2015) »den Mitgliedsstaaten derzeit frei, andere Ökodesign-Anforderungen (eben etwa mit Bezug zur Lichtverschmutzung) aufzustellen, sofern sie die primärrechtlichen Schranken [Stichwort Warenverkehrsfreiheit] beachten«.

Neben den verbindlichen Anforderungen enthält die Verordnung (EG) Nr. 245/2009 auch unverbindliche Vorgaben, so zur Lichtverschmutzung durch Straßenbeleuchtung. Dabei wird Lichtverschmutzung definiert als »die Summe aller nachteiligen Auswirkungen von Kunstlicht auf die Umwelt einschließlich der Auswirkung von Abfalllicht«, das wiederum verstanden wird als der »Teil des Lichts einer Beleuchtungsanlage, der nicht dem bestimmungsgemäßen Zweck dient. Dazu gehört:

- Licht, das nicht in das zu beleuchtende Gebiet fällt,
- diffuses Licht in der Nachbarschaft der Beleuchtungsanlage,
- die Lichtglocke, also die Aufhellung des Nachthimmels aufgrund direkter und indirekter Reflexion von (sichtbarer und nicht sichtbarer) Strahlung, die durch die Bestandteile der Atmosphäre (Gasmoleküle, Aerosole und Partikel) in Beobachtungsrichtung zerstreut wird.«

In Anhang VII der Verordnung (EG) Nr. 245/2009 werden unverbindliche Höchstwerte für den in den oberen Halbraum abgestrahlten Lichtanteil (Up-

31 Richtlinie 2005/32/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG sowie der Richtlinien 96/57/EG und 2000/55/EG

32 Gesetz über die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz – EVPG)

33 Verordnung (EG) Nr. 245/2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Leuchtstofflampen ohne eingebautes Vorschaltgerät, Hochdruckentladungslampen sowie Vorschaltgeräte und Leuchten zu ihrem Betrieb und zur Aufhebung der Richtlinie 2000/55/EG

ward Light Output Ratio – ULOR; Abb. 1.1) von Straßenbeleuchtungen angegeben. Dabei soll »in Gebieten, in denen die Lichtverschmutzung besorgniserregende Ausmaße annimmt, […] unabhängig von der Beleuchtungsklasse und der Lichtleistung höchstens 1 % des Lichts oberhalb der Horizontalen abgestrahlt« werden. Generell sollen Leuchten so konzipiert sein, »dass Abfalllicht so weit wie möglich vermieden wird«, jedoch sollen »Verbesserungen der Leuchten zur Verringerung des abgestrahlten Abfalllichts […] in keinem Fall zu Lasten der Gesamtenergieeffizienz der Anlage« gehen.

Die Verordnung (EG) Nr. 245/2009 wirkt sich erheblich auf die Entwicklung bei Außenbeleuchtung aus: Da bestimmte, in der öffentlichen Straßenbeleuchtung bislang gängige Produkte nicht mehr gehandelt werden dürfen und somit ggf. keine Ersatzteile mehr verfügbar sind, steigt der Druck insbesondere auf Kommunen, auf andere Technologien umzusteigen. Die Wahl fällt hierbei immer häufiger auf die ebenfalls u. a. von der EU auf unterschiedliche Weise geförderte LED (Kuechly et al. 2018). Durch eine Umrüstung auf LED ist zwar theoretisch eine Reduzierung der Lichtmenge möglich, da Leuchtmittel mit höheren Blauanteilen deutlich heller erscheinen als z. B. das gelbe Licht von Natriumdampflampen (Kap. 2.4.1). Diese Verschiebung im Spektralbereich der Beleuchtung kann aber mit negativen ökologischen Effekten einhergehen (Kap. 3.3).

Eine weitere EU-Regelung mit Relevanz für Lichtverschmutzung ist die Richtlinie 2014/52/EU[34]. Die Richtlinie verpflichtet die Mitgliedstaaten, vor der Genehmigung bestimmter öffentlicher und privater Projekte, eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen, deren Ergebnisse dann bei der Genehmigungsentscheidung zu berücksichtigen sind (Volgger 2015). Gemäß Artikel 3 der Richtlinie sind die unmittelbaren und mittelbaren erheblichen Auswirkungen eines Projekts u. a. auf die Faktoren Bevölkerung und menschliche Gesundheit, biologische Vielfalt sowie Sachgüter, kulturelles Erbe und Landschaft zu identifizieren, zu beschreiben und zu bewerten. Licht wird in der Richtlinie explizit als eine der Emissionen aufgeführt, deren Umfang und Auswirkungen, sofern relevant, in den Beschreibungen der Projekte zu benennen sind. In Deutschland regelt das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) die Umsetzung der Richtlinie 2014/52/EU.

Auch der Europarat (Parliamentary Assembly 2010) beschäftigte sich mit der voranschreitenden künstlichen Außenbeleuchtung und verabschiedete 2010 eine Resolution zum Thema Lärm- und Lichtverschmutzung. Die Mitgliedstaaten wurden in der Resolution dazu aufgerufen, einen gemeinsamen Zugang zur Minderung von Lichtverschmutzung zu entwickeln, indem Maßnahmen ergriffen werden u. a. zur Reduktion und Kontrolle künstlicher Beleuchtung im Außenraum, zur Bestimmung von Beleuchtungsobergrenzen und Standardisie-

34 Richtlinie 2014/52/EU zur Änderung der Richtlinie 2011/92/EU über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten

rung entsprechender Indikatoren, zur Festlegung hoher Umweltstandards im Beleuchtungsbereich sowie zur Integration des Themas in die Lehre an Schulen. Dem Committee of Ministers des Europarats wird geraten, die Mitgliedstaaten zur Überprüfung ihrer Gesetzeslage in Bezug auf Lärm und Lichtverschmutzung aufzurufen sowie die Möglichkeit einer Rahmenkonvention zu Maßnahmen auf europäischer Ebene zu prüfen (Meier/Pottharst 2013). Während das Committee of Ministers (2011) in seiner Stellungnahme den Empfehlungen weitgehend folgte, wurde eine Rahmenkonvention aus finanziellen Gründen nicht umgesetzt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass europäische Regulierungen über die Definition von Effizienzkriterien und Beschränkung ineffizienter Leuchtmittel durchaus Einfluss auf Lichtverschmutzung nehmen und weiter nehmen könnten. Die Erwähnung von Licht als eine relevante Größe bei der Umweltverträglichkeitsprüfung von Eingriffen in den Naturhaushalt eröffnet zudem den Mitgliedstaaten Möglichkeiten, im Rahmen nationaler Prüfverfahren auf die Reduzierung von Lichtverschmutzung hinzuwirken.

4.1.4 Regelungen in europäischen Ländern

International entstanden erste Bestrebungen zur Regulierung von Lichtverschmutzung auf kommunaler Ebene und verfolgten das Ziel, die Dunkelheit des Nachthimmels für astronomische Beobachtungen zu schützen. Als Vorreiter gilt Flagstaff in den USA, wo bereits 1958 zum Schutz zweier astronomischer Observatorien »Outdoor Lighting Ordinances« in Kraft traten (Kuechly et al. 2018). Auch auf überörtlicher Ebene stand zunächst der Schutz des Nachthimmels im Mittelpunkt: So diente die weltweit erste nationale Regulierung der Lichtverschmutzung vom 31. Oktober 1988 dem Schutz der Observatorien auf den Kanarischen Inseln (Marín et al. 2010). Mit wachsender Erkenntnis über die vielfältigen Auswirkungen künstlicher Beleuchtung im Außenbereich erweiterten sich auch die Zielstellungen und die Anzahl überörtlicher Regelungen ab der Jahrtausendwende. Als Vorreiter ist die italienische Provinz Lombardei mit ihrem damaligen Regionalgesetz N. 17 von 2000 zu nennen. Trotz Kritik an der Umsetzung und Einhaltung (Schulte-Römer et al. 2018) ist das Gesetz beispielgebend für entsprechende Gesetzgebungen in weiteren italienischen Regionen sowie als Grundlage für die nationale Verordnung über die Grenzwerte der Lichtverschmutzung der Umwelt in Slowenien von 2007 (Kuechly et al. 2018).

Bislang gibt es kaum international vergleichende Studien zu existierenden Regelungsansätzen für Lichtverschmutzung. Zu den Ausnahmen gehören Morgan-Taylor (2015) für den Vergleich Vereinigtes Königreich–Frankreich–Italien, Youyuenyong (2015) für Vereinigtes Königreich und mehrere, u. a. europäische, Länder und Wagner et al. (2015) für Österreich und Nachbarländer. Ein wesentlicher Grund für die geringe Anzahl an Untersuchungen besteht in

der jungen Geschichte der Regelung von Lichtverschmutzung, insbesondere auf überörtlicher Ebene.

Noch weniger als die existierenden Regelungsansätze sind ihre Genese, ihre Handhabung in der Praxis und ihre Wirksamkeit systematisch untersucht worden. Nachfolgend werden bestehende Regelungen in einzelnen europäischen Staaten näher betrachtet, die im Gutachten von Kuechly et al. (2018) zusammengetragen wurden.[35] Der Fokus liegt dabei auf Ländern mit dezidierten Lichtverschmutzungsregelwerken. Als Informationsgrundlagen dienen neben den genannten Vergleichsstudien (sofern weiterhin aktuell) insbesondere Dokumentationen und Präsentationen von Fachtagungen zu Regelungen in einzelnen Ländern, Medienberichte sowie zentrale Gesetzestexte. Die Verfügbarkeit zugänglicher und zitierfähiger Informationen gestaltet sich von Fall zu Fall sehr unterschiedlich, was sich auf den Umfang der einzelnen Darstellungen auswirkt.

4.1.4.1 Frankreich

Zentrale Grundlage für die Regelung von Lichtverschmutzung in Frankreich bilden die neuen Umweltschutzgesetzgebungen Grenelle I[36] von 2009 und Grenelle II[37] von 2010. Diese haben ihren Hintergrund im Umweltforum von Grenelle und definieren Grundsätze und langfristige Ziele (Grenelle I) sowie Maßnahmen zu deren Erreichung (Grenelle II) (Französische Botschaft 2010). Das Thema Lichtverschmutzung wurde von der Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes (ANPCEN) in den Grenelle-Prozess eingebracht und wird in Artikel 41 des ersten Gesetzes thematisiert. Demnach sind für die Emissionen künstlichen Lichts, die eine Gefahr oder erhebliche Störungen für den Menschen, für Fauna, Flora oder Ökosysteme oder eine Energieverschwendung darstellen oder die Beobachtung des Nachthimmels verhindern, Maßnahmen der Vorsorge, Unterdrückung oder Begrenzung zu treffen (Kuechly et al. 2018).

35 Über die nachfolgend dargestellten Länder hinaus befindet sich auch in Kroatien ein neues Gesetz gegen Lichtverschmutzung im Gesetzgebungsverfahren. Danach sollen u. a. Skybeamer, Deckenfluter, die Beleuchtung von Türen und Fenstern von außen sowie beleuchtete Schilder und Lampen, die eine hohe Farbtemperatur haben, in ökologisch sensiblen Orten verboten werden. Architektonische Fassadenbeleuchtung bleibt zwar weiterhin zulässig, muss sich aber streng auf Gebäudeflächen beschränken und darf nicht über diese Flächen hinausgehen. Ferner sind ökologische Leuchten, also Leuchten, die null Prozent über den Horizont strahlen, die einzige zulässige Form der Beleuchtung im Außenbereich. Die Durchsetzung des Gesetzes soll durch ein Inspektionssystem sichergestellt werden (WD 2019).

36 LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (1)

37 LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (1)

Infolge der Grenelle-Gesetze wurde die Arrêté NOR: DEVP1301594A[38] beschlossen, die im Juli 2013 in Kraft trat. Im Dezember 2018 wurde diese durch die Arrêté NOR: TREP1831126A[39] ergänzt und insbesondere das Prinzip der zeitlichen Begrenzung der Beleuchtung auf zusätzliche Standorte und Anlässe ausgeweitet. Diese Verordnung zielt darauf, sowohl die Lichtverschmutzung als auch den nächtlichen Energieverbrauch zu senken, indem die Beleuchtung von Nichtwohngebäuden zeitlich eingeschränkt wird. Insbesondere müssen

- die Innenbeleuchtung von Büro- und Geschäftsräumen spätestens 1 Stunde nach Ende deren Nutzung ausgeschaltet werden,
- Schaufensterbeleuchtungen zwischen 01:00 und 07:00 Uhr ausgeschaltet sein bzw. bei längeren Öffnungszeiten spätestens 1 Stunde nach Geschäftsschluss oder 1 Stunde vor Geschäftseröffnung,
- Gebäudeanstrahlungen, Gärten und Parks spätestens um 01:00 Uhr oder 1 Stunde nach Schließung ausgeschaltet werden (einschalten frühestens bei Sonnenuntergang).
- Parkplätze, die beispielsweise zu Supermärkten gehören, 2 Stunden nach Ladenschluss ausgeschaltet werden und entsprechende Außen- und Wegebeleuchtung eine Stunde nach Ende der jeweiligen Aktivität.
- Darüber hinaus sind Skybeamer, Laser und nächtliche Beleuchtung von Gewässern sowie Lichtimmissionen in Wohnräume generell verboten und die Lichtfarbe von Außenbeleuchtung darf 3.000 Kelvin nicht überschreiten.

Von den Regelungen ausgenommen ist neben der Innenbeleuchtung von Wohngebäuden auch die Sicherheitsbeleuchtung, sofern sie an Bewegungs- oder Einbruchmeldeeinrichtungen gekoppelt ist. Darüber hinaus haben die Präfekturen die Möglichkeit, Ausnahmeregelungen für Vorabende von Feiertagen, den Zeitraum der Weihnachtsbeleuchtung, bei besonderen lokalen Ereignissen oder für Orte mit außergewöhnlichem Tourismusaufkommen oder beständigen kulturellen Aktivitäten zu erlassen. Ebenso betrifft die Regelung nicht die Straßen- oder Werbebeleuchtung, für die im Décret n° 2012-118[40] gesonderte zeitliche Abschaltregelungen verfasst sind. Die Kontrolle der Einhaltung der Regelung obliegt den Bürgermeistern und Präfekten. Im Fall der Nichtbeachtung können Strafen von bis zu 750 Euro verhängt werden (Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie 2013).

38 Arrêté du 25 janvier 2013 relatif à l'éclairage nocturne des bâtiments non résidentiels afin de limiter les nuisances lumineuses et les consommations d'énergie; NOR: DEVP1301594A (Verordnung vom 25. Januar 2013 über Nachtbeleuchtung in Nichtwohngebäuden zur Begrenzung der Lichtverschmutzung und des Energieverbrauchs)

39 Arrêté du 27 décembre 2018 relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses; NOR: TREP1831126A (Verordnung vom 27. Dezember 2018 über die Vermeidung, Verminderung und Begrenzung der Lichtverschmutzung)

40 Décret n° 2012-118 relatif à la publicité extérieure, aux enseignes et aux préenseignes (Dekret Nr. 2012-118 über Außenwerbung, Schilder und Hinweisschilder)

Morgan-Taylor (2015) hat das Regelwerk insofern als Positivbeispiel eingeschätzt, als dass es am Nutzungszweck der jeweiligen Beleuchtung orientiert ist, dort bzw. dann ansetzt, wo künstliche Beleuchtung überflüssig ist und zu Lichtverschmutzung wird und einen Ausgleich schafft zwischen den Vorteilen/Nutzen und Nachteilen/Kosten der Gebäudebeleuchtung. Er betont dabei die Bedeutung der begleitenden, von der ANPCEN geleisteten Informationsarbeit, die als weiches Instrument die harte Gesetzgebung flankiert. Sie umfasst u. a. Empfehlungen für nachhaltige Beleuchtung und eine Charta für den Schutz des Nachthimmels und der nächtlichen Umwelt. Potenzielle Schwachstellen sieht Morgan-Taylor bei den recht weitreichenden Möglichkeiten für Ausnahmeregelungen.

Die ANPCEN überprüfte die Einhaltung der Verordnung seit Inkrafttreten dreimal. In der jüngsten Überprüfung, die anderthalb Jahre nach Inkrafttreten des Gesetzes durchgeführt wurde, zog sie eine gemischte Bilanz: Während die Regelungen in einigen Städten mit großer Wirkung angewandt wurden, wurden sie in anderen noch nicht umgesetzt bzw. ihre Umsetzung wurde nicht (ausreichend) durch die Gemeinden und den Staat kontrolliert. Deutliche Verbesserungen wurden bei Städten konstatiert, die infolge der ersten, auch in den Medien aufgegriffenen Überprüfung von der ANPCEN angesprochen wurden.[41]

Weitere Gesetze und Verordnungen, in denen das Thema Lichtverschmutzung bzw. Außenbeleuchtung Berücksichtigung findet, listet die ANPCEN auf ihrer entsprechenden thematischen Webseite. Hierzu zählen u. a. Regelungen in den Bereichen Biodiversitäts- und Landschaftsschutz, Energiepolitik sowie Außenwerbung.

4.1.4.2 Italien

In Italien besteht keine nationale Regelung für Lichtverschmutzung, zahlreiche Regionen haben jedoch entsprechende Gesetze eingeführt. Vorreiter war die Lombardei mit ihrem bereits im Jahr 2000 beschlossenen LEGGE REGIONALE N. 17[42] (Youyuenyong 2015). Diese Gesetzgebung diente anderen italienischen Regionen und auch einigen anderen Ländern, z. B. Slowenien (Kap. 4.1.4.5), als Vorbild.[43]

41 www.anpcen.fr/?id_rub=&id_ss_rub=127&id_actudetail=165 (20.2.2020)

42 LEGGE REGIONALE 27 marzo 2000, N. 17 Misure urgenti in tema di risparmio energetico ad uso di illuminazione esterna e di lotta all'inquinamento luminoso (Regionalgesetz vom 27. März 2000, Nr. 17 Dringende Energiesparmaßnahmen für die Außenbeleuchtung und die Bekämpfung der Lichtverschmutzung

43 In insgesamt 15 Regionen Italiens gibt es Gesetze gegen Lichtverschmutzung: Lombardei, Emilia-Romagna, Marken, Latium, Kampanien, Venetien, Toskana, Piemont, Aostatal, Basilikata, Abruzzen, Umbrien, Apulien, Friaul-Julisch Venetien und Ligurien (WD 2019).

Das Regionalgesetz N. 17 wurde seit seinem Beschluss mehrfach fortentwickelt und 2015 durch das Legge Regionale n. 31[44] außer Kraft gesetzt. Im Grundsatz betrifft es sämtliche künstliche Beleuchtung im Außenraum (also öffentliche und private Beleuchtung). Ausnahmen betreffen kleine Anlagen, temporäre Installationen, Weihnachtsbeleuchtung, Verkehrs- und andere Signalbeleuchtung sowie Formen der Not- und Sicherheitsbeleuchtung (Kuechly et al. 2018).

Zentral für das Regionalgesetz N. 31 ist die Regelung, dass Leuchten kein Licht oberhalb der Horizontalen abstrahlen dürfen und die energieeffizientesten Lampen nach aktuellem Stand der Technik einzusetzen sind. Die Beleuchtung hat fotobiologische Anforderungen zu erfüllen, darf sich also nicht verändernd auf den zirkadianen Rhythmus sowie die biologische Vielfalt und ökologische Gleichgewichte auswirken. Zudem darf die durch technische Normen vorgegebene Mindestleuchtdichte nicht übermäßig überschritten werden, d. h., das Minimum der Normen wird quasi als Maximum festgesetzt. Der Einsatz rotierender Lichtbündel (Skybeamer o. Ä.) ist verboten. Im Umkreis von Observatorien können Lichtverschmutzungsschutzzonen eingerichtet werden. Von der Region wird zudem ein Geoinformationssystem mit Daten zu öffentlichen Außenbeleuchtungsanlagen (Leuchtenkataster) geführt, das den Gemeinden zur Verfügung gestellt wird. Die Gemeinden sind zuständig für die Überwachung der Bestimmungen und können Verstöße mittels Geldbußen sanktionieren.

Zur Wirksamkeit des damaligen Regionalgesetzes N. 17 liegen unterschiedliche Informationen vor. Falchi (2011) konnte bei der Auswertung von Satellitendaten nachweisen, dass die Himmelsaufhellung trotz Zunahme der Anzahl der Beleuchtungsanlagen konstant geblieben ist, was der Autor auf den Erfolg des Gesetzes in der Lombardei zurückführte. Bei Beobachtungen vor Ort wurden jedoch zahlreiche Verstöße festgestellt (Kuechly et al. 2018).

Die autonome Provinz Bozen-Südtirol beschloss 2011 das Landesgesetz Nr. 4/2011[45]. Dieses legt fest, dass die Landesregierung sowohl Kriterien für den Bau neuer Anlagen zur öffentlichen Außenbeleuchtung als auch für die stufenweise Anpassung bereits bestehender öffentlicher Beleuchtungsanlagen zu definieren hat (Sagerer 2015b). Als öffentliche Außenbeleuchtung gelten dabei »alle Außenbeleuchtungsanlagen, die mit künstlichem Licht den öffentlichen Raum beleuchten, einschließlich jener mit dekorativem Charakter und jener für Werbezwecke«. Als öffentlicher Raum gelten »alle der Öffentlichkeit zugänglichen oder zur Verfügung gestellten Verkehrswege, Plätze, Parkplätze, Einrichtungen, Anlagen, Sportstätten, Bau- und Kunstdenkmäler sowie der Nachthimmel«.

44 Legge Regionale 5 ottobre 2015, n. 31 Misure di efficientamento dei sistemi di illuminazione esterna con finalità di risparmio energetico e di riduzione dell'inquinamento luminoso (BURL n. 41, suppl. del 09 Ottobre 2015) (Regionalgesetz Nr. 31 vom 5. Oktober 2015 Maßnahmen zur Verbesserung der Effizienz von Außenbeleuchtungssystemen mit dem Ziel, Energie zu sparen und die Lichtverschmutzung zu reduzieren)

45 Landesgesetz Nr. 4/2011 Maßnahmen zur Einschränkung der Lichtverschmutzung und andere Bestimmungen in den Bereichen Nutzung öffentlicher Gewässer, Verwaltungsverfahren und Raumordnung

Ausnahmen gelten für Alarmanlagen, Verkehrsregelungsanlagen, zeitlich begrenzte Weihnachtsbeleuchtung und Baustellen während der Arbeitszeit. Besonders hervorzuheben ist darüber hinaus, dass der Beschluss sehr weitgehende Bestandserhebungen sowie Aktionspläne zur Anpassung von Außenbeleuchtungsanlagen fordert, die von jeder Gemeinde und jedem sonstigen Eigentümer öffentlicher Außenbeleuchtungsanlagen zu erstellen sind. In den technischen Bestimmungen ist u. a. die »Verwendung von besonders effizienten Leuchtmitteln mit einer Lichtausbeute von mindestens 70 lm/W und möglichst geringem UV- und Blaulichtanteil sowie einer maximalen Farbtemperatur von 4.000 K« festgelegt und es wird bestimmt, dass Beleuchtungsanlagen so zu planen und zu bauen sind, dass die in den Sicherheitsnormen vorgesehenen Mindestwerte der durchschnittlichen Leuchtdichte nicht überschritten werden (d. h., das Normenminimum wird als Maximum festgelegt) (Sagerer 2015b).

4.1.4.3 Österreich

In Österreich besteht kein übergreifendes Regelwerk zu Lichtverschmutzung. Rechtliche Regelungen existieren bisher nur vereinzelt in Bezug auf Lichtimmissionen und -emissionen, während beleuchtungstechnologische Fragen ungeregelt sind (Wagner et al. 2015). Es bestehen jedoch mehrere (nicht rechtsverbindliche) Industrienormen, die ergänzend zur DIN EN 13201 in Österreich für die Planung der öffentlichen Beleuchtung von Bedeutung sind und die zum Teil Aspekte der Lichtverschmutzung thematisieren (Land Oberösterreich 2013).

Besonders hervorzuheben ist die seit 2012 gültige ÖNORM O 1052 Lichtimmissionen – Messung und Beurteilung, in der Grenzwerte für Lichteinwirkungen auf Mensch und Umwelt ebenso wie Mess- und Berechnungsverfahren zur Kontrolle der Einhaltung dieser Grenzwerte empfohlen werden (Wagner et al. 2015). Mit der Norm wird der Ansatz verfolgt, bei der Beurteilung von Lichtimmissionen grundsätzlich zwischen »notwendiger, sicherheitstechnisch begründeter Beleuchtung (SB)« und »nicht notwendiger, da nicht sicherheitstechnischen Zwecken dienender Beleuchtung (NNB)« zu unterscheiden. Für die NNB sind je nach Art des Bewertungsgebiets unterschiedliche Betriebszeiten festgelegt, um unerwünschte Aufhellungen zu vermeiden (Tab. 4.1). Darüber hinaus werden in der ÖNORM O 1052 generelle Anforderungen für umweltgerechte Beleuchtungsanlagen formuliert, u. a.:

- die Vermeidung der Beleuchtung von Schlaf- und Brutplätzen, wobei insbesondere Uferbereiche natürlicher bzw. naturnaher Gewässer nur um maximal 0,25 lx aufgehellt werden dürfen;
- die Vermeidung der Beleuchtung von Bäumen in der Vegetationsperiode;

- zum Schutz von Insekten den Einsatz geschlossener Leuchten, eine maximale Oberflächentemperatur von 60 °C und eine Minimierung bläulichen Lichts und von UV-Strahlung;
- eine Bevorzugung von Leuchtmittel mit warmweißer Farbtemperatur (≤ 3.000 K).

Tab. 4.1 Betriebszeiten für nicht sicherheitstechnischen Zwecken dienende Beleuchtung aus der ÖNORM O 1052

Bewertungsgebiete	Betriebszeiten
Gebiet I – gesetzlich festgelegte Gebiete zum Schutz der Natur, z. B. Nationalparks, Naturschutzgebiete und dergleichen	nicht zulässig
Gebiet II – nicht für Bebauung gewidmete Gebiete, Freilandgebiete, unbebaute Gebiete, Grünland	nicht zulässig
Gebiet III – Siedlungsrand, ländliche und durchgrünte Siedlungsgebiete	05:00 bis 22:00 Uhr
Gebiet IV – dicht bebaute Gebiete, städtische Gebiete, Industriegebiete	05:00 bis 24:00 Uhr

Quelle: Wiener Umweltanwaltschaft 2014

Weiter besteht mit der ÖNORM O 1053 Auswahl der Beleuchtungsklassen – Berücksichtigung des situativen Verkehrsflusses von 2011 eine Norm zur Absenkung des Beleuchtungsniveaus von Straßenbeleuchtung während der verkehrsschwächeren Nachtzeit zwecks Energieeinsparungen. Maßgaben zur Vermeidung visueller Störwirkungen von Informationsträgern für verkehrsfremde Zwecke wie LED-Screens oder Fassadenprojektionen, die Verkehrsteilnehmer z. B. durch Blendung oder Ablenkung beeinträchtigen können, werden in zwei dazu bestehenden Richtlinien und Vorschriften für den Straßenverkehr (RVS)[46] behandelt (Wagner et al. 2015).

Einzelne österreichische Bundesländer befassen sich seit einigen Jahren intensiv mit dem Thema Lichtverschmutzung. Zu nennen ist etwa das Land Oberösterreich, dessen Umweltanwaltschaft das Institut für Umweltrecht der Universität Linz mit Vorarbeiten für Gesetzesentwürfe zur Verhinderung von Lichtverschmutzung beauftragte. Mit einer begleitenden Projektgruppe entstanden 2014 Diskussionsentwürfe für ein Bundes- sowie ein Landesimmissions-

46 Die Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) stellen den Stand der Technik dar und können von den einzelnen Beteiligten in den Planungs- und Ausführungsphasen herangezogen werden. In Bezug auf Beleuchtung sind die beiden RVS 05.06.11 »Visuelle Störwirkungen – Kriterien zu Standorten von Informationsträgern« und RVS 05.06.12 »Visuelle Informationsträger für verkehrsfremde Zwecke« bedeutsam.

schutzgesetz Luft (Kerschner/Schulev-Steindl 2014). Ebenso veröffentlichte das Land Oberösterreich (2013) einen Leitfaden. Es wurde ein Lichtmessnetz zur langfristigen Beobachtung der Himmelsaufhellung etabliert sowie ein Lichtkataster für den Zentralraum des Bundeslandes erarbeitet (Land Oberösterreich 2017). Zum Zeitpunkt dieser Berichtserstellung lag keine abschließende Information über den Stand eines möglichen Gesetzgebungsprozesses vor.

4.1.4.4 Schweiz

In der Schweiz hat das Thema Lichtverschmutzung seit der Publikation des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (Klaus et al. 2005) eine breite Resonanz gefunden. Es gibt zwar kein eigenes Gesetz gegen Lichtverschmutzung in der Schweiz, doch weist das Bundesamt auf die Anwendbarkeit unterschiedlicher Gesetze zur Vermeidung von Lichtverschmutzung hin. Hierzu gehören:

- das Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG), das nach Artikel 11 bestimmt, dass Emissionen unabhängig von der bestehenden Umweltbelastung im Rahmen der Vorsorge so weit zu begrenzen sind, als dies technisch und betrieblich möglich sowie wirtschaftlich tragbar ist. Hierauf sowie auf Normen und die Publikation von Klaus et al. (2005) gestützt, sprach sich das schweizerische Bundesgericht für die Abschaltung einer ganzjährigen Festbeleuchtung im Nachtruhezeitfenster von 22:00 bis 06:00 Uhr aus (Sagerer 2015a);
- das Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz (NHG), das in Bezug auf die Auswirkungen übermäßiger Lichtemissionen auf die nächtliche Landschaft anzuwenden ist, da diese auch das heimatliche Erscheinungsbild beeinträchtigen;
- das Bundesgesetz über die Raumplanung (Raumplanungsgesetz, RPG) mit seinen Grundsätzen des Schutzes von natürlichen Lebensgrundlagen wie Boden, Luft, Wasser, Wald und Landschaft, auf Grundlage dessen nach Rechtsprechung Beleuchtungseinrichtungen von Großbauten und -anlagen baubewilligungspflichtig sind.

2013 beauftragte der Bundesrat das BAFU, die »Empfehlungen zur Vermeidung von Lichtemissionen« zu aktualisieren und zu erweitern. Inzwischen war die »Vollzugshilfe Lichtemissionen« in der Konsultation, in deren Rahmen über 70 Stellungnahmen eingegangen sind, sodass die Publikation der Vollzugshilfe daher erst 2019 erfolgen wird.[47]

47 www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/fachinformationen/lichtemissionen--lichtverschmutzung-/konsultation-vollzugshilfe-lichtemissionen.html (20.2.2020)

Zudem finden sich in einzelnen Kantonen Regelungen zu Lichtemissionen bzw. Beleuchtung. Besonders häufig wird dabei laut Sagerer (2015a) die Nutzung von Skybeamern reguliert bzw. verboten.

4.1.4.5 Slowenien

In der Republik Slowenien wurde 2007 die landesweit gültige 4162. Verordnung[48] erlassen. Die Verordnung wurde in einem ca. 12-jährigen Prozess unter Einbezug von Experten aus unterschiedlichen Fachrichtungen erarbeitet (Marchand 2011; Mohar 2015). Ziele sind nach Artikel 1 der Schutz der Natur vor schädlicher Wirkung der Lichtverschmutzung, der Wohnräume vor störender Beleuchtungsstärke, der Bevölkerung vor Blendung, der astronomischen Beobachtungen vor der Himmelsaufhellung und die Minderung des Stromverbrauchs der die Lichtverschmutzung verursachenden Lichtquellen. Nach Artikel 3 wird Lichtverschmutzung dabei verstanden als »die Lichtemission aus den Lichtquellen, durch welche die natürliche Beleuchtungsstärke der Umwelt erhöht wird«, d. h., jegliche künstliche Beleuchtung wird zunächst als Lichtverschmutzung gewertet.

Der Ansatz der Verordnung ist vergleichbar mit dem damaligen Regionalgesetz Nr. 17 der italienischen Provinz Lombardei (Kap. 4.1.3.2) und benennt sowohl öffentliche als auch privat betriebene Beleuchtungsquellen im Außenraum. Ausgenommen sind nach Artikel 2 Abs. 2 verschiedene Formen der Sicherheitsbeleuchtung, Verkehrssignale, temporäre Festbeleuchtung sowie Lichtquellen mit einem E-Anschlusswert geringer als 25 W. Festgesetzt sind u. a. Grenzwerte für folgende Parameter (Schlager 2015):

- Abstrahlungen über die Horizontale (grundsätzlich sind mit wenigen Ausnahmen Lichtquellen mit 0 % Emissionen über der Horizontalen zu verwenden);
- jährlicher Stromverbrauch für öffentliche Beleuchtung in Kommunen 44,5 kWh je Einwohner und für öffentliche Straßen und Autobahnen landesweit 5,5 kWh je Einwohner;
- E-Anschlusswerte für die Beleuchtung je m^2 Industrie- und Gewerbefläche, Fassaden, Kulturdenkmäler und Werbeobjekte (so z. B. für Produktionsstätten: 0,090 W/m^2 während der Durchführung des Produktionsprozesses sowie 30 Minuten vor Beginn und nach Ende der Betriebszeit und 0,015 W/m^2 außerhalb der Produktionszeit);
- Leuchtdichte von Fassaden- und Kulturdenkmalbeleuchtung (max. 1 cd/m^2 im Durchschnitt der Gesamtfläche des beleuchteten Fassadenteils).

48 4162. Verordnung über die Grenzwerte der Lichtverschmutzung der Umwelt (Übersetzung aus dem Slowenischen)

Für Arbeitsplätze im Freien (Flughäfen, Häfen, Eisenbahn) ist sicherzustellen, dass die durchschnittlich vorhandene Beleuchtungsstärke der für Arbeitsplätze im Freien geltenden Standardbeleuchtungsstärke nicht um mehr als 10 % überschreitet. Für bestimmte Werbebeleuchtungen gelten zudem Abschaltzeiten von 00:00 Uhr bis 05:00 Uhr. Grundsätzlich verboten sind Skybeamer, ebenso die Beleuchtung von Gebäuden (Fassaden, Kulturdenkmäler wie Kirchen), die Habitate für bedrohte Tierarten sind. Nicht geregelt wurde die spektrale Zusammensetzung der Beleuchtung. Mohar (2015) vermutet, dass dies an der Entwicklung der Verordnung vor der Massenverfügbarkeit von LED liegt.

Zur Erlangung von Baugenehmigungen ist die Einhaltung der in der Verordnung festgelegten Grenzwerte und Auflagen erforderlich. Zur Überprüfung wird bei größeren Anlagen die Erstellung von Beleuchtungsplänen sowie die Berichterstattung über deren Betrieb gefordert; entsprechende Unterlagen sind dem Umweltministerium zuzustellen. Das Monitoring der Gesamtentwicklung der Lichtverschmutzung steht in der Verantwortung des Ministeriums. Für Verstöße sind Strafen in Höhen von 600 bis 12.000 Euro vorgesehen.

Mohar (2015) hat die Verordnung in zahlreichen Punkten als erfolgreich eingeschätzt. Insbesondere zeigt es Wirksamkeit hinsichtlich einer Reduktion der Abstrahlungen über der Horizontalen sowie bei den angestrebten Energieeinsparungen. Erhebliche Vollzugsdefizite stellte der Autor hinsichtlich der Regulierung beleuchteter Werbetafeln sowie der – im Rahmen der Verordnung nicht geregelten – spektralen Zusammensetzung der Beleuchtung fest. Eine weitere Schwierigkeit besteht zudem für Kommunen jenseits der Hauptstadt Ljubljana in der Aufwendung der notwendigen Finanzmittel für die Umrüstung alter Beleuchtungsanlagen (Marchand 2011). Darüber hinaus besteht eine grundlegende Problematik in der Verwendung von E-Anschlusswerten als Bemessungsgröße. Da Beleuchtung immer energieeffizienter wird, kann auch mit geringen Anschlusswerten zunehmend heller beleuchtet werden (Kuechly et al. 2018).

So kam auch der Court of Audit of the Republic of Slovenia (2017) in seinem Prüfbericht zur Umsetzung der Verordnung im Zeitraum von 2007 bis 2017 zu dem Ergebnis, dass noch bedeutende Unzulänglichkeiten in der Vermeidung von Lichtverschmutzung bestehen. Die festgelegten Grenzwerte wurden als zum Teil nicht mehr zielführend eingeschätzt, insbesondere sind die festgelegten E-Anschlusswerte aufgrund der technischen Entwicklung nicht mehr angemessen. Ebenso wurde die Nichtexistenz von Bestimmungen hinsichtlich Lichtspektren bzw. Farbtemperatur angesichts wissenschaftlicher Erkenntnisse zu Auswirkungen von Beleuchtung auf die menschliche Gesundheit kritisiert. Zudem wurde das nur unregelmäßige und nicht umfassende Monitoring zur Lichtverschmutzung durch das Umweltministerium bemängelt.

Nach Einschätzung von Mohar (persönliche Kommunikation mit Autoren des Gutachtens Kuechly et al. 2018) sind u. a. dies Ansatzpunkte für eine gegenwärtig debattierte Weiterentwicklung der Verordnung.

4.1.4.6 Spanien

Ähnlich wie in Italien besteht auch in Spanien kein dezidiertes Lichtverschmutzungsgesetz für das gesamte Land, doch in mehreren Regionen gelten teils recht weitreichende Bestimmungen. Ein zentrales Thema der spanischen Regulierungen stellt der Schutz von Observatorien bzw. die Sicherung von Möglichkeiten zur Himmelsbeobachtung dar (Youyuenyong 2015).

Zum Schutz des Observatoriums Roque de los Muchachos auf der Kanareninsel La Palma wurde das Ley 31/1988[49] erlassen, das auf der Insel La Palma und für den nordwestlichen Teil Teneriffas gilt (Marín et al. 2010). Es wurde mit dem Real Decreto 243/1992[50] konkretisiert und mit dem Real Decreto 580/2017[51] geändert. Wesentliche Punkte sind, dass kein Licht oberhalb der Horizontalen abgestrahlt werden darf, auf La Palma nach Mitternacht nur noch Natriumdampfniederdrucklampen eingeschaltet bleiben dürfen und der Anteil blauen Lichts weniger als 15 % der Gesamtstrahlung betragen darf. Nicht definiert ist allerdings eine maximal erlaubte Lichtmenge. Da die Technik der Natriumdampfniederdrucklampen ausläuft, werden vermehrt bernsteinfarbene LED-Lampen eingesetzt. Messungen weisen auf die Wirksamkeit der Maßnahmen hin: Die Himmelshelligkeit hat seit Erlass des Gesetzes nicht wesentlich zugenommen, obwohl mehr Leuchten installiert wurden (Kuechly et al. 2018; Pedani 2004).

In mehreren Regionen Spaniens wurden seit der Jahrtausendwende ebenfalls Gesetze gegen Lichtverschmutzung erlassen, wobei das LLEI 6/2001[52] von Katalonien auch den Schutz der nächtlichen Natur beinhaltet. Es wurden vier Lichtschutzzonen eingerichtet, in denen unterschiedliche Regelungen zum Schutz des nächtlichen Himmels gelten. So dürfen z. B. in Naturschutzgebieten und der Umgebung eines Observatoriums auf dem Berg Montsec im dunklen Nordwesten Kataloniens nur noch voll abgeschirmte Lampen und Leuchtmittel mit gelben Spektralbereich installiert werden.[53]

49 Ley 31/1988 sobre Protección de la Calidad Astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias (Gesetz 31/1988 über den Schutz der astronomischen Qualität/Leistungsfähigkeit der Observatorien des Instituto de Astrofísica de Canarias)

50 Real Decreto 243/1992 por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 31/1988, de 31 de octubre, sobre protección de la calidad astronómica de los observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias (Königlicher Erlass 243/1992 zur Genehmigung der Bestimmungen des Gesetzes 31/1988 vom 31. Oktober 1998 über den Schutz der astronomischen Qualität/Leistungsfähigkeit der Observatorien des Instituto de Astrofísica de Canarias)

51 Real Decreto 580/2017, de 12 de junio, por el que se modifica el Real Decreto 243/1992, de 13 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 31/1988, de 31 de octubre, sobre Protección de la Calidad Astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias (Königlicher Erlass 580/2017 vom 12. Juni zur Änderung des Königlichen Erlasses 243/1992 vom 13. März 1992 zur Genehmigung der Bestimmungen des Gesetzes 31/1988 vom 31. Oktober 1988 zum Schutz der astronomischen Qualität der Observatorien des Instituto de Astrofísica de Canarias)

52 LLEI 6/2001, de 31 de maig, d'ordenació ambiental de l'enllumenamentper a la protecció del medi nocturn (GESETZ 6/2001 vom 31. Mai über das Umweltmanagement der Beleuchtung zum Schutz der Nachtumgebung)

53 www.ieec.cat/en/content/206/what-s-the-oadm (5.6.2020)

Abb. 4.2 Straßen mit abgeschirmter Beleuchtung in Santa Cruz de La Palma

Foto: A. Hänel

In der Region Andalusien wurde 2007 die Reduzierung der Lichtverschmutzung in das Ley 7/2007[54] aufgenommen und 2010 ein Dekret mit spezifischen Regelungen erlassen. Danach wurde in Andalusien eine Zonierung mit unterschiedlichen Schutzkriterien eingeführt, wobei um die Observatorien in der Sierra Nevada und um den Calar Alto die strengsten Regelungen gelten. Eine Herausforderung für die Umsetzung besteht darin, dass die insgesamt maximale Lichtmenge nicht begrenzt ist. Die in Spanien gängige Praxis hoher Beleuchtungsniveaus (Sánchez de Miguel/Zamorano 2008; siehe auch Kap. 2.2) zeigt, dass das reine Abschirmen von Leuchten nicht als alleinige Maßnahme gegen Lichtverschmutzung ausreicht, da das Licht z. B. auf Straßen und Fassaden reflektiert wird und so zur Himmelshelligkeit beiträgt (Abb. 4.2).

4.1.4.7 Tschechische Republik

Als Teil des Air Protection Act No. 86/2002)[55], eines Gesetzes zur Reinhaltung der Luft, führte die Tschechische Republik 2002 als erstes Land weltweit ein nationales Gesetz gegen Lichtverschmutzung ein (Lorenzen 2017). Als Lichtverschmutzung wird dabei jegliche Beleuchtung bezeichnet, die über die zu er-

54 Ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental (Gesetz 7/2007, vom 9. Juli, über ein integriertes Umweltqualitätsmanagement)

55 Act from Feb 14, 2002 on Protection of the Atmosphere and Amendment of some other Acts (the Clean Air Act)

hellenden Bereiche hinausgeht, insbesondere wenn sie über die Horizontale gerichtet ist (Hollan 2002). Das Gesetz sieht vor, dass in einer Verordnung Bestimmungen zur Begrenzung der Lichtverschmutzung sowie Obergrenzen für Lichtverschmutzung in verschiedenen Regionen geregelt werden. Kritisiert wurde, dass diese Konkretisierung bislang ausgeblieben ist und die Wirksamkeit des Gesetzes damit erheblich geschmälert wird (Dark Sky Czech Republik 2013). Zudem bemerkte Hollan (2004), dass der Bereich Lichtverschmutzung in der Überarbeitung des Air Protection Act in den Jahren 2003 und 2004 auf ein Minimum reduziert wurde.

4.1.4.8 Vereinigtes Königreich

Im Vereinigten Königreich besteht keine eigenständige Lichtverschmutzungsregelung, jedoch finden unerwünschte Auswirkungen künstlicher Beleuchtung Berücksichtigung in national gültigen Regelwerken zu übergeordneten Zielstellungen (Morgan-Taylor 2015).

Das zentrale Instrument ist der in England und Wales gültige »Clean Neighbourhoods and Environment Act 2005«. Das Gesetz berücksichtigt von Grundstücken ausgehende Lichtemissionen, die gesundheitsschädlich oder störend sind, als eine mögliche Form der Belästigung. Damit wurde die Grundlage geschaffen, dass lokale Verwaltungen in Beschwerdefällen Untersuchungen einleiten können und dass rechtlich gegen Lichtemissionen vorgegangen werden kann (DEFRA 2006; Youyuenyong 2015). Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn Licht von Parkplätzen oder Sportstätten in Hausfenster eindringt. An Stelle von festen Beleuchtungsobergrenzen wird eine Störwirkung von Fall zu Fall durch öffentliche Gesundheitsexperten festgestellt (DEFRA 2006). Es gelten jedoch Ausnahmen. So finden Lichtemissionen keine Berücksichtigung, wenn sie von Grundstücken ausgehen, die Verkehrszwecken dienen oder an denen aus Sicherheitsgründen hohe Beleuchtungsniveaus erforderlich sind, z. B. Flughäfen, Bahnanlagen, Haltestellen oder Gefängnissen. Ebenso bietet das Gesetz keinerlei Handhabe für Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung, die sich nicht direkt auf die menschliche Gesundheit oder Störungen beziehen (z. B. Auswirkungen auf Flora und Fauna), sodass es nur einen Teilaspekt der Lichtverschmutzung regelt (Youyuenyong 2015). Daher haben Morgan-Taylor (2015) und Youyuenyong (2015) die Regulierung von Lichtverschmutzung insgesamt kritisch gesehen: Das Problem wird durch die gegenwärtige Gesetzeslage fragmentiert, d. h. in verschiedenen Regelungen und nur in Teilaspekten benannt.

4.2 Technologische Optimierung von Beleuchtungsanlagen

Neben einer Regulierung der Außenbeleuchtung bestehen auch zahlreiche technologische Optimierungspotenziale, um die unerwünschten Nebenwirkungen künstlicher Beleuchtung zu reduzieren. Dabei eröffnen die Innovationen im Bereich der Beleuchtungs- und Steuerungstechnik einerseits wachsende Gestaltungsspielräume, z. B. über energieeffiziente, bedarfsorientierte Beleuchtung. Andererseits ergeben sich z. B. aus der Änderung der spektralen Zusammensetzung des emittieren Lichts beim Übergang von herkömmlicher hin zur LED-Beleuchtung neue Herausforderungen für den Artenschutz, aber auch für das menschliche Wohlbefinden. In diesem Kapitel werden die wichtigsten technischen und technologischen Ansatzpunkte, um Lichtverschmutzung zu reduzieren, skizziert. Weitere Ansatzpunkte und Optimierungspotenziale, z. B. Abschattungen von Beleuchtung in Gewächshäusern oder Innenräumen, wurden u. a. von Schroer und Hölker (2014) aufbereitet.

4.2.1 Notwendigkeit von Beleuchtung

Für eine Vermeidung bzw. Reduzierung der Lichtverschmutzung steht zwar typischerweise nicht der totale Verzicht auf künstliche Beleuchtung in Außenbereichen im Vordergrund, sondern der Einsatz einer bedarfsgerechten Beleuchtung. Dennoch ist die Definition von Gebieten mit unterschiedlichen Charakteristiken und Beleuchtungsbedarfen nützlich, um eine bedarfsgerechte, nachhaltige Beleuchtung zu etablieren (Kuechly et al. 2018).

Es sollte zunächst die Notwendigkeit einer (öffentlichen) Außenbeleuchtung überprüft werden. Hierfür müssten Kriterien entwickelt werden, mit denen insbesondere die Funktion der Beleuchtung (z. B. Sicherheits- oder Werbebeleuchtung), die Art des Ortes (z. B. Innenstadt oder Naturschutzgebiet) sowie die Zeit der Beleuchtung (z. B. mehr oder weniger intensive Nutzungszeiten) betrachtet werden. Räumliche Zonierungen, wie z. B. in der spanischen Provinz Katalonien etabliert, ebenso wie zeitliche Begrenzungen, wie z. B. in Frankreich, bieten Umsetzungsmöglichkeiten. Hinweise zum Vorgehen für die Erarbeitung eines großräumigen Beleuchtungskonzepts mit Berücksichtigung der Belange der Lichtverschmutzung finden sich z. B. in verschiedenen Handreichungen und Leitfäden (BAFU 2017; CIE 2017).

Die Evaluierung von aktuellen und geplanten Beleuchtungssituationen kann mithilfe von lichttechnischen Modellierungen erfolgen, z. B. durch die »Outdoor Site-Lighting Performance« (Brons et al. 2008) oder die »Upward Flux Ratio« zur Berechnung der Abstrahlung und Reflexion des Lichts (CIE 2017). Mit dem Light-Pollution-Index können z. B. Fassaden- und Straßenbeleuchtung aufeinander abgestimmt werden, die häufig getrennt voneinander

betrachtet werden, obwohl sie sich gegenseitig beeinflussen (Saraiji 2012). Die Nutzbarkeit dieser Modellierungsansätze in der Praxis ist bislang allerdings eingeschränkt. Weder lassen sie sich technisch in die gängigen Lichtrechenprogramme installieren noch existieren Grenzwerte für bestimmte Beleuchtungssituationen (Kuechly et al. 2018).

4.2.2 Beleuchtungsintensität und Platzierung von Anlagen

Ganz allgemein ist die Helligkeit an einem Ort einerseits von der Intensität der künstlichen Lichtquelle und dem Reflexionsgrad der Oberflächen abhängig und andererseits von dem Kontrast mit Hintergrund- und Umgebungshelligkeit (van Bommel 2015). Für die Festlegung der notwendigen Helligkeit ist die intendierte Funktion der künstlichen Beleuchtung ausschlaggebend: von der rein ästhetischen Beleuchtung über Sicherheit im Straßenverkehr bis hin zur Erkennbarkeit von Gesichtszügen auf dem Gehsteig. Für verschiedene Funktionen sind unterschiedliche Helligkeiten optimal und dementsprechend unterschiedliche und ggf. zeitlich variable Beleuchtungsintensitäten notwendig. So kann z. B. für den Straßenverkehr gezeigt werden, dass Leuchtdichten von mehr als 1 cd/m² kaum noch zur Verbesserung der Sicherheit beitragen (Tab. 4.2).

Tab. 4.2 Detektion von Objekten und Reaktionszeiten im Straßenverkehr in Abhängigkeit von der Leuchtdichte

Beleuchtung/Leuchtdichte	nur Scheinwerfer	0,1 cd/m²	1 cd/m²	2 cd/m²
Detektionsrate in % 18- bis 30-Jährige	51	93	95	95
Reaktionszeit in Sekunden 18- bis 30-Jährige	2,63	2,18	2,08	1,95
Detektionsrate in % 40- bis 70-Jährige	20	79	89	88
Reaktionszeit in Sekunden 40- bis 70-Jährige	2,83	2,59	2,19	2,13

Quelle: nach Fotios et al. (2017)

Grundsätzlich ist zu beachten, dass ursprünglich nach unten gerichtetes Licht durch Reflexion am beleuchteten Objekt zu einer störenden Lichtimmission führen kann. Daher ist nicht nur die Beleuchtungsstärke, sondern die Leuchtdichte zu berücksichtigen, denn sie bietet ein Maß dafür, wie hell die Beleuchtung wirkt (Kap. 1.1.1). Dabei ist das Reflexionspotenzial der zu beleuchtenden

Oberfläche zu berücksichtigen, das z. B. durch farbliche Unterschiede des Bodenbelags oder vorherrschende Witterungsbedingungen beeinflusst wird. Moderne Lichtmanagementsysteme erlauben es, die Emissionen einzelner Leuchten an diese Gegebenheiten anzupassen. Ziel mit solchen Lichtmanagementsystemen ist es, einen geeigneten Kontrast von Objekt und Umgebung mit möglichst geringer Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte herzustellen. Denn durch sehr hohe Leuchtdichten kann sich der Kontrast und damit die Erkennbarkeit von dunklen Objekten untereinander reduzieren (Kap. 3.1.3.1).

Um ein Sicherheitsgefühl für Passanten zu erzeugen, müssen Gesichts- und Objekterkennung auf dem Bürgersteig oder öffentlichen Plätzen gewährleistet sein. Moderne Beleuchtungstechnologien mit hoher Farbwiedergabe (wie z. B. LED) erreichen die notwendige Beleuchtungsstärke bei niedrigerem Energieaufwand als Leuchten mit geringerer Farbwiedergabe (Kap. 1.4.1). Für die Mindestanforderungen des Beleuchtungsniveaus sollte dieser Vorteil breitbandiger weißer Leuchtmittel bessere Berücksichtigung finden (Fotios/Goodman 2012). Das würde bedeuten, dass Kommunen im Zuge der Umstellung auf LED-Straßenbeleuchtung auf Straßen mit bis zu 30 km/h Geschwindigkeitserlaubnis statt 5 nur 2,9 lx und auf Geh- und Radwegen statt 2 lx nur 1 lx Beleuchtungsstärke bereitstellen müssten (Schroer/Hölker 2018). Allerdings gehen von Leuchtmitteln mit Lichtabstrahlung in einem eher begrenzten Spektrum oft geringere ökologische Wirkungen aus als von breitbandigen Leuchtmitteln mit höheren Blauanteilen (Kap. 3.3 u. 4.2.5).

Um eine gute Auswahl und Platzierung von Leuchten zu gewährleisten, sind ebenso Informationen zur Gesamtbeleuchtungssituation notwendig. Diese ergibt sich aus Art, Funktion und der räumlichen Verteilung der Leuchten, der Umgebungssituationen und weiteren Faktoren wie der Topografie (BAFU 2017). Daneben ermöglichen die Kenntnis von Position, Masthöhe, Leuchtentyp, Leuchtmittel, Anschlusswert und Installationszeit in einem Leuchtenkataster (Kap. 1.1.2) Aussagen über die Verteilung der Lichtemissionen. In Regionen Italiens ist daher die Führung eines solchen Leuchtenkatasters Pflicht. In Südtirol werden neben der öffentlichen Beleuchtung auch private Anlagen ab einem bestimmten Schwellenwert erfasst (Kap. 4.1.4.2).

Die Platzierung von Leuchten in ökologisch sensiblen Räumen sollte gesondert betrachtet werden. Auch hierzu liegen Empfehlungen vor (CIE 2017), die z. B. in Großbritannien, aber auch bei der Zonierung von Lichtschutzgebieten angewendet werden (Kap. 4.1.2.1). Dabei wird u. a. empfohlen, in den Kernzonen der Schutzgebiete kein stationäres künstliches Licht, außer für Sicherheitszwecke, aufzustellen und bei diesen Anlagen nur Leuchtmittel mit geringem Blauanteil zu verwenden.

Für beleuchtete Flächen, wie z. B. Werbetafeln, ist zu beachten, dass helle Leuchttafeln Blendung verursachen können und ein Sicherheitsrisiko darstellen. Von der SSK (2006) wurde hierfür ein Grenzwert von 730 cd/m^2 angegeben.

Dieser Grenzwert muss aufgrund des Alterungsprozess des menschlichen Auges und die damit erhöhte Streuwirkung herabgesetzt werden, da ältere Menschen schneller von Lichtquellen geblendet sein können. Eine Berechnung solcher Anpassungsfaktoren ist möglich (SSK 2006; Wittlich 2010). Die Sichtbarkeit der beleuchteten Flächen hängt auch von der Lichtfarbe, der Größe und dem Kontrast ab. So kann eine gute Lesbarkeit auch durch die Wahl einer hellen Schrift vor dunklem Hintergrund erreicht werden. Zudem sind in weniger beleuchteten Gebieten geringere Leuchtdichten erforderlich (Kuechly et al. 2018).

Der Einfluss verschiedener Straßenbeleuchtungssysteme auf die Himmelshelligkeit wurde in einer Studie der Pacific Northwest National Laboratory des U.S. Department of Energy (Kinzey et al. 2017). Dabei wurden Anlagen mit unterschiedlichen Abstrahlcharakteristiken, Leuchtmittel mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung und eine Modifikation der Stärke des Lichtstroms untersucht. Mit einer Abstrahlcharakteristik, die Lichtemissionen oberhalb der Horizontalen verhindert, und einer Reduzierung des Lichtstroms ließ sich die Himmelsaufhellung erheblich gegenüber der typischerweise eingesetzten Straßenbeleuchtung mit Natriumhochdruckdampflampen reduzieren (Kap. 4.2). Auch mit LED oder anderen Leuchtmitteln ohne oder mit geringen Blauanteilen (Abb. 2.13 in Kap. 2.4.1) ließ sich die Himmelsaufhellung reduzieren. Mit LED mit hohen Blauanteilen erhöhte sich hingegen die Himmelshelligkeit um bis zu 60 %.

4.2.3 Zeitliche Abschaltung öffentlicher Beleuchtung

Wenn die Nutzung des öffentlichen Raums in Siedlungen in den späten Abendstunden endet, kann die öffentliche Beleuchtung ausgeschaltet oder zumindest reduziert werden. Die Anpassung der Beleuchtung an die Nutzungsintensität des öffentlichen Raums kann durch Abschaltung in den späten Nachtstunden, eine Leistungsreduzierung oder gar eine bedarfsorientierte Beleuchtung (z. B. durch Bewegungsmelder) erreicht werden (Kap. 1.3.2). So operieren zurzeit Städte und Gemeinden in Deutschland mit Halbnachtschaltungen, bei denen jede zweite oder dritte Straßenlampe abgeschaltet wird. Diese Halbnachtschaltung ist allerdings nur wenig empfehlenswert, weil sich in den unbeleuchteten Zwischenräumen Schatten bilden, die Sicherheitsrisiken generieren könnten. Ratsamer wäre, die gesamte Beleuchtungsstärke stufenweise zu dimmen. Dazu sind in modernen Beleuchtungsanlagen häufig Steuergeräte integriert (Schroer/Hölker 2018).

In vielen europäischen Ländern wurde eine zeitliche Beleuchtungssteuerung bereits in nationalen und regionalen Gesetzen eingebettet. So sind insbesondere in Frankreich Gebäudeanstrahlungen, die Innenraumbeleuchtung von Gewerbeflächen, oder die Beleuchtung von Parks oder Supermarktparkplätzen spätestens um 01:00 Uhr oder 1 bzw. 2 Stunden nach Schließung abzuschalten.

In Regionen Italiens müssen Straßenleuchten ebenfalls ab 01:00 Uhr ausgeschaltet oder mit Vorrichtungen ausgestattet werden, die eine Leistungsreduzierung um mindestens 30 % erlauben. Auch ein Großteil der kommerziellen Beleuchtung (Werbeobjekte und -schilder) muss in Italien und Slowenien nach 00:00 Uhr abgeschaltet werden (Kap. 4.1.3). Erste rechtsverbindliche Schritte werden in Deutschland bei der Beleuchtung von Windparkanlagen unternommen (Fachagentur Windenergie an Land 2016), um durch zeitliche oder anlassbezogene Steuerung der Befeuerung von Windkraftanlagen das Kollisionsrisiko für Vögel zu minimieren (z. B. Gehring et al. 2009).

Zur Reduzierung der ökologischen Auswirkungen künstlicher Beleuchtung ist eine zeitliche Abschaltung aber nur bedingt hilfreich. Der höchste Bedarf an natürlicher Dunkelheit liegt für viele Wildtiere in den frühen Abendstunden kurz nach Sonnenuntergang und fällt so mit der höchsten Notwendigkeit für Beleuchtung z. B. im Straßenverkehr zusammen (Day et al. 2015). Zeitliche Abschaltungen können auch Adaptationseffekte von Tieren hervorrufen (Kap. 3.3.2). Über die tatsächlichen Auswirkungen durch zeitliche Abschaltungen der Beleuchtung, zu welcher Zeit die Abschaltung am sinnvollsten durchzuführen wäre und vor allem über Auswirkungen durch standort- und zeitgebundene Abschaltungen, gibt es bislang noch keine hinreichend aussagekräftigen Studien (Schroer/Hölker 2018). Eine 7-jährige Studie mit Skybeamern am Ground Zero in New York zeigte, dass das orientierungslose Verhalten bei Vögeln, die in der Strahlung gefangen waren, mit der Abschaltung der Beleuchtung sofort aufgehoben werden konnte (Van Doren et al. 2017). Bei Fledermäusen profitieren fünf von acht untersuchten Arten nicht von der zeitlichen Abschaltung, wenn sie nicht schon in frühen Abendstunden praktiziert wird (Azam et al. 2015). Es wird aber angenommen, dass saisonales Wanderverhalten bei Vögeln oder der Schwarmflug von Eintagsfliegen durch zeitliche Lichtabschaltungen geschützt werden könnten (Krijgsveld et al. 2015; Kriska et al. 2008).

4.2.4 Abschirmung und Abstrahlungsgeometrie

Verschiedene Modellrechnungen zeigen, dass zur Reduzierung der diffusen Lichtglocken über den Städten vor allem die Abstrahlung in horizontaler Richtung unterbunden werden muss (Baddiley/Webster 2007; Luginbuhl et al. 2009). Dies reduziert gleichzeitig die direkte Blendung durch Beleuchtungsanlagen. Die Abstrahlcharakteristik eines Leuchtenmodells lässt sich über die Abschirmung durch das Gehäuse beeinflussen und wird durch die Upward Light Output Ratio (ULOR) (Kap. 1.1) beschrieben. Die ULOR drückt das Verhältnis des Lichtstroms, der von einer Leuchte in den Raum oberhalb der Horizontalen abgegebenen wird, zu dem gesamten abgegebenen Lichtstrom aus. Entscheidend für die tatsächliche Abstrahlung ist neben der Abschirmung der Leuchte aber auch ihre Installation. So kann eine Leuchte mit ULOR = 0 % bei einer

schrägen Montage durchaus Licht in der Horizontalen abgeben. Daher wird zur Beschreibung des im installierten Zustand abgegeben Lichts oberhalb der Horizontalen die Upward Light Ratio (ULR) herangezogen. Für die schräg installierte Leuchte mit ULOR = 0 % wäre entsprechend die ULR > 0 % (linkes Foto in Abb. 4.3).

Abb. 4.3 Montagealternativen von Straßenbeleuchtungsanlagen

Foto: A. Hänel

Die ULR lässt sich für Straßenszenen mit Programmen für die Beleuchtungsplanung berechnen (Kuechly et al. 2018). Nach der nationalen Gesetzgebung Sloweniens und den regionalen Gesetzgebungen in Italien dürfen dort nur Leuchten verwendet werden, die im montierten Zustand kein Licht oberhalb der Horizontalen abstrahlen (Kap. 4.1.4).

Die Illuminating Engineering Society (IES) definiert »fully shielded« als Leuchten, die kein Licht oberhalb der Horizontalen abgeben (NLPIP 2007). Bei Full-Cut-off-Leuchten ist zusätzlich die Abstrahlung zwischen der Horizontalen und bis zu 10° darunter beschränkt. Der Einfluss von voll abgeschirmten Leuchten auf die Himmelshelligkeit nimmt mit der Entfernung der Lichtquelle zu. So lässt sich die Himmelshelligkeit in 40 km Entfernung um 95 % reduzieren, wenn voll abgeschirmte Leuchten anstatt Leuchten mit 2 % ULOR eingesetzt werden (U.S. Department of Energy 2017). Mit einer solchen Abstrahlcharakteristik konnte in einem US-amerikanischen Versuchsaufbau die Himmelsaufhellung erheblich gegenüber der typischerweise eingesetzten Straßenbeleuchtung reduziert werden (Kinzey et al. 2017). Für Verkehrsflächen bie-

ten daher voll abgeschirmte Leuchten, die im installierten Zustand nur Licht unterhalb der Horizontalen abstrahlen (UL = 0 %) und möglichst wenig blenden, die derzeit nachhaltigste Form für eine Straßenbeleuchtung (Schroer/Hölker 2018).

Wenn Akzente für die Gestaltung der Nachtlandschaft durch Beleuchtung historischer Gebäude gesetzt werden sollen, sollte die Fläche des Bauwerks nicht überstrahlt und Reflexion am Bauwerk auf ein Mindestmaß reduziert werden. Eine zielgenaue Anstrahlung von Objekten kann mit Reflektoren, Abblendklappen, Gitterblenden und Projektionstechniken wie einem Fassadenumriss als Schablone auf der Leuchte realisiert werden (Mohar et al. 2014; Offenberger 2015) (Abb. 4.4). Sogar das Anstrahlen von Objektteilen, z. B. um Ausflugslöcher von Fledermausquartieren zu schützen, kann auf diese Weise gewährleistet werden (Lang 2013).

Abb. 4.4 Gebäudeanstrahler mit Fassadenschablone

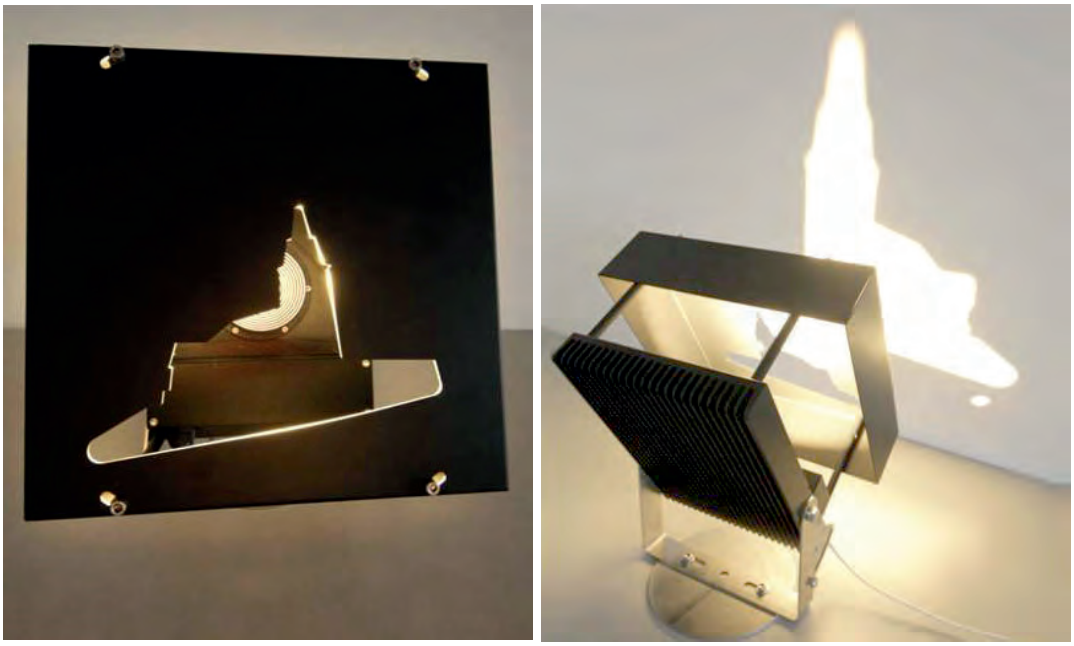


Foto: A. Mohar

4.2.5 Spektrale Zusammensetzung

Auch das Lichtspektrum bzw. die Lichtfarbe einer Lichtquelle kann nichtintendierte Wirkungen aufweisen. Für den Menschen nimmt die Störwirkung z. B. in folgender Reihenfolge zu: gelbe oder weiße, grüne, rote oder blaue Lichtfarbe sowie bewegtes Licht mit geringer und mit hoher Blinkfrequenz (BAFU 2017).

Die Auswirkungen verschiedener Lichtspektren auf Flora und Fauna wurden in Kapitel 3.3 ausführlich dargestellt. So sollte Beleuchtung mit grellem Licht und mit Licht im blauen Spektralbereich während des Abends und der Nacht vermieden werden, da viele relevante Wirkungen auf Insekten und Amphibien und einiger andere Taxa durch den kurzwelligen Spektralbereich hervorgerufen werden. Weiterhin wirkt die UV-Strahlung, welche für den Menschen nicht sichtbar ist, besonders attraktiv auf Vögel, Insekten und Amphibien und sollte daher für Außenbeleuchtung keine Anwendung finden oder ausgefiltert werden. Donners et al. (2018) entwickelten auf Grundlage von Daten aus Feldexperimenten ein Modell, um die Attraktivität von Lichtquellen zu quantifizieren. Das Modell soll die Entwicklung und den Einsatz von Lichtquellen fördern, die weniger Insekten anziehen, ohne dass umfangreiche Feldversuche erforderlich sind. Allerdings kann sich auch Licht im langwelligen Bereich negativ auf Tierarten auswirken, z. B. auf Nagetiere oder Vögel. Die Wahl des Leuchtmittels allein kann somit keinen Artenschutz gewährleisten, sondern nur im Zusammenspiel mit anderen Maßnahmen, z. B. durch Beleuchtungsstärkeregelung, Optimierung der Abstrahlungsgeometrie und zeitliche Abschaltung sinnvolle Beiträge zur Reduzierung der ökologischen Wirkungen von Lichtverschmutzung realisiert werden können (Schroer/Hölker 2018).

Die Umrüstung von Natriumdampfhochdrucklampen auf LED-Beleuchtung kann mit einer Erhöhung des blauen Spektralanteils einhergehen. Dies wirkt nicht nur negativ auf zahlreiche Tierarten, sondern erhöht auch die Himmelshelligkeit. Eine Alternative sind PC-Amber-LED mit geringen Anteilen kurzwelliger Strahlung. Der Einsatz dieser Leuchtmittel erhöht die Himmelshelligkeit bei der Umrüstung von Natriumdampfhochdrucklampen nicht (U.S. Department of Energy 2017). In Tabelle 4.3 sind die Blauanteile im Verhältnis zum gesamten sichtbaren Spektralbereich für verschiedene Leuchtmittel zusammengefasst. Die Tabelle zeigt, dass mit Zunahme der Farbtemperatur, die in Kelvin angeben wird, der Anteil an blauem Licht zunimmt.
Um eine Aufhellung des Nachthimmels und humanmedizinische Auswirkungen zu vermeiden, die am stärksten durch das blaue Lichtspektrum hervorgerufen werden, sollten Leuchtmittel mit Farbtemperaturen von unter 3.000 K eingesetzt werden (Kantermann 2018; Kuechly et al. 2018). In naturnahen Bereichen sind bevorzugt Leuchtmittel mit möglichst geringem Blauanteil (z. B. Natriumdampfniederdruckleuchten bzw. PC-Amber-LED) zu verwenden (Schroer/Hölker 2018).

Die Wahl der richtigen Farbtemperatur ist allerdings in Expertenkreisen umstritten, da sich mit kühleren Farbtemperaturen noch energieeffizienter beleuchten lässt (Schulte-Römer et al. 2018). Die Frage nach einer nachhaltigen Farbtemperatur für LED-Beleuchtung enthält somit einen Klimaschutz- und einen Artenschutzaspekt.

Tab. 4.3 Blauanteil verschiedener Leuchtmittel

Leuchtmittel	Farbtemperatur in K	Blauanteil < 500 nm in %	Blauanteil < 540 nm in %
Quecksilberdampf	4.200	29	33
Fluoreszenz	3.000	22	26
Fluoreszenz	4.100	24	47
Halogenmetalldampf	3.000	25	53
Halogenmetalldampf	4.000	50	83
LED	2.400	12	21
LED	3.000	13	25
LED	4.000	24	57
PC-Amber-LED	1.800	0	0
Natriumdampfhochdruck	2.000	7	9
Natriumdampfniederdruck	1.800	0	0

Quelle: nach Kuechly et al. 2018, S. 134

5 Handlungsoptionen

Seit dem vergangenen Jahrhundert nimmt der Einsatz von künstlichem Licht in der Nacht exponentiell zu. Treibende Faktoren sind die Lichtanforderungen der modernen 24-Stunden-Gesellschaft, die positiven Assoziationen des Menschen mit Licht und der technische Fortschritt, der es erlaubt, kostengünstig und mit hohen Lichtintensitäten zu beleuchten. Künstliche Beleuchtung ist zu einem selbstverständlichen Teil des modernen Alltags geworden und wird dementsprechend kaum hinterfragt, auch ihre Schattenseiten bleiben verborgen. So hilfreich Außenbeleuchtung ist, so problematisch kann ihre Wirkung auf die Natur einschließlich des Menschen sein. Es erfolgt erst seit wenigen Jahren ein Umdenken, die nichtintendierten Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung als Lichtverschmutzung wahrzunehmen und zu erforschen. Intelligente und nachhaltige Beleuchtungskonzepte mit dem Grundsatz, künstliches Licht nur dort und nur dann zu verwenden, wenn es gebraucht wird, sind im Vormarsch. Nach dem Vorsorgeprinzip – ein wesentliches Element der EU-Politik und des deutschen Umweltrechts – ist mit künstlichem Licht schonend umzugehen, frühzeitig und vorausschauend und im Interesse künftiger Generationen zu handeln, auch wenn Ursache-Wirkungs-Beziehungen noch nicht vollständig verstanden sind. Diesbezüglich sind die Folgen künstlicher Beleuchtung im Außenbereich weiter zu erforschen, gesellschaftlich bekannt zu machen und zu diskutieren, und Regelungsformen, Normen und Fördermaßnahmen im Hinblick auf eine Vermeidung von Lichtverschmutzung zu ertüchtigen.

5.1 Effektivierung der Steuerungsmöglichkeiten für Außenbeleuchtung

Auch wenn das Themenfeld Lichtverschmutzung noch viele offene Forschungsfragen birgt, weisen die in diesem Bericht zusammengetragenen wissenschaftlichen Aspekte und Daten insbesondere auf die zahlreichen ökologischen Wirkungen der zunehmenden künstlichen Beleuchtung hin. Allerdings sollte für die Beurteilung von Lichtimmissionen nicht auf die Erforschung populationsrelevanter Parameter und Schwellenwerte gewartet werden, denn diese Forschung über Auswirkungen auf einzelne Arten und Ökosysteme ist sehr kostenintensiv und zeitaufwendig (Kap. 5.3). Um dem globalen Trend der Aufhellung von Nachtlandschaften entgegenzuwirken, sollten Lichtimmissionen vielmehr auch vorsorgeorientiert beurteilt werden. Auf diesem Grundsatz aufbauend, könnten schon mit dem heutigen Wissen und dem Stand der Technik Handlungsleitlinien konkretisiert werden, die helfen, die negativen Auswirkungen auf Flora, Fauna und ihre Habitate zu reduzieren, ohne auf künstliches Licht in

der Nacht verzichten zu müssen. Dabei kann von den Erfahrungen anderer europäischer Länder profitiert werden (Kap. 4.1.4).

Es besteht im Moment in Deutschland keine singuläre Regelung, die die Belästigungen für Mensch, Flora, und Fauna durch künstliche Beleuchtung umfassend benennt. Dies wäre auch nicht zwingend erforderlich, denn für eine Regulierung der Lichtverschmutzung stehen verschiedene Handlungsinstrumente zur Verfügung, z. B. im Rahmen des Planungs-, Bauordnungs- und Naturschutzrechts (Kap. 4.1.1). Es gilt jedoch, die bereits bestehenden Instrumente durch eine erhöhte Verbindlichkeit und eine explizite Berücksichtigung der unerwünschten Auswirkungen von künstlicher Beleuchtung effektiver zu nutzen, Lücken in der Regelungslandschaft zu schließen und öffentliche Fördermittel auch im Hinblick auf eine Reduzierung und Vermeidung von Lichtverschmutzung einzusetzen.

Um die nichtintendierten Wirkungen von Außenbeleuchtung zu minimieren, ist die Regulierung der Gesamtbeleuchtungssituation wichtig, d. h., dass sowohl öffentliche als auch privat betriebene Lichtquellen berücksichtigt werden müssen. Zudem scheint es angebracht, einen räumlich differenzierten Ansatz zu wählen: Dies erlaubt, unterschiedliche Bedürfnisse, räumlich gebundene Funktionen und Nutzungen von Beleuchtung zu berücksichtigen, etwa indem ein Bezug zu Flächennutzungskategorien hergestellt wird. Konkrete Handlungsempfehlungen lassen sich für die folgenden Bereiche ableiten (Kuechly et al. 2018; Schroer/Hölker 2018):

Es könnte eine bindende Verpflichtung zur Erstellung und Aktualisierung von Leuchtenkatastern auf kommunaler Ebene vorgesehen werden, die sowohl öffentliche als auch privat betriebene Außenbeleuchtung umfasst. Auf dieser Basis könnten Kommunen zu einer Lichtrahmenplanung verpflichtet werden.

Lichtkonzepte stellen ein Instrument dar, private und öffentliche Beleuchtung in Städten und Regionen zu koordinieren, wobei das Thema Lichtverschmutzung stärkere Berücksichtigung finden sollte. Empfehlungen für zu verwendende Methoden und Verfahren sowie Kriterien für die Evaluierung, Integration und Koordination von Lichtquellen sollten den Gemeinden hierfür von Bundes- oder Länderseite bereitgestellt werden. Ebenso wäre zu erwägen, ob den Gemeinden und Regionen finanzielle Unterstützung für die Entwicklung integrierter Lichtkonzepte im Rahmen von Förderprogrammen zur Verfügung gestellt wird.

Im Rahmen von baurechtlichen Regelungen wäre es möglich, Lichtverschmutzung zu verhindern, bevor sie entsteht. Differenzierte Regelungen, die etwa je nach räumlichem Kontext Maximalwerte für Lichtemissionen definieren, erscheinen als eine besonders geeignete Möglichkeit, unterschiedlichen Beleuchtungsbedarfen (Art und Menge) Rechnung zu tragen.

Lichtemissionen könnten eine (verstärkte) Berücksichtigung als Kriterium in Planungsfeststellungsverfahren und Umweltverträglichkeitsprüfungen fin-

den, indem eine Bewilligungspflicht auch für Beleuchtungsanlagen vorgesehen wird. Ähnlich zu Lärm- und Luftemissionen könnten dabei Grenzwerte für die Lichtemissionen eingeführt werden.

Eine Erweiterung der Befugnisse der Länder im BlmSchG und eine Klärung der Frage, ab wann Lichtemissionen als schädliche Umwelteinwirkung gelten, schließt dies mit ein. Es wird angeregt zu überprüfen, inwieweit die Bemessungsgrundlage bei der Überarbeitung der Licht-Richtlinie zur Umsetzung des BImSchG neue Technologien, wie Dimmung, bewegtes und farbiges Licht, berücksichtigt.

Die Erfahrungen zum Thema Lärm und die Ableitung von Gesetzen, Normen, Empfehlungen können hilfreiche Orientierung für den Umgang mit künstlichem Licht bieten. Zwischen Lärm und Licht bestehen zahlreiche Parallelen in Eigenschaften und Auswirkungen (Radicchi et al. 2016; Schroer/Hölker 2014). Ähnlich wie die Technische Anordnung Lärm tageszeitliche Differenzierungen für zulässige Lärmbelästigung vorsieht, könnte eine Technische Anordnung Licht auf Bundes- und Länderebene nachtzeitliche Differenzierungen für zulässige Lichtimmissionen vorsehen.

Lichtemissionen sollten vor allem in ausgewiesenen Naturschutzgebieten und Landschaftsschutzgebieten kritisch überwacht und begrenzt werden, um die Flora und Fauna, aber auch die Eigenart, Schönheit und den Erholungswert von Natur und Landschaft zu schützen. Einen ersten Schritt in diese Richtung wird mit der »Qualitätsoffensive Naturparke«[56] gegangen, in der auch Kriterien der Lichtverschmutzung enthalten sind (Köster/Schäfer 2015).

In diesem Zusammenhang bieten die Initiativen zur Entwicklung eines »Blauen Bands Deutschland«‹[57] und des »Grünen Bands«[58] die Möglichkeit, in den sich entwickelnden Lebensraumkorridoren Lichtimmissionen stärker zu regulieren und damit Refugien für empfindliche Arten zu schaffen bzw. zu erhalten.

---

56 Die Entwicklung Qualitätsoffensive lag beim Verband Deutscher Naturparke e. V. (VDN) und wurde durch das Bundesamt für Naturschutz (BfN) mit Mitteln des Bundesumweltministeriums (BMU) gefördert. Ziel ist es, den Naturparks ein Instrument zur Selbsteinschätzung und zur kontinuierlichen Verbesserung der Qualität ihrer Arbeit und ihrer Angebote zur Verfügung zu stellen. Die für die Qualitätsoffensive ausgewählten Kriterien erfassen den Status quo der deutschen Naturparks, durch die Bewertung dieser Kriterien wird die Qualität der Arbeit in den Naturparks messbar gemacht.

57 Das Bundesprogramms »Blaues Band Deutschland« ist eine gemeinsame Initiative von Bundesverkehrsministerium (BMVI) und Bundesumweltministerium (BMU) zur Renaturierung von Flüssen und Auen. Angestrebt wird die Wiederherstellung von Lebensräumen für die Tier- und Pflanzenwelt und die Erhöhung des Freizeit- und Erholungswerts von Flusslandschaften.

58 Die Gebiete entlang des ehemaligen innerdeutschen Grenzstreifens waren über Jahrzehnte von jeder Nutzung ausgeschlossen und zeichnen sich durch einen besonderen Reichtum an gefährdeten Arten und Lebensräumen aus. Als »Grünes Band« wirken sie als national bedeutender Biotopverbund. Im November 2005 wurde das »Grüne Band« als Nationales Naturerbe eingestuft und 2007 in der Nationalen Strategie zur Erhaltung der biologischen Vielfalt der Bundesregierung (NBS) als Leuchtturmprojekt hervorgehoben.

Auch außerhalb von Schutzgebieten können Regionen, die noch relativ unberührt von Lichtverschmutzung sind, als Nachtschutzgebiete erhalten werden. Dies kann auch als positiver Standortfaktor und als Komponente für Naturtourismus in ländlichen lichtarmen Regionen genutzt werden.

Steuerungsinstrumente, aber auch Empfehlungen auf Bundes- und Landesebene können Kommunen in ihrer lokalen Beleuchtungsplanung entlasten, indem sie eine wichtige Orientierung bieten. So könnte u.a. durch die Erarbeitung eines bundesweiten Leitfadens mit einer integrierten Perspektive auf Außenbeleuchtung Planungsprozesse informiert und harmonisiert werden.

Das gilt insbesondere für den Aufbau und Betrieb von Straßenbeleuchtung, wo aus Ermangelung an gesetzlichen Regelungen meist Industrienormen herangezogen werden. Hier ist es einerseits bedenkenswert, die bislang unbeachteten Belange von Außenbeleuchtung, wie die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, die Ökologie, den Klimaschutz, das Stadtbild etc. bei der Normbildung stärker zu berücksichtigen. Andererseits könnte eine Klärung, unter welchen Kriterien die Verkehrssicherungspflicht durch die Norm definiert wird und ob sich durch die Rechtsprechung tatsächlich eine (implizite) Notwendigkeit zur Heranziehung der Norm ergibt, Kommunen mehr Planungssicherheit gegeben werden.

Fördermöglichkeiten bei der energetischen Sanierung der Straßenbeleuchtung bestehen bereits, Aspekte der Lichtverschmutzung könnten vergleichsweise leicht in den Katalog der Förderkriterien aufgenommen werden. Auch im Rahmen der Städtebauförderung von Bund und Ländern können positive Anreize zu einem nachhaltigen Umgang mit Außenbeleuchtung gesetzt werden. Hier bestehen große Potenziale, den Aspekt der Lichtverschmutzung künftig stärker einzubinden und zur Nebenauflage für die ohnehin stattfindende und auf vielfältigen Wegen unterstützte Modernisierung der öffentlichen Beleuchtung aufzuwerten.

Die Reduzierung bzw. Vermeidung von Lichtverschmutzung spielt explizit in der Kommunalrichtlinie im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative eine relevante Rolle. Seit 2019 werden hier nur Beleuchtungsanlagen mit Regelungs- und Steuerungstechnik gefördert, die entweder eine zeit- oder präsenzabhängige Beleuchtung ermöglichen, oder über eine Technik zur adaptiven Nutzung der Beleuchtung, d.h. zur Anpassung an unterschiedliche Verkehrsdichten und Witterungsbedingungen, verfügen. Dadurch können Beleuchtungsdauer und -niveau an das tatsächliche Verkehrsaufkommen vor Ort angepasst und die Lichtimmissionen reduziert werden. Diese Fördermaßnahme sollte noch stärker bekannt gemacht und eingesetzt werden.

Zusammengefasst bieten sich die folgenden Handlungsoptionen zur Effektivierung der Steuerungsmöglichkeiten für Lichtverschmutzung:

- Integration von Lichtemissionsschutz in bereits existierende formelle Planungs- und Steuerungsinstrumente mit Bemessungsgrundlagen;
- Prüfung der Möglichkeit eigenständiger Regelungen zur Begrenzung der Lichtverschmutzung, bspw. eines Lichtverschmutzungsgesetzes;
- Etablierung von Mess- und Monitoringsystemen zur Überwachung der Entwicklung der Lichtverschmutzung;
- Bereitstellung von Orientierungshilfen zum Thema für Länder und Kommunen zur Beseitigung planerischer und rechtlicher Unsicherheiten (u. a. hinsichtlich des Umgangs mit Industrienormen);
- Entwicklung und Umsetzung von Beleuchtungsrichtlinien zur Minimierung der Lichtverschmutzung für bundeseigene Gebäude und Anlagen;
- Einrichtung von Förderprogrammen für nachhaltige Beleuchtung, beispielsweise für die Entwicklung integrierter lokaler und regionaler Lichtkonzepte.

5.2 Erhöhung des Bewusstseins für Lichtverschmutzung

Ein Problembewusstsein über die negativen Nebenwirkungen der zunehmenden Außenbeleuchtung ist weder in der Gesellschaft noch in der Licht- und Beleuchtungsbranche etabliert (Krause et al. 2014a; Schulte-Römer et al. 2018). Daher bietet es sich an, das bestehende Wissen zu dem Thema an professionelle Lichtplanerinnen und -planer, als auch ihre privaten und öffentlichen Klienten und Auftraggeber zu vermitteln, d. h. sowohl Zivilgesellschaft als auch Unternehmen, und an die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von Behörden und Ämter weiter zu vermitteln, die Entscheidungen über öffentliche Beleuchtung treffen. Dabei zeigen sich problembewusste Expertinnen und Experten zuversichtlich, dass technische und gestalterische Mittel zur Reduzierung von Lichtverschmutzung bereits zur Verfügung stehen. Die Umsetzung scheitert also weniger an den lichttechnischen Mitteln und dem in der Lichtbranche verfügbaren Wissen, sondern eher daran, dass professionelle Lichtplanung und -gestaltung in Bauvorhaben, wenn überhaupt, dann oft erst in späteren Projektphasen beauftragt wird.

Positive Assoziation von Sicherheit, Wohlstand und Fortschritt in Bezug auf Licht konfligieren mit dem Schutz der Dunkelheit. Bei Entscheidungsträgern stehen bei künstlicher Beleuchtung im Außenbereich zudem oftmals finanzielle Aspekte und auch CO_2-Einsparmöglichkeiten im Vordergrund. Die Assoziation, dass weniger Beleuchtung weniger Sicherheit, mehr Kriminalität und eingeschränkte Mobilität bedeutet, ist auch in der öffentlichen Wahrnehmung weit verbreitet (Green et al. 2015). Daher ist es wichtig zu vermitteln, dass eine Minimierung der Lichtverschmutzung nicht das Ziel hat, auf künstliche

Beleuchtung zu verzichten, sondern sie sinnvoll(er) einzusetzen und ggf. experimentelle oder Erfahrungsräume zu schaffen, in denen der oft selbstverständlich vorausgesetzte Zusammenhang zwischen Licht und Sicherheitsgefühl empirisch überprüft, individuell getestet und gesellschaftlich hinterfragt werden kann (Edensor 2017).

Bei der Betrachtung der bestehenden Öffentlichkeitsarbeit und Beratung zum Thema Lichtverschmutzung in Deutschland fällt auf, dass viele Initiativen »bottom up« entstanden sind und auf einzelne handelnde Personen und Gruppen zurückgehen. Besonders auf kommunaler Ebene werden Pioniervorhaben durch einzelne Vorreiter angestoßen. Es kann gelingen, dadurch auch die regionale Ebene zu erfassen, wie die Schaffung der Nachtschutzgebiete in der Rhön und im Westhavelland zeigt. Die Erarbeitung kommunaler Lichtkonzepte unter Beteiligung der Öffentlichkeit bietet einen guten Startpunkt, um Bewusstseinsbildung im Umgang mit künstlicher Beleuchtung voranzutreiben und sowohl die öffentliche als auch private Beleuchtungspraxis zu beeinflussen.

Der Umgang der öffentlichen Hand mit dem Thema Beleuchtung und Lichtverschmutzung besitzt dabei besondere Bedeutung. Zum einen werden dadurch (informelle) Standards in Lichtnutzung und Beleuchtungsmanagement gesetzt. Zum anderen ist die Sensibilisierung der Mitarbeiter in den Verwaltungen wesentlich, um bestehende Entscheidungsspielräume im Hinblick auf eine Minimierung der Lichtverschmutzung auch zu nutzen.

Handlungsmöglichkeiten zu einer Bewusstseinsbildung bestehen in der Ausgestaltung und Förderung von Fort- und Weiterbildungen, der Etablierung einer industrieunabhängigen Lichtberatung und der Erstellung von Leitfäden sowie Handreichungen, der Sensibilisierung und Motivation von Entscheidungsträgern und Verwaltungen durch Kommunikation von Best-Practice-Beispielen, der Durchführung von Medienkampagnen und Aktionen in den sozialen Netzwerken sowie die Förderung von nachhaltigem Tourismus inklusive Astrotourismus für ein Erleben natürlicher Dunkelheit (Kuechly et al. 2018).

Anzustreben ist eine stärkere Einbindung des Themas in bestehende Lichtdesignstudiengänge durch Entwicklung entsprechender Lehrkonzepte. Für Handwerksbetriebe können Informationen über die Industrie- und Handelskammern oder auf Messen bereitgestellt werden.

Schließlich bietet die Errichtung von Beleuchtungsmusterstrecken eine gute Gelegenheit für die aktive Beteiligung der Öffentlichkeit. In einer Umfrage mit über 200 Experten für Licht und Lichtverschmutzung war die Förderung von Vorzeigeprojekten mit 95 % die meistempfohlene Maßnahme zur Reduktion von Lichtverschmutzung (Schulte-Römer et al. 2018). Aktuelle Beispiele sind die Waldstraße in Berlin (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2016) oder die Anwohnerbeteiligung in Chemnitz (Stadt Chemnitz 2016). Auch der lokale Energieversorger RhönEnergie hat auf seinem Betriebsgelände in Fulda Muster von warmweißen und gelben voll abgeschirmten LED-

Leuchten installiert, um einen realen Eindruck verschiedener Beleuchtungslösungen vermitteln zu können (Abb. 5.1).

Abb. 5.1 Musterstraße der RhönEnergie in Fulda

Foto: A. Hänel

5.3 Förderung von wissenschaftlicher Forschung zu den Wirkungen von Lichtverschmutzung

5.3.1 Forschungen zu Ausmaß und Gründen zunehmender Beleuchtung

Die Ursachen der gängigen Praxis der Lichtnutzung und ihre unterschiedlichen nationalen und regionalen Ausprägungen sind noch wenig untersucht, ebenso ist kaum abzusehen, welche Veränderungen die aktuelle Umrüstung und neue Technologien mit sich bringen. Wie wirken sich z. B. bedarfsgerechtes Licht, Dimmung, farbige und blinkende Lichtquellen auf Mensch und Natur aus? Welche Konflikte entstehen durch die unterschiedlichen lichtbezogenen Sichtweisen und Interessen, und welche Handlungsbedarfe ergeben sich daraus? Wie wird Licht wahrgenommen? Wann, wo und zu welchen Zwecken kommt es zu einer Zu- oder einer Abnahme an Lichtemissionen? Und wie verändert sich die künstliche Beleuchtung innerhalb einer Nacht, Jahreszeit, Jahr, welche regionalen und nationalen Unterschiede gibt es hierbei?

Um die nächtliche Dunkelheit zu schützen, kommt es darauf an, künstliches Licht auf ein nötiges Minimum zu reduzieren. Das heißt, es gilt situations- und funktionsbezogen zu klären, was angemessene Beleuchtung ist, und es sind entsprechende Grenzwerte zu definieren. Dazu ist es notwendig, zwischen den gesellschaftlichen und ökologischen Kosten einerseits und den vielfältigen Nutzen der Beleuchtung andererseits abzuwägen. Wissen und Positionen aus unterschiedlichen Disziplinen und Zugängen sind dabei einzubeziehen. Dies beinhaltet, die Kausalitäten zwischen der Vielfalt der Nutzung und der Wirkung von Licht im Außenbereich (Ordnungs-, Werbe-, Fest-, Wohn- und Arbeitslicht) und die mit seiner Nutzung verbundenen sozialen, psychologischen, kulturellen sowie ökologischen Auswirkungen auf den Menschen und seine Umwelt besser zu verstehen. Um dies zu erreichen, ist nicht nur weitere Grundlagenforschung notwendig, sondern auch die kritische Überprüfung der Belastbarkeit der Evidenz der heute gängigen Beleuchtungspraxis: Auf welcher wissenschaftlichen Grundlage werden künstliche Beleuchtung und Lichttechnik geplant und sind diese heute noch angemessen?

Um die Lichtverschmutzung zu reduzieren und zu begrenzen, sind Kenntnisse der räumlichen und zeitlichen Nutzung der Beleuchtung und die Verteilung der Lichtemissionen unerlässlich. Ausmaß und Trends der Nutzung von Außenbeleuchtung können mithilfe der Fernerkundung und durch Messungen am Boden untersucht werden. Die Satellitenfernerkundung im optischen Bereich konzentriert sich bisher stark auf Tageslichtaufnahmen. Die nächtliche Erderkundung wurde bisher weniger berücksichtigt. Wichtige Herausforderungen für die Weiterentwicklung stellen die Erweiterung der Satellitensensoren in den blauen Wellenlängenbereich, die Erstellung von multispektralen Aufnahmen sowie eine höhere zeitliche und räumliche Auflösung und Kalibrierung der Sensoren dar.

Bei den weiteren wichtigen Messmethoden am Boden, wie vertikale und Fischaugenfotografien sowie Messungen der Himmelshelligkeit, muss die Kalibrierung weiter vorangetrieben werden. Der Vergleich mit Luft- und Lärmmessnetzen legt nahe, auch für die Lichtverschmutzung ein weitreichendes Monitoringnetz aufzubauen. Klimastationen können die Informationen zur Lichtverschmutzung bereichern, z. B. um die Auswirkungen von Bewölkung auf die Himmelshelligkeit quantifizieren zu können. Weiterhin sind diese Daten auch wichtige Eingangsgrößen bei der Modellierung von Lichtemissionen. Ganz allgemein fehlen noch Software für die Bildanalyse der Nachtbildaufnahmen und standardisierte Verfahren, um zukünftige Beleuchtungsszenarien evaluieren zu können.

5.3.2 Forschungen zu humanmedizinischen Wirkungen

Die humanmedizinische Forschung beschäftigt sich schon länger mit den negativen Effekten künstlicher Beleuchtung in der Nacht für den Hormonhaushalt und die zirkadiane Rhythmik. Entsprechend liegen zahlreiche Forschungsarbeiten vor, die allerdings im Hinblick auf die Untersuchung der Folgen von Schichtarbeit entstanden sind und sich ganz überwiegend auf Beleuchtung in Innenräumen beziehen. Sie sind insofern nur bedingt auf die Folgen von Lichtverschmutzung als ungewollter Nebeneffekt künstlicher Beleuchtung im Außenbereich zu übertragen.

Zwar werden aufgrund der bekannten humanmedizinischen Folgen künstlicher Beleuchtung auch Hypothesen zu den Wirkungen von Lichtverschmutzung formuliert und mit Satellitendaten zur Lichtbelastung und statistischen Häufigkeiten von Krankheiten überprüft. Allerdings werden durch solche Forschungsansätze nur statistische Regressionen nachgewiesen. Ob und inwieweit auch eine Kausalität zwischen Lichtverschmutzung und erhöhtem Krankheitsrisiko vorliegt, lässt sich über diese Ansätze nicht nachweisen. Es werden also Forschungen benötigt, mit denen die individuelle Lichtexposition (insbesondere eben durch künstliches Licht im Außenbereich und davon gesondert der Teil der Lichtverschmutzung) und weitere individuelle Risikofaktoren erfasst und dann mit dem Krankheitsrisiko verglichen werden, um gesicherte Aussagen über humanmedizinischen Wirkungen von Lichtverschmutzung zu ziehen. Im Einzelnen lassen sich die folgenden wesentlichen Wissenslücken und Forschungsbedarfe auflisten (Kantermann 2018):

- Es liegen keine ausreichenden Daten darüber vor, in welchem Ausmaß einzelne Personen von Lichtverschmutzung betroffen sind/waren. Individuelle Expositionserhebungen bezüglich Lichtverschmutzung im Außenraum fehlen.
- Es fehlen Erkenntnisse darüber, wie viel Lichtverschmutzung im Außenraum zu den allgemeinen Beleuchtungsverhältnissen im Innenraum beiträgt. Hierzu müsste zudem untersucht werden, durch welche Einflussvariablen das Ausmaß an Lichtverschmutzung im Innenraum beeinflusst wird mit z. B. der Lage des Hauses oder der Wohnung bzw. des Stockwerk/der Etage des z. B. Schlafzimmers, Anzahl und Ausrichtung der Fenster, Art der Fensterverdunklung sowie deren Verwendung (wird verdunkelt: ja/nein; falls ja: wie intensiv) und der Bebauung der Umgebung.
- Es fehlen validierte Erhebungsmethoden, wie z. B. Messgeräte, sowie ein Konsens hinsichtlich valider Messgrößen (vor allem bezüglich spektraler Verteilung sowie Beleuchtungsintensität), um die nichtvisuelle Wirkung von Licht auf Menschen zu erfassen.

- Faktoren, die eine Wirkung von Licht auf den Menschen modulieren können, sind in bisherigen Arbeiten oftmals nicht ausreichend berücksichtigt worden. Zu diesen Faktoren zählen z. B.:
  - Höhe der Anteile kurzwelliger Bereiche (blaues Licht);
  - Lichtintensität idealerweise gemessen am Auge;
  - Dauer der Gesamtexposition gegenüber Lichtverschmutzung für idealerweise alle Wohn- bzw. Aufenthaltsorte einer Person und mögliche Sättigungserscheinungen im Hinblick auf die nichtvisuelle Wirkung von Licht;
  - Lichthistorie, also die Lichtexposition über 24 Stunden hinweg zusätzlich zu der Exposition gegenüber Licht bei Nacht allein;
  - demografische Angaben, wie Alter und Geschlecht, sowie Angaben zu Lebensgewohnheiten, wie z. B. Rauchen, Alkoholkonsum;
  - eindeutige Unterscheidung zwischen Schicht-, Nacht- und Tagarbeit.

5.3.3 Forschungen zu ökologischen Wirkungen

Noch sehr wenig verstanden sind auch die ökologischen Wirkungen der Lichtverschmutzung, insbesondere langfristige Folgen und Wirkungen für Populationen und über einzelne Arten hinaus.

Zwar liegen für einige gut untersuchte Arten Studien über die Wirkung künstlicher Beleuchtung vor, in denen die ausgesuchten Folgen (z. B. hormonelle Folgen und Verschiebung zirkadianer und saisonaler Rhythmen) beschrieben werden. Allerdings fehlt Wissen über die Auswirkungen dieser Folgen für das ökosystemare Zusammenspiel verschiedener Arten in Biotopen, Nahrungsnetzen oder Landschaften und im Hinblick auf Leistungen des Naturhaushalts für den Menschen. Unklar ist oftmals, wie anpassungsfähig Arten langfristig sind, d. h., ob bestimmte Folgen reversibel sind bzw. welche Folgen aus dieser Anpassung im ökoystemaren Zusammenspiel resultieren. Zudem ist unklar, welche Bedeutung die Lichtverschmutzung als Risikofaktor neben anderen Belastungen (Urbanisierung, Landschaftszerschneidung, Nährstoff- und Biozideinträge, Klimawandel, Veränderungen in der Artenzusammensetzung etc.) hat oder wie das Zusammenspiel einzelner Lichtverschmutzungsquellen (z. B. Straßen- und Fahrzeugbeleuchtung) die ökologischen Wirkungen verändert.

Solche Fragen sind nur mit langfristigen Forschungen und in aufwendig einzurichtenden Experimentalstrukturen (Kap. 3.3.2) zu benennen. Im Aufbau und Betrieb solcher Experimentalstrukturen könnte ein Schwerpunkt zukünftiger Forschungsförderung liegen. Die Auswirkungen von künstlichem Licht auf Ökosysteme und die biologische Vielfalt sind immer noch wenig bekannt. Daher sind sorgfältig konzipierte Experimente notwendig, um die genauen Auswirkungen von künstlichem Licht sowohl auf Organismen als auch auf Ökosysteme zu untersuchen. Es muss geklärt werden, welches Licht in welcher Inten-

sität und in welcher spektralen Verteilung sich negativ auf welche Lebewesen, in welchen räumlichen und zeitlichen Zusammenhängen auswirkt. Nur durch Experimente auf Ökosystemebene lässt sich beurteilen, ob künstliches Licht in der Nacht erstens die biologische Vielfalt von Gewässerökosystemen bedroht, zweitens die Nahrungsnetzdynamik beeinflusst und drittens Auswirkungen auf die Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Lebensräumen hat.

Darüber hinaus stellen sich noch viele weitere konkrete Fragen, für deren Beantwortung entsprechende Forschungsvorhaben benötigt werden (Schroer/Hölker 2018):

- Noch immer ist nicht hinreichend geklärt, warum Insekten in so hohem Maße von Licht angezogen werden. Wie können Adaptationseffekte begünstigt werden? Welche Auswirkungen hat das auf sensiblere Arten? Welche Rolle spielt Lichtverschmutzung für das Insektensterben im Verhältnis zu anderen Belastungen?
- Wissenslücken bestehen auch hinsichtlich der Auswirkungen künstlicher nächtlicher Beleuchtung auf Gewässer und aquatische Ökosysteme. Welche Taxa werden durch welche Form von Lichtimmissionen (Skyglow, direkte Beleuchtung) wie stark beeinträchtigt? Wie hoch ist der Einfluss auf die (aquatische, aber auch ufernahe terrestrische) Biodiversität und damit in Zusammenhang stehende Ökosystemfunktionen und Leistungen des Naturhaushalts für den Menschen?
- Es müssen die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Raum- und Zeitskalen untersucht werden, um ein optimales Nachtmanagement für unterschiedliche Landschaften und Habitatstrukturen wie Grünflächen, Uferzonen, Innenstädte, Wohngebiete etc., aber auch für sicherheitsbefeuerte Bauwerke, z. B. Windkraftanlagen, Hochspannungsmasten, Schornsteine, Industrieanlagen oder Mobilfunkmasten, zu unterschiedlichen Jahreszeiten entwickeln zu können.

6 Literatur

6.1 In Auftrag gegebene Gutachten

Kuechly, H.; Meier, J.; Kyba, C.; Hänel, A. (2017): Ausmaß der Lichtverschmutzung und Optionen zur Minderung der negativen Auswirkungen. LUP – Luftbild Umwelt Planung GmbH, Potsdam

Schroer, S.; Hölker, F. (2017): Auswirkung der Lichtverschmutzung auf Fauna und Flora. IGB – Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin

6.2 Weitere Literatur

Abrahamson, E.; Leak, R.; Moore, R. (2001): The suprachiasmatic nucleus projects to posterior hypothalamic arousal systems. In: Neuroreport 12, S. 435–440

Akerstedt, T. (2003): Shift work and disturbed sleep/wakefulness. In: Occupational Medicine 53(2), S. 89–94

Albrecht, U. (2013): Circadian clocks and mood-related behaviors. In: Handbook of Experimental Pharmacology 217, S. 227–239

Appelt, S. (2017): Touched by light. In: International Journal of Sustainable Lighting 19, S. 36–47

Archer, S.; Oster, H. (2015): How sleep and wakefulness influence circadian rhythmicity: effects of insufficient and mistimed sleep on the animal and human transcriptome. In: Journal of sleep research 24, S. 476–493

Arendt, J. (2005): Melatonin: characteristics, concerns, and prospects. In: Journal of Biological Rhythms 20(4), S. 291–303

Arnao, M.; Hernández-Ruiz, J. (2006): The physiological function of melatonin in plants. In: Plant signaling & behavior 1(3), S. 89–95

Arnold, G.; Burke, M.; Power, G. (2012): A Win-Win-Win for Municipal Street Lighting: Converting Two-Thirds of Vermont's Street Lights to LED by 2014. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, https://aceee.org/files/proceedings/2012/data/papers/0193-000144.pdf (20.2.2020)

ASR (Ausschuss für Arbeitsstätten) (2014): Technische Regeln für Arbeitsstätten – Beleuchtung – ASR A3.4. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Arbeitsstaetten/ASR/pdf/ASR-A3-4.pdf?__blob=publicationFile (20.2.2020)

Aubé, M. (2015): Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences 370(1667), doi: 10.1098/rstb.2014.0117

Aubé, M.; Kocifaj, M. (2012): Using two light-pollution models to investigate artificial sky radiances at Canary Islands observatories. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 422(1), S. 819–830

Aubrecht, T.; Weil, Z.; Nelson, R. (2014): Dim light at night interferes with the development of the short-day phenotype and impairs cell-mediated immunity in Siberian hamsters (Phodopus sungorus). In: Journal of Experimental Zoology 321(8), S. 450–456

Auer, G. (2007): Meta Dekor. In: Die alte Stadt 34, S. 55–67
Azam, C.; Kerbiriou, C.; Vernet, A.; Julien, J.; Bas, Y.; Plichard, L.; Maratrat, J.; Le Viol, I. (2015): Is part-night lighting an effective measure to limit the impacts of artificial lighting on bats? In: Global Change Biology 21(12), S. 4333–4341
Azam, C.; Le Viol, I.; Julien, J.-F.; Bas, Y.; Kerbiriou, C. (2016): Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program. In: Landscape Ecology 31, S. 2471–2483
Bach, S.; Degenring, F. (2015): Dark Nights, Bright Lights: Night, Darkness, and Illumination in Literature. Berlin/Boston
Baddiley, C.; Webster, T. (2007): Towards understanding skyglow: a contribution to the discussion. British Astronomical Association Campaign for Dark Skies/ Institution of Lighting Engineer. Dorset/Rugby
BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2017): Vollzugshilfe Lichtemissionen (Entwurf zur Konsultation). Bern, www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/elektrosmog/fachinfo-daten/vollzugshilfe-lichtemissionen-konsultationsentwurf.pdf.download.pdf/Vollzugshilfe-Lichtemissionen-Konsultationsentwurf-vom-12-04-2017.pdf (20.2.2020)
Baker, B.; Richardson, J. (2006): The effect of artificial light on male breeding-season behaviour in green frogs, Rana clamitans melanota. In: Canadian Journal of Zoology 84(10), S. 1528–1532
Banks, S.; Van Dongen, H.; Maislin, G.; Dinges, D. (2010): Neurobehavioral dynamics following chronic sleep restriction: dose-response effects of one night for recovery. In: Sleep 33(8), S. 1013–1026
Bará, S.; Rodríguez-Arós, Á.; Pérez, M.; Tosar, B.; Lima, R.; de Miguel, A.; Zamorano, J. (2017): Estimating the relative contribution of streetlights, vehicles and residential lighting to the urban night sky brightness. In: Lighting Research and Technology 51, S. 1092–1107
Barroso, A.; Haifig, I.; Janei, V.; da Silva, I.; Dietrich, C.; Costa-Leonardo, A. (2017): Effects of flickering light on the attraction of nocturnal insects. In: Lighting Research Technology 49, S. 100–110
Bauer, S.; Wagner, S.; Burch, J.; Bayakly, R.; Vena, J. (2013): A case-referent study: light at night and breast cancer risk in Georgia. In: International Journal of Health Geographics 12, doi: 10.1186/1476-072X-12-23
Bayarri, M.; Madrid, J.; Sánchez-Vázquez, F. (2002): Influence of light intensity, spectrum and orientation on sea bass plasma and ocular melatonin. In: Journal of Pineal Research 32(1), S. 34–40
Becker, A.; Whitfield, A.; Cowley, P.; Järnegren, J.; Næsje, T. (2013): Potential effects of artificial light associated with anthropogenic infrastructure on the abundance and foraging behaviour of estuary-associated fishes. In: Journal of Applied Ecology 50, S. 43–50
Bedrosian, T.; Fonken, L.; Walton, J.; Haim, A.; Nelson, R. (2011): Dim light at night provokes depression-like behaviors and reduces CA1 dendritic spine density in female hamsters. In: Psychoneuroendocrinology 36(7), S. 1062–1069
Bedrosian, T.; Vaughn, C.; Galan, A.; Daye, G.; Weil, Z.; Nelson, R. (2013): Nocturnal Light Exposure Impairs Affective Responses in a Wavelength-Dependent Manner. In: Journal of Neuroscience 33(32), S. 13081–13087
Ben Ammar, I.; Teletchea, F.; Milla, S.; Ndiaye, W.; Ledoré, Y.; Missaoui, H.; Fontaine, P. (2015): Continuous lighting inhibits the onset of reproductive cycle in

pikeperch males and females. In: Fish Physiology and Biochemistry 41(2), S. 345–356

Bengsen, A.; Leung, L.; Lapidge, S.; Gordon, I. (2010): Artificial illumination reduces bait-take by small rainforest mammals. In: Applied Animal Behaviour Science 127(1–2), S. 66–72

Bennie, J.; Davies, T.; Cruse, D.; Inger, R.; Gaston, K. (2015): Cascading effects of artificial light at night: resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences 370(1667), doi: 10.1098/rstb.2014.0131

von Bergen, S. (2015): Schöne, geheimnisvolle Dunkelheit. Berner Zeitung, 1.11.2015, https://www.bernerzeitung.ch/kultur/buecher/die-nacht-ist-die-zeit-der-zuneigung-und-der-privaten-freiheit/story/13010867?track (17.2.2020)

Besecke, A.; Hänsch, R. (2015): Residents' perceptions of light and darkness. In: Meier et al. (2015), S. 224–248

Beyer, F.; Ker, K. (2009): Street lighting for preventing road traffic injuries. In: Cochrane Database of Systematic Reviews 1, doi: 10.1002/14651858.CD004728.pub2

Bille, M. (2019): Homely Atmospheres and Lighting Technologies in Denmark: Living with Light. London/New York

Binder, B. (1999): Elektrifizierung als Vision – zur Symbolgeschichte einer Technik im Alltag. Tübinger Vereinigung für Volkskunde. Tübingen

Birriel, J.; Walker, C.; Thornsberry, C. (2014): Analysis of Seven Years of Globe at Night Data. In: Journal of the American Association of Variable Star Observers 42, S. 219–228

Blair, A. (2017): An Exploration of the Role that the Night Sky Plays in the Lives of the Dark Sky Island Community of Sark. In: Journal of Skyscape Archaeology 3, doi: 10.1558/jsa.34689

Blask, D.; Dauchy, R.; Dauchy, E.; Mao, L.; Hill, S.; Greene, M.; Belancio, V.; Sauer, L.; 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), doi: 10.1371/journal.pone.0102776

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2019): Klimaschutz in neuem Licht. Die LED-Leitmarktinitiative: Innovation für Kommunen und Wirtschaft. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/nki_klimaschutz_im_neuen_licht_bf.pdf. (20.2.2020)

BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit) (2017): Klima und Kasse mit LED-Lampen entlasten: Bundesumweltministerium bilanziert LED-Leitmarktinitiative. Pressemitteilung Nr. 064/17, www.bmub.bund.de/N54013/ (20.2.2020)

Bodenhaupt, F. (2019): Beleuchtungspflicht: Stellungnahme des Versicherungsverbandes 1995. www.strassenbeleuchtung.de/index.php/technik/42-sonstiges/220-beleuchtungspflicht (20.2.2020)

Bogard, P. (2013): The end of night: searching for natural darkness in an age of artificial light. London

Böhme, H. (1997): Das Licht als Medium der Kunst – Über Erfahrungsarmut und ästhetisches Gegenlicht in der technischen Zivilisation. In: Schwarz, M. (Hg.): Licht, Farbe, Raum. Künstlerisch-wissenschaftliches Symposium. Braunschweig, S. 111–137

Boldogh, S.; Dobrosi, D.; Samu, P. (2007): The effects of the illumination of buildings on house-dwelling bats and its conservation consequences. In: Acta Chiropterologica 9, S. 527–534

van Bommel, W. (2015): Road Lighting: Fundamentals, Technology and Application. Cham

Boomsma, C.; Steg, L. (2014): Feeling safe in the dark: examining the effect of entrapment, lighting levels, and gender on feelings of safety and lighting policy acceptability. In: Environment and Behavior 46, S. 193–212

Böttcher, M. (2001): Auswirkungen von Fremdlicht auf die Fauna im Rahmen von Eingriffen in Natur und Landschaft. In: Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz 67, S. 1–190

Bowden, A. (2017): Copenhagen's latest cycling safety measure – smart street lights that brighten as you approach. http://road.cc/content/news/215736-copenhagens-latest-cycling-safety-measure-–-smart-street-lights-brighten-you (20.2.2020)

BR (Bayerischer Rundfunk) (2019): Wie andere Bundesländer gegen Lichtverschmutzung vorgehen. Onlinebericht, 29.4.2019, https://www.br.de/nachrichten/deutschland-welt/wie-andere-bundeslaender-gegen-lichtverschmutzungvorgehen,RP2SpfL (20.2.2020)

Brainard, G.; Hanifin, J.; Greeson, J.; Byrne, B.; Glickman, G.; Gerner, E.; Rollag, M. (2001): Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. In: The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience 21, S. 6405–6412

Brandi, U.; Geissmar-Brandi, C. (2006): Licht für Städte: Ein Leitfaden zur Lichtplanung im urbanen Raum. Basel

Brons, J.; Bullough, J.; Rea, M. (2008): Outdoor site-lighting performance: A comprehensive and quantitative framework for assessing light pollution. In: Lighting Research & Technology 40, S. 201–224

Brox, J. (2010): Brilliant: The evolution of artificial light. Bosten/New York

Brüning, A.; Hölker, F. (2015): Künstliches Licht an Gewässern – Auswirkungen und Lösungsansätze. In: Fauna Focus 24, S. 1–12

Brüning, A.; Hölker, F.; Franke, S.; Kleiner, W.; Kloas, W. (2016): Impact of different colours of artificial light at night on melatonin rhythm and gene expression of gonadotropins in European perch. In: Science of The Total Environment 543, S. 214–222

Brüning, A.; Hölker, F.; Franke, S.; Kleiner, W.; Kloas, W. (2017): Influence of light intensity and spectral composition of artificial light at night on melatonin rhythm and mRNA expression of gonadotropins in roach Rutilus rutilus. In: Fish Physiology and Biochemestry 44(1), S. 1–12

Brüning, A.; Hölker, F.; Franke, S.; Preuer, T.; Kloas, W. (2015): Spotlight on fish: Light pollution affects circadian rhythms of European perch but does not cause stress. In: Science of the Total Environment 511, S. 516–522

Brüning, A.; Hölker, F.; Wolter, C. (2011): Artificial light at night: implications for early life stages development in four temperate freshwater fish species. In: Aquatic Sciences 73, S. 143–152

Buchanan, B. (1998): Low-illumination prey detection by Squirrel Treefrogs. In: Journal of Herpetology 32, S. 270–274

Buchanan, B. (2006): Observed and potential effects of artificial night lighting on anuran amphibians. In: Rich, C.; Longcore, T. (Hg.): Ecological Consequences of Artificial Night Lighting. Washington, D.C., S. 192–220

Bukalev, A.; Vinogradova, I.; Zabezhinskii, M.; Semenchenko, A.; Anisimov, V. (2013): Light pollution increases morbidity and mortality rate from different causes in female rats. In: Advances in Gerontology 3, S. 180–188

Bullough, J.; Rea, M.; Figueiro, M. (2006): Of mice and women: light as a circadian stimulus in breast cancer research. In: Cancer Causes Control 17, S. 375–383

Bundesregierung (2015): Lichtverschmutzung. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Sylvia Kotting-Uhl, Peter Meiwald, Steffi Lemke, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 18/4853 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 18/4996, Berlin

Bundesregierung (2018): Auswirkungen der Lichtverschmutzung. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Judith Skudelny, Frank Ritta, Renata Alt, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/6259 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 19/6674, Berlin

BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN (2015): Lichtverschmutzung. Kleine Anfrage der Abgeordneten Sylvie Kotting-Uhl, Peter Meiwald, Steffi Lemke, Annalena Baerbock, Bärbel Höhn, Oliver Krischer, Christian Kühn (Tübingen), Dr. Julia Verlinden und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN. Deutscher Bundestag, Drucksache 18/4853, Berlin

Burgess, H.; Molina, T. (2014): Home lighting before usual bedtime impacts circadian timing: a field study. In: Photochemistry and photobiology 90, S. 723–726

Cajochen, C.; Frey, S.; Anders, D.; Späti, J.; Bues, M.; Pross, A.; Mager, R.; Wirz-Justice, A.; Stefani, O. (2011): Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. In: Journal of applied physiology 110, S. 1432–1438

Cajochen, C.; Münch, M.; Kobialka, S.; Krauchi, K.; Steiner, R.; Oelhafen, P.; Orgul, S.; Wirz-Justice, A. (2005): High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. In: The Journal of clinical endocrinology and metabolism 90, S. 1311–1316

Carazo, I.; Norambuena, F.; Oliveira, C.; Sánchez-Vázquez, F.; Duncan, N. (2013): The effect of night illumination, red and infrared light, on locomotor activity, behaviour and melatonin of Senegalese sole (Solea senegalensis) broodstock. In: Physiology and Behavior 118, S. 201–207

Cardwell, D. (2014): Copenhagen Lighting the Way to Greener More Efficient Cities, The New York Times, 8.12.2014, https://www.nytimes.com/2014/12/09/business/energy-environment/copenhagen-lighting-the-way-to-greener-more-efficient-cities.html (20.2.2020)

Carl Zeiss Vision GmbH (2015): Studie: LED- und Xenon-Scheinwerfer blenden Deutschlands Autofahrer. Aalen, https://www.zeiss.de/vision-care/ueber-uns/newsroom/news-overview/2015/zeiss-makes-car-driving-safer.html (17.2.2020)

Cathey, H.; Campbell, L. (1975): Security lighting and its impact on the landscape. In: Journal of Arboriculture 1, S. 181–187

Centre for Strategy & Evaluation Services (2013): Final Report: Enhancing the Competitiveness of Tourism in the EU. An Evaluation Approach to Establishing 20 Cases of Innovation and Good Practice Annex B – Good Practice Cases. Kent, https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/21053b77-a08e-431c-a00e-1ba49612e2b9/language-en/format-PDF/source-search (20.2.2020)

Chaney, W. (2002): Does Night Lighting Harm Trees? In: Forestry and Natural Resources FAQ 17, S. 1–4

Chang, A.; Aeschbach, D.; Duffy, J.; Czeisler, C. (2015): Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 112, S. 1232–1237

Chang, A.; Scheer, F.; Czeisler, C. (2011): The human circadian system adapts to prior photic history. In: The Journal of physiology 589, S. 1095–1102

Chang, A.; Scheer, F.; Czeisler, C.; Aeschbach, D. (2013): Direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans depend on prior light history. In: Sleep 36, S. 1239–1246

Choi, H.; Kim, H.; Kim, J. (2009): Landscape Analysis of the Effects of Artificial Lighting around Wetland Habitats on the Giant Water Bug Lethocerus deyrollei in Jeju Island. In: Journal of Ecology and Field Biology 32, S. 83–86

CIE (Commission Internationale de L'Eclairage on Illumination) (2017): Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations. CIE 150:2017, Wien, http://www.cie.co.at/publications/guide-limitation-effects-obtrusive-light-outdoor-lighting-installations (20.2.2020)

Cinzano, P.; Falchi, F.; Elvidge, C. (2001): The first World Atlas of the artificial night sky brightness. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 328, S. 689–707

Clegg, S. (1859): A practical treatise on the manufacture and distribution of coal-gas: its introduction and progressive improvement; illustrated by engravings from working drawings, with general estimates. London

Coelho, I.; Teixeira, F.; Colombo, P.; Coelho, A.; Kindel, A. (2012): Anuran road-kills neighboring a peri-urban reserve in the Atlantic Forest, Brazil. In: Journal of Environmental Management 112, S. 17–26

Committee of Ministers (2011): Noise and light pollution. Reply to Recommendation Doc. 12644 (2011), www.assembly.coe.int/nw/xml/XRef/Xref-XML2HTML-en.asp?fileid=12826&lang=en (19.2.2020)

Court of Audit of the Republic of Slovenia (2017): Audit Report: Efficiency in preventing light pollution. Performance audit. Audited period: 1 January 2007 to 30 June 2017. Ljubljana, S. 1–5

Crissxcross (2014): Intelligente netzwerkfähige LED – Straßenlaternen in Leipzig. Siio, 26.4.2014, https://www.siio.de/intelligente-netzwerkfaehige-led-strassenlaternen-leipzig/ (20.2.2020)

Dannemann, E. (2009): Blinke, Blinke. In: Zeitpolitisches Magazin 6, S. 8

Dark Sky Czech Republik (2013): Night Environment Pollution and the Remedies through Legislation and Technology, in Czechia and in general. http://svetlo.astro.cz/darksky/ (20.2.2020)

Dauchy, R.; Dauchy, E.; Tirrell, R.; Hill, C.; Davidson, L.; Greene, M.; Tirrell, P.; Wu, J.; Sauer, L.; Blask, D. (2010): Dark-phase light contamination disrupts circadian rhythms in plasma measures of endocrine physiology and metabolism in rats. In: Comparative Medicine 60, S. 348–356

Dauchy, R.; Wren, M.; Dauchy, E.; Hoffman, A.; Hanifin, J.; Warfield, B.; Jablonski, M.; Brainard, G.; Hill, S.; Mao, L.; Dobek, G.; Dupepe, L.; Blask, D. (2015): The influence of red light exposure at night on circadian metabolism and physiology in Sprague-Dawley rats. In: Journal of the American Association for Laboratory Animal Science 54, S. 40–50

Dauchy, R.; Xiang, S.; Mao, L.; Brimer, S.; Wren, M.; Yuan, L.; Anbalagan, M.; Hauch, A.; Frasch, T.; Rowan, B.; Blask, D.; Hill, S. (2014): Circadian and melatonin

disruption by exposure to light at night drives intrinsic resistance to tamoxifen therapy in breast cancer. In: Cancer Research 74, S. 4099–4110

Davies, T.; Bennie, J.; Gaston, K. (2012): Street lighting changes the composition of invertebrate communities. In: Biology Letters 8(5), S. 764–767

Davies, T.; Bennie, J.; Inger, R.; de Ibarra, N.; Gaston, K. (2013): Artificial light pollution: Are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions? In: Global Change Biology 19, S. 1417–1423

Davis, S.; Mirick, D.; Stevens, R. (2001): Night shift work, light at night, and risk of breast cancer. In: Journal of the National Cancer Institute 93, S. 1557–1562

Day, J.; Baker, J.; Schofield, H.; Mathews, F.; Gaston, K. (2015): Part-night lighting: Implications for bat conservation. In: Animal Conservation 18, S. 512–516

DEFRA (Department for Environment Food and Rural Affairs) (2006): Statutory Nuisance from Insects and Artificial Light – Guidance on Sections 101 to 103 of the Clean Neighbourhoods and Environment Act 2005. London

Degen, T.; Hovestadt, T.; Mitesser, O.; Hölker, F. (2017): Altered sex-specific mortality and Female mating success: Ecological effects and evolutionary responses. In: Ecosphere 8(5), doi: 10.1002/ecs2.1820

Degen, T.; Mitesser, O.; Perkin, E.; Weiß, N.; Oehlert, M.; Mattig, E.; Hölker, F.; Chapman, J. (2016): Street lighting: sex-independent impacts on moth movement. In: Journal of Animal Ecology 85, S. 1352–1360

DENA (Deutsche Energie-Agentur) (2013): Monitoring der Energieeffizienz- und Marktentwicklung von »Straßenbeleuchtung«. https://industrie-energieeffizienz.de/fileadmin/user_upload/IeeUI/02_Dateien/Praesentationen/Praesentation_Monitoring_Strassenbeleuchtung_2013.pdf (20.2.2020)

Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (2011): Empfehlungen für die Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen. LiTG, Berlin. https://www.litg.de/media/195.12_Auflage_3_InfoPubl.pdf (20.2.2020)

Deveson, S.; Arendt, J.; Forsyth, I. (1990): Sensitivity of Goats to a Light Pulse During the Night as Assessed by Suppression of Melatonin Concentrations in the Plasma. In: Journal of Pinneal Research 8, S. 169–177

Dobler, G.; Ghandehari, M.; Koonin, S.; Sharma, M. (2016): A Hyperspectral Survey of New York City Lighting Technology. In: Sensors 16, doi: 10.3390/s16122047

Dominoni, D.; Goymann, W.; Helm, B.; Partecke, J. (2013a): Urban-like night illumination reduces melatonin release in European blackbirds (Turdus merula): implications of city life for biological time-keeping of songbirds. In: Frontiers in Zoology 10, doi: 10.1186/1742-9994-10-60

Dominoni, D.; Quetting, M.; Partecke, J. (2013b): Artificial light at night advances avian reproductive physiology. Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences 280(1756), doi: 10.1098/rspb.2012.3017

Dominoni, D.; Quetting, M.; Partecke, J. (2013c): Long-term effects of chronic light pollution on seasonal functions of European blackbirds (Turdus merula). In: PLoS One 8(12), doi: 10.1371/journal.pone.0085069

Donners, M.; van Grunsven, R.; Groenendijk, D.; van Langevelde, F.; Bikker, J.; Longcore, T.; Veenendaal, E. (2018): Colors of attraction: Modeling insect flight to light behavior. In: Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology 329, S. 434–440

Downs, N.; Beaton, V.; Guest, J.; Polanski, J.; Robinson, S.; Racey, P. (2003): The effects of illuminating the roost entrance on the emergence behaviour of Pipistrellus pygmaeus. In: Biological Conservation 111, S. 247–252

Düsterdiek, B.; Nitschke, K.; Kupferschläger, J.; Strotmann, W.; Greb, K.; Wegner, M. (2009): Öffentliche Beleuchtung. Analyse, Potenziale und Beschaffung. Deutscher Städte- und Gemeindbund, Dokumentation No. 92, Berlin

Dutta Gupta, S. (2017): Light Emitting Diodes for Agriculture: Smart Lighting. Singapore

Dwyer, R.; Bearhop, S.; Campbell, H.; Bryant, D. (2013): Shedding light on light: benefits of anthropogenic illumination to a nocturnally foraging shorebird. In: The Journal of Animal Ecology 82, S. 478–485

Edensor, T. (2013): Reconnecting with darkness: gloomy landscapes, lightless places. In: Social & Cultural Geography 14, S. 446–465

Edensor, T. (2017): From Light to Dark: Daylight, Illumination, and Gloom. Minneapolis

Eisenbeis, G. (2006): Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany. In: Rich, C.; Longcore, T. (Hg.): Ecological Consequences of Artificial Night Lighting, S. 191–198

Eisenbeis, G.; Eick, K. (2011): Studie zur Anziehung nachtaktiver Insekten an die Straßenbeleuchtung unter Einbeziehung von LEDs. In: Natur und Landschaft 86, S. 298–306

Ekirch, A. (2005): At day's close: night in times past. New York

EKOS (2011): Dark Sky Park Economic Impact Assessment. Glasgow

Engler, S. (2015): Mit Nachtgolf die Dunkelheit bekämpfen. GolfPost, 8.10.2015, www.golfpost.de/mit-nachtgolf-die-dunkelheit-bekaempfen-7777200142/ (20.2.2020)

Entwistle, J.; Slater, D.; Sloane, M. (2015): Darkness has become a luxury good in London: On the social meaning of street lighting, CityMetric. 20.10.2015, www.citymetric.com/horizons/darkness-has-become-luxury-good-london-social-meaning-street-lighting-1504 (20.2.2020)

Epperlein, D. (2011): Bedarfsgerechte Straßenbeleuchtung in Wohngebieten – Erste Erfahrungen mit einer sensorgesteuerten LED-Beleuchtung. Vortragsfolien zur Fachkonferenz des DStGB »Energieeffiziente Beleuchtung in Städten und Gemeinden – Technik, Planung, Beschaffung, Finanzierung«, 18.5.2011, Hannover, https://klimaschutz.goettingen.de/pics/medien/1_1308844563/Fachkonferenz_des_DStGB_Energieeffiziente_Beleuchtung_20.05.2011.pdf (20.2.2020)

Erren, T.; Pape, H.; Reiter, R.; Piekarski, C. (2008): Chronodisruption and cancer. In: Naturwissenschaften 95, S. 367–382

EURAC resarch L.f.U. (2013): Leitfaden für die Erstellung von kommunalen Lichtplänen in Südtirol. Bozen

Evans Ogden, L. (1996): Collision Course: The Hazards of Lighted Structures and Windows to Migrating Birds Collision Course. World Wildlife Fund Canada, Toronto

Fachagentur Windenergie an Land (2016): Bedarfsgerechte Nachtkennzeichnung von Windenergieanlagen. Hintergrundpapier, Berlin, https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Befeuerung/FA-Wind_Hintergrundpapier_BNK_2016-07-27.pdf (20.2.2020)

Falchi, F. (2011): Campaign of sky brightness and extinction measurements using a portable CCD camera. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 412, S. 33–48

Falchi, F.; Cinzano, P.; Duriscoe, D.; Kyba, C.; Elvidge, C.; Baugh, K.; Portnov, B.; Rybnikova, N.; Furgoni, R. (2016): The new world atlas of artificial night sky brightness. In: Science Advances 2(6), doi: 10.1126/sciadv.1600377

Falchi, F.; Cinzano, P.; Elvidge, C.; Keith, D.; Haim, A. (2011): Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. In: Journal of Environmental Management 92, S. 2714–2722

Farnworth, B.; Innes, J.; Waas, J. (2016): Converting predation cues into conservation tools: The effect of light on mouse foraging behaviour. In: PLoS One 11(1), doi: 10.1371/journal.pone.0145432

Fayos-Solá, E.; Marín, C.; Jafari, J. (2014): Astrotourism: No requiem for meaningful travel. PASOS. In: Revista de Turismo y Patrimonio Cultural 12, S. 663–671

Feuka, A.; Hoffmann, K.; Hunter, M.; Calhoun, A. (2017): Effects of light pollution on habitat selection in post-metamorphic Wood Frogs (Rana sylvaticus) and unisexual Blue-spotted Salamanders (Ambystoma laterale × jeffersonianum). In: Herpetological Conservation and Biology 12, S. 470–476

Fisher, L.; Junagade, N. (2016): Managing light clutter ion urban areas. In: Cities & Lights 4, S. 24–27

Folkard, S. (2008): Shift work, safety, and aging. In: Chronobiology International 25, S. 183–198

Fonken, L.; Aubrecht, T.; Meléndez-Fernández, O.; Weil, Z.; Nelson, R. (2013): Dim light at night disrupts molecular circadian rhythms and increases body weight. In: Journal of Biological Rhythms 28, S. 262–271

Fonken, L.; Nelson, R. (2014): The effects of light at night on circadian clocks and metabolism. In: Endocrine Reviews 35, S. 648–670

Fontaine, C.; Dajoz, I.; Meriguet, J.; Loreau, M. (2006): Functional diversity of plant-pollinator interaction webs enhances the persistence of plant communities. In: PLoS Biology 4, S. 0129–0135

Foster, R.; Peirson, S.; Wulff, K.; Winnebeck, E.; Vetter, C.; Roenneberg, T. (2013): Sleep and circadian rhythm disruption in social jetlag and mental illness. In: Progress in molecular biology and translational science 119, S. 325–346

Fotios, S.; Cheal, C.; Fox, S.; Uttley, J. (2017): The transition between lit and unlit sections of road and detection of driving hazards after dark. In: Lighting Research & Technology 51(2), S. 243–261

Fotios, S.; Goodman, T. (2012): Proposed UK guidance for lighting in residential roads. In: Lighting Research & Technology 44(1), S. 69–83

Franck, G. (1998): Ökonomie der Aufmerksamkeit: Ein Entwurf. München/Wien

Französische Botschaft in Deutschland (2010): Frankreich verabschiedet Umweltschutzgesetz Grenelle 2. Pressemitteilung vom 28.7.2010, Berlin, https://idw-online.de/de/news380954?print=1&id=380954 (20.2.2020)

Freiberg, A.; Schefter, C.; Hegewald, J.; Seidler, A. (2019): The influence of wind turbine visibility on the health of local residents: a systematic review. In: International archives of occupational and environmental health 92(5), S. 609–628

Frost, P.;, Kolstad, H.; Bonde, J. (2009): Shift work and the risk of ischemic heart disease – a systematic review of the epidemiologic evidence. In: Scandinavian Journal of Work, Environment & Health 35, S. 163–179

Gaston, K.; Holt, L. (2018): Nature, extent and ecological implications of night-time light from road vehicles. In: Journal of Applied Ecology 55(5), S. 2296–2307

van Geffen, K.; van Eck, E.; De Boer, R.; van Grunsven, R.; Salis, L.; Berendse, F.; Veenendaal, E. (2015): Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth. In: Insect Conservation and Diversity 8, S. 282–287

Gehring, J.; Kerlinger, P.; Manville, A. (2009): Communication towers, lights, and birds: successful methods of reducing the frequency of avian collisions. In: Ecological Applications 19(2), S. 505–514

Generalitat de Catalunya (2012): Contaminació lumínica. http://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/atmosfera/contaminacio_luminica/ (20.2.2020)

Ges, X.; Bará, S.; García-Gil, M.; Zamorano, J.; Ribas, S.; Masana, E. (2018): Light pollution offshore: Zenithal sky glow measurements in the mediterranean coastal waters. In: Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 210, S. 91–100

Gimenez, M.; Beersma, D.; Bollen, P.; van der Linden, M.; Gordijn, M. (2014): Effects of a chronic reduction of short-wavelength light input on melatonin and sleep patterns in humans: evidence for adaptation. In: Chronobiology International 31, S. 690–697

Goldstein, E. (2015): Wahrnehmungspsychologie. Berlin/Heidelberg

Gonzalez-Bernal, E.; Greenlees, M.; Brown, G.; Shine, R. (2016): Toads in the backyard: why do invasive cane toads (Rhinella marina) prefer buildings to bushland? In: Population Ecology 58, S. 293–302

Green, A.; Cohen-Zion, M.; Haim, A.; Dagan, Y. (2017): Evening light exposure to computer screens disrupts human sleep, biological rhythms, and attention abilities. In: Chronobiology International 34, S. 855–865

Green, J.; Perkins, C.; Steinbach, R.; Edwards, P. (2015): Reduced street lighting at night and health: A rapid appraisal of public views in England and Wales. In: Health & Place 34, S. 171–180

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

van Grunsven, R.; Creemers, R.; Joosten, K.; Donners, M.; Veenendaal, E. (2017): Behaviour of migrating toads under artificial lights differs from other phases of their life cycle. In: Amphibia-Reptilia 38, S. 49–55

van Grunsven, R.; Donners, M.; Boekee, K.; Tichelaar, I.; Geffen van, K.; Groenendijk, D.; Berendse, F.; Veenendaal, E. (2014): Spectral composition of light sources and insect phototaxis, with an evaluation of existing spectral response models. In: Journal of Insect Conservation 18, S. 225–231

Gwiazdzinski, L. (2015): Zwischen Bewahrung und Eroberung der nächtlichen Stadt. In: Forum Raumentwicklung 03, S. 4–7

Haber, W. (2013): Taglandschaften und Nachtlandschaften. In: Held et al. (2013), S. 19–22

Hale, J.; Davies, G.; Fairbrass, A.; Matthews, T.; Rogers, C.; Sadler, J. (2013): Mapping Lightscapes: Spatial Patterning of Artificial Lighting in an Urban Landscape. In: PLoS One 8(5), doi: 10.1371/journal.pone.0061460

Hale, J.; Fairbrass, A.; Matthews, T.; Davies, G.; Sadler, J. (2015): The ecological impact of city lighting scenarios: exploring gap crossing thresholds for urban bats. In: Global change biology 21, S. 1–12

Hänel, A. (2015): Nachthimmelshelligkeit bei Osnabrück 2006-2014. In: VdS-Journal 54, S. 36

Hänel, A. (2017a): Licht und Sicherheit. Osnabrück
Hänel, A. (2017b): Eine Liste voll abgeschirmter Leuchten mit ULR=0. www.lichtverschmutzung.de/seiten/vollabgeschirmt.php (20.2.2020)
Hänel, A.; Posch, T.; Ribas, S.; Aubé, M.; Duriscoe, D.; Jechow, A.; Kollath, Z.; Lolkema, D.; Moore, C.; Schmidt, N.; Spoelstra, H.; Wuchterl, G.; Kyba, C. (2018): Measuring night sky brightness: methods and challenges. In: Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 205, S. 278–290
Hänsch, R.; Könecke, B.; Pottharst, M.; Wukovitsch, F. (2012): Möglichkeiten der ökonomischen Bewertung des Verlusts der Nacht. In: Schrenk, M.; Popovich, V.; Zeile, P.; Elisei, P. (Hg.): Re-Mixing the City – Towards Sustainability and Resilience? Proceedings of 17th International Conference on Urban Planning, Regional Development and Information Society. REAL CORP Schwechat, S. 493–503
Hasenöhrl, U. (2015): Lighting conflicts from a historical perspective. In: Meier et al. (2015), S. 105–124
Hastings, M.; Maywood, E.; Reddy, A. (2008): Two decades of circadian time. In: J. Neuroendocrinol. 20, S. 812–819
Hatori, M.; Panda, S. (2010): The emerging roles of melanopsin in behavioral adaptation to light. In: Trends in molecular medicine 16, S. 435–446
Hattar, S.; Liao, H.; Takao, M.; Berson, D.; Yau, K. (2002): Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. In: Science 295, S. 1065–1070
Heiden, S. (2009): Medienfassaden: Die Stadt als Bildschirm – Medienfassaden verändern mehr als nur das Bild unserer Städte. In: Licht: Planung, Design, Technik, Handel 61(5), S. 332
Held, M.; Hölker, F.; Jessel, B. (Hg.) (2013): Schutz der Nacht – Lichtverschmutzung, Biodiversität und Nachtlandschaft. Bundesamt für Naturschutz, BfN-Skripten 336, Bonn
Henckel, D.; Meier, J.; Pottharst, M.; Wukovitsch, F. (2013): Der Verlust der Nacht in der 24-Stunden-Gesellschaft. In: Posch, T.; Hölker, F.; Freyhoff, A.; Uhlmann, T. (Hg.): Das Ende der Nacht. Lichtsmog: Gefahren – Perspektiven – Lösungen. Weinheim, S. 205–224
Henderson, D. (2010): Valuing the Stars: On the Economics of Light Pollution. In: Environmental Philosophy 7, 1S. 7-26. http://www.jstor.org/stable/26168027 (19.2.2020)
Hessisches Ministerium für Umwelt, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2013): Stromeffiziente LED-Straßenbeleuchtung. Ergebnisse eines Demonstrationsvorhabens in Borken, Fritzlar, Homberg (Efze) und Wabern, Wiesbaden
Heuser, L.; Kappenstein, B.; Schonowski, J.; Weis, M. (2017): Die integrierte multifunktionale Straßenlaterne – Humble Lamppost Erläuterung zu DIN SPEC 91347. Berlin
Hirdina, K. (1995): Belichten. Beleuchten. Erhellen. Licht in den zwanziger Jahren. Öffentliche Vorlesung, Humboldt-Universität zu Berlin, Philosophische Fakultät III, Berlin
Hirdina, K.; Augsburger, J. (2000): Schönes gefährliches Licht: Studien zu einem kulturellen Phänomen. Stuttgart
Hofmeister, S. (2013): Vermeidung von Lichtverschmutzung – Schutz der Nacht: Handlungsmöglichkeiten der Raum- und Umweltplanung. In: Held et al. (2013), S. 133–136

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

Hölker, F.; Jechow, A.; Schroer, S.; Gessner, M. (2018): Nächtliches Licht und Lichtverschmutzung in und um Gewässer. In: Hupfer, M.; Calmano, W.; Fischer, H.; Klapper, H. (Hg.): Handbuch Angewandte Limnologie: Grundlagen – Gewässerbelastung – Restaurierung – Aquatische Ökotoxikologie – Bewertung – Gewässerschutz. Weinheim, S. 1–26

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

Hölker, F.; Wurzbacher, C.; Weißenborn, C.; Monaghan, M.; Holzhauer, S.; Premke, K. (2015): Microbial diversity and community respiration in freshwater sediments influenced by artificial light at night. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences 370(1667), doi: 10.1098/rstb.2014.0130

Hollan, J. (2002): The Czech Act on Protection of the Air, including Light Pollution prevention. http://svetlo.astro.cz/darksky/czairlaw3.htm (19.2.2020)

Hollan, J. (2004): How should the light pollution be controlled-an experience from the Czech Republic, International Symposium on Ecology of the Night, S. 22–24

Honold, J. (2009): Ergebnisse der Online-Umfrage »Umweltbedingungen in Berlin«. Graduiertenkolleg Stadtökologie, Technische Universität Berlin, Berlin, www.berlin21.net/fileadmin/pdf/Umweltbedingungen_in_Berlin_-_Umfrageergebnisse.pdf (19.2.2020)

Hoormann, A. (2003): Lichtspiele: zur Medienreflexion der Avantgarde in der Weimarer Republik. München

Horváth, G.; Kriska, G.; Malik, P.; Robertson, B. (2009): Polarized light pollution: a new kind of ecological photopollution. In: Frontiers in Ecology and the Environment 7, S. 317–325

Horx, M. (2016): Die Helligkeitsrevolution. Wie adaptives Licht unseren Umgang mit künstlich erzeugter Helligkeit verändern wird. Ein gekürzter und bearbeiteter Auszug aus dem Zukunftsreport 2017, Zukunftsinstitut Frankfurt a.M., https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/zukunftsreport/die-helligkeitsrevolution/ (19.2.2020)

Hübner, G.; Pohl, J.; Hoen, B.; Firestone, J.; Rand, J.; Elliott, D.; Haac, R. (2019): Monitoring annoyance and stress effects of wind turbines on nearby residents: A comparison of U.S. and European samples. In: Environment international 132, doi: 10.1016/j.envint.2019.105090

Hughes, T. (1983): Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930. Baltimore/London

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, S. 110–135

Hurley, S.; Goldberg, D.; Nelson, D.; Hertz, A.; Horn-Ross, P.; Bernstein, L.; Reynolds, P. (2014): Light at night and breast cancer risk among California teachers. In: Epidemiology 25, S. 697–706

Hurley, S.; Nelson, D.; Garcia, E.; Gunier, R.; Hertz, A.; Reynolds, P. (2013): A cross-sectional analysis of light at night, neighborhood sociodemographics and urinary 6-sulfatoxymelatonin concentrations: implications for the conduct of health studies. In: International journal of health geographics 12, doi. 10.1186/1476-072X-12-39

Huth, J. (2013): The lost art of finding our way. Cambridge
Ikeda, M.; Sagara, M.; Inoué, S. (2000): Continuous exposure to dim illumination uncouples temporal patterns of sleep, body temperature, locomotion and drinking behavior in the rat. In: Neuroscience Letters 279, S. 185–189
Ikeno, T.; Weil, Z.; Nelson, R. (2014): Dim light at night disrupts the short-day response in Siberian hamsters. In: General and Comparative Endocrinology 197, S. 56–64
Jackett, M.; Frith, W. (2013): Quantifying the impact of road lighting on road safety – A New Zealand Study. In: IATSS Research 36, S. 139–145
Jakel, J. (2001): City Lights: Illuminating the American Night. Baltimore
James, P.; Bertrand, K.; Hart, J.; Schernhammer, E.; Tamimi, R.; Laden, F. (2017): Outdoor Light at Night and Breast Cancer Incidence in the Nurses' Health Study II. In: Environmental health perspectives 125(8), doi. 10.1289/EHP935
Jechow, A.; Hölker, F.; Kolláth, Z.; Gessner, M.; Kyba, C. (2016): Evaluating the summer night sky brightness at a research field site on Lake Stechlin in northeastern Germany. In: Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 181, S. 24–32
Jechow, A.; Kolláth, Z.; Ribas, S.; Spoelstra, H.; Hölker, F.; Kyba, C. (2017): Imaging and mapping the impact of clouds on skyglow with all-sky photometry. In: Scientific Reports 7, doi: 10.1038/s41598-017-06998-z
Johansen, N.; Vänninen, I.; Pinto, D.; Nissinen, A.; Shipp, L. (2011): In the light of new greenhouse technologies: 2. Direct effects of artificial lighting on arthropods and integrated pest management in greenhouse crops. In: Annals of Applied Biology 159, S. 1–27
Johns, L.; Jones, M.; Schoemaker, M.; McFadden, E.; Ashworth, A.; Swerdlow, A. (2018): Domestic light at night and breast cancer risk: a prospective analysis of 105 000 UK women in the Generations Study. In: British Journal Of Cancer 118(4), S. 600–606
Jones, J.; Francis, C. (2003): The effects of light characteristics on avian mortality at lighthouses. In: Journal of Avian Biology 34, S. 328–333
de Jong, M.; Jeninga, L.; Ouyang, J.; van Oers, K.; Spoelstra, K.; Visser, M. (2016a): Dose-dependent responses of avian daily rhythms to artificial light at night. In: Physiology & Behavior 155, S. 172–179
de Jong, M.; Ouyang, J.; Grunsven van, R.; Visser, M.; Spoelstra, K. (2016b): Do wild great tits avoid exposure to light at night? In: PLoS One 11(6), doi: 10.1371/journal.pone.0157357
Kantermann, T. (2013): Circadian biology: sleep-styles shaped by light-styles. In: Current Biology 23, S. R689–R690
Kantermann, T. (2018): Humanmedizinisch relevante Wirkungen von Lichtverschmutzung. SynOpus, Bochum
Kantermann, T.; Eastman, C. (2017): Circadian phase, circadian period and chronotype are reproducible over months. In: Chronobiology International 35(2), S. 280–288
Kantermann, T.; Forstner, S.; Halle, M.; Schlangen, L.; Roenneberg, T.; Schmidt-Trucksass, A. (2012): The stimulating effect of bright light on physical performance depends on internal time. In: PLoS One 7(7), doi: 10.1371/journal.pone.0040655
Kantermann, T.; Roenneberg, T. (2009): Is light-at-night a health risk factor or a health risk predictor? In: Chronobiology International 26, S. 1069–1074

Keenan, S. Benfield, M.; Blackburn, J. (2007): Importance of the artificial light field around offshore petroleum platforms for the associated fish community. In: Marine Ecology Progress Series 331, S. 219–231

Kemp, P.; Williams, J. (2009): Illumination influences the ability of migrating juvenile salmonids to pass a submerged experimental weir. In: Ecology of Freshwater Fish 18, S. 297–304

Kempenaers, B.; Borgström, P.; Loës, P.; Schlicht, E.; Valcu, M. (2010): Artificial night lighting affects dawn song, extra-pair siring success, and lay date in songbirds. In: Current biology 20, S. 1735–1739

Kerschner, F.; Schulev-Steindl, E. (2014): Rechtsschutz im Umweltrecht: Neue Herausforderungen. 19. Österreichische Umweltrechtstage, 10. und 11.9.2014, Johannes Kepler Universität, Institut für Umweltrecht JKU, Österreichischer Wasser- und Abwasserverband, Linz

Keshet-Sitton, A.; Or-Chen, K.; Huber, E.; Haim, A. (2017a): Illuminating a Risk for Breast Cancer: A Preliminary Ecological Study on the Association Between Streetlight and Breast Cancer. In: Integrative cancer therapies 16, S. 451–463

Keshet-Sitton, A.; Or-Chen, K.; Yitzhak, S.; Tzabary, I.; Haim, A. (2016): Can Avoiding Light at Night Reduce the Risk of Breast Cancer? In: Integrative cancer therapies 15, S. 145–152

Keshet-Sitton, A.; Or-Chen, K.; Yitzhak, S.; Tzabary, I.; Haim, A. (2017b): Light and the City: Breast Cancer Risk Factors Differ Between Urban and Rural Women in Israel. In: Integrative cancer therapies 16, S. 176–187

Khalsa, S.; Jewett, M.; Cajochen, C.; Czeisler, C. (2003): A phase response curve to single bright light pulses in human subjects. In: The Journal of physiology 549, S. 945–952

Kim, K.; Lee, E.; Kim, Y.; Kim, J. (2017): The association between artificial light at night and prostate cancer in Gwangju City and South Jeolla Province of South Korea. In: Chronobiology International 34, S. 203–211

Kim, Y.; Park, M.; Lee, E.; Choi, J. (2016): High Incidence of Breast Cancer in Light-Polluted Areas with Spatial Effects in Korea. In: Asian Pacific journal of cancer prevention: APJCP 17, S. 361–367

Kinzey, B.; Perrin, T.; Miller, N.; Kocifaj, M.; Aubé, M.; Lamphar, H. (2017): An Investigation of LED Street Lighting's Impact on Sky Glow. Pacific Northwest National Laboratory, Richland. www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/2017_led-impact-sky-glow.pdf (19.2.2020)

Kissil, G.; Lupatsch, I.; Elizure, A.; Zohar, Y. (2001): Long photoperiod delayed spawning and increaed somatic growth in gilthead seabream (Sparus aurata). In: Aquaculture 200, S. 363–379

Klaus, G.; Kägi, B.; Kobler, R.; Maus, K.; Righetti, A. (2005): Empfehlungen zur Vermeidung von Lichtemissionen. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hg.), Bern

Kleinteich, A. (2009): Life History of the Bridge Spider, Larinioides Sclopetarius (Clerck, 1757). Oldenburg

Kloog, I.; Haim, A.; Stevens, R.; Barchana, M.; Portnov, B. (2008): Light at night co-distributes with incident breast but not lung cancer in the female population of Israel. In: Chronobiology International 25, S. 65–81

Kloog, I.; Haim, A.; Stevens, R.; Portnov, B. (2009): Global co-distribution of light at night (LAN) and cancers of prostate, colon, and lung in men. In: Chronobiology International 26, S. 108–125

Kloog, I.; Portnov, B.; Rennert, H.; Haim, A. (2011): Does the modern urbanized sleeping habitat pose a breast cancer risk? In: Chronobiology International 28, S. 76–80

Kloog, I.; Stevens, R.; Haim, A.; Portnov, B. (2010): Nighttime light level co-distributes with breast cancer incidence worldwide. In: Cancer causes & control: CCC 21, S. 2059–2068

Knight, C. (2010): Field surveys of the effect of lamp spectrum on the perception of safety and comfort at night. In: Lighting Research & Technology 42, S. 313–329

Knop, E.; Zoller, L.; Ryser, R.; Gerpe, C.; Hörler, M.; Fontaine, C. (2017): Artificial light at night as a new threat to pollination. In: Nature 548, S. 206–209

Köhler, D. (2015): The lighting master plan as an instrument for municipalities. In: Meier et al. (2015), S. 141–158

Köhler, D.; Sieber, R. (2012): Lichtmasterplan – Auf dem Weg zu einem zielführenden Instrument? In: Professional Lighting Design 82, S. 40–44

Kolláth, Z. (2010): Measuring and modelling light pollution at the Zselic Starry Sky Park. In: Journal of Physics: Conference Series 218(1), doi: 10.1088/1742-6596/218/1/012001

Kolláth, Z.; Dömény, A.; Kolláth, K.; Nagy, B. (2016): Qualifying lighting remodelling in a Hungarian city based on light pollution effects. In: Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 181, S. 46–51

Koo, Y.; Song, J.; Joo, E.; Lee, H.; Lee, E.; Lee, S.; Jung, K. (2016): Outdoor artificial light at night, obesity, and sleep health: Cross-sectional analysis in the KoGES study. In: Chronobiology International 33, S. 301–314

Köster, U.; Schäfer, A. (2015): Qualitätsoffensive Naturparke, 3. Phase 2016–2020. Bonn

Krause, K. (2013): Funktionen der künstlichen Beleuchtung und der Dunkelheit – Ein Bericht zum Stand der sozialwissenschaftlichen Forschung. Schriftenreihe Verlust der Nacht Band 3, Technische Universität Berlin, Berlin

Krause, K. (2015): Regulating Urban Lighting: Prospects for Institutional Change. In: Meier et al. (2015), S. 125–140

Krause, K.; Pottharst, M.; Hasenöhrl, U. (2014a): Licht in Maßen. Umwelt- und sozialverträgliche Beleuchtung in Kommunen. Policy Briefing Paper, Erkner

Krause, K.; Pottharst, M.; Hasenöhrl, U. (2014b): Steuerung nächtlicher Außenbeleuchtung. Anforderung und Handlungsoptionen für eine Reduzierung von Lichtverschmutzung für Bund und Länder. Policy Briefing Paper, Erkner

Krijgsveld, K.; Fijn, R.; Lensink, R. (2015): Occurrence of peaks in songbird migration at rotor heights of offshore wind farms in the southern North Sea. Bureau Waardenburg bv, Culemborg

Kriska, G.; Malik, P.; Szivák, I.; Horváth, G. (2008): Glass buildings on river banks as »polarized light traps« for mass-swarming polarotactic caddis flies. In: Die Naturwissenschaften 95, S. 461–467

Kronhagel, C. (2010): Mediatektur: die Gestaltung medial erweiterter Räume. Wien u. a. O.

Kuechly, H.; Kyba, C.; Ruhtz, T.; Lindemann, C.; Wolter, C.; Fischer, J.; Hölker, F. (2012): Arial survey and spatial analysis of sources of light pollution in Berlin, Germany. In: Remote Sensing of Environment 126, S. 39–50

Kuijper, D.; Schut, J.; Dullemen, D.; Toorman, H.; Goossens, N.; Ouwehand, J.; Limpens, J. (2008): Experimental evidence of light disturbance along the commuting routes of pond bats (Myotis dasycneme). In: Lutra 51, S. 37–49

Küster, I. (2017): Verbreitung und Verwendung von Lichtmasterplänen in Großstädten im deutschsprachigen Raum. Technische Universität Berlin, Berlin

Kyba, C. (2016): Defense Meteorological Satellite Program data should no longer be used for epidemiological studies. In: Chronobiology International 33, S. 943–945

Kyba, C. (2018): Is Light Pollution Getting Better or Worse? In: Nature Astronomy 2(4), S. 267–269

Kyba, C.; Garz, S.; Kuechly, H.; Sánchez de Miguel, A.; Zamorano, J.; Fischer, J.; Hölker, F. (2015a): High-Resolution Imagery of Earth at Night: New Sources, Opportunities and Challenges. In: Remote Sensing of Environment 7, S. 1–23

Kyba, C.; Hänel, A.; Hölker, F. (2014): Redefining efficiency for outdoor lighting. In: Energy & Environmental Science 7, S. 1806–1809

Kyba, C.; Kantermann, T. (2016): Does ambient light at night reduce total melatonin production? In: Hormones – International Journal of Endocrinology and Metabolism 15(1), S. 142–143

Kyba, C.; Kuechly, H.; Sánchez de Miguel, A.; Czerwonsky, S.; Ruhtz, T.; Hale, J.; Lindemann, C.; Kaineder, H.; Fischer, J.; Hölker, F. (2016): Are relationships between artificial light emission and land use dependent on community size? In: Kyba, C.; Beu, D.; Schroer, S.; Hölker, F.; Roby, J. (Hg.): Conference Handbook. ALAN 2016 – 4th International Conference on Artificial Light at Night, Cluj-Napoca, Rumänien, S. 40–41

Kyba, C.; Kuester, T.; Kuechly, H. (2017a): Changes in outdoor lighting in Germany from 2012-2016 as observed by VIIRS DNB. In: International Journal of Sustainable Lighting 19, S. 112–123

Kyba, C.; Kuester, T.; Sánchez de Miguel, A.; Baugh, K.; Jechow, A.; Hölker, F.; Bennie, J.; Elvidge, C.; Luis, G.; Gaston, K. (2017b): Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. In: Science Advances 3, S. 1–9

Kyba, C.; Ruhtz, T.; Fischer, J.; Hölker, F. (2012): Red is the new black: how the colour of urban skyglow varies with cloud cover. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 425, S. 701–708

Kyba, C.; Tong, K.; Bennie, J.; Birriel, I.; Birriel, J.; Cool, A.; Danielsen, A.; Davies, T.; Outer, P. den.; Edwards, W.; Ehlert, R. et al. (2015b): Worldwide variations in artificial skyglow. In: Scientific Reports 5, doi: 10.1038/srep08409

Lacoeuilhe, A.; Machon, N.; Julien, J.; Le Bocq, A.; Kerbiriou, C. (2014): The influence of low intensities of light pollution on bat communities in a semi-natural context. In: PLoS ONE 9(10), doi: 10.1371/journal.pone.0103042

LAI (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz) (2012): Hinweise zur Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen. Beschluss der LAI vom 13.09.2012, München

Land Oberösterreich (2013): Besseres Licht. Alternativen zum Lichtsmog. www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/us_besseresLicht2013_leitfaden.pdf (20.2.2020)

Land Oberösterreich (2017): Licht – Lichtverschmutzung. https://www.land-oberoesterreich.gv.at/115999.htm (19.2.2020)

Lang, D. (2013): Neue Systemlösungen und Beleuchtungsstrategien im Außenraum. In: Held et al. (2013), S. 91–94

van Langevelde, F.; Braamburg-Annegarn, M.; Huigens, M.; Groendijk, R.; Poitevin, O.; van Deijk, J.; Ellis, W.; van Grunsven, R.; de Vos, R.; Franzén, M.; WallisDeVries, M. (2018): Declines in moth populations stress the need for conserving dark nights. In: Global Change Biology 24(3), S. 925–932

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

Le Tallec, T.; Théry, M.; Perret, M. (2015): Effects of light pollution on seasonal estrus and daily rhythms in a nocturnal primate. In: Journal of Mammalogy 96, S. 438–445

Lehmann, F. (2008): Public Space – Public Relations: Großformatige Werbung als ein Beispiel des Umgangs mit öffentlichen Räumen. Frankfurt a.M.

Levey, D. (2005): Effects of Landscape Corridors on Seed Dispersal by Birds. In: Science 309, S. 146–148

Levin, N. (2017): The impact of seasonal changes on observed nighttime brightness from 2014 to 2015 monthly {VIIRS DNB} composites. In: Remote Sensing of Environment 193, S. 150–164

Levin, N.; Zhang, Q. (2017): A global analysis of factors controlling VIIRS nighttime light levels from densely populated areas. In: Remote Sensing of Environment 190, S. 366–382

Lewanzik, D.; Voigt, C. (2014): Artificial light puts ecosystem services of frugivorous bats at risk. In: Journal of Applied Ecology 51, S. 388–394

Lewanzik, D.; Voigt, C. (2017): Transition from conventional to light-emitting diode street lighting changes activity of urban bats. In: Journal of Applied Ecology 54, S. 264–271

Lewy, A.; Sack, R. (1989): The dim light melatonin onset as a marker for circadian phase position. In: Chronobiology International 6, S. 93–102

Li, Q.; Zheng, T.; Holford, T.; Boyle, P.; Zhang, Y.; Dai, M. (2010): Light at night and breast cancer risk: results from a population-based case-control study in Connecticut, USA. In: Cancer causes & control: CCC 21, S. 2281–2285

Lim, J.; Dinges, D. (2008): Sleep deprivation and vigilant attention. In: Annals of the New York Academy of Sciences 1129, S. 305–322

Lobão, J.; Devezas, T.; Catalão, J. (2015): Energy efficiency of lighting installations: Software application and experimental validation. In: Energy Reports 1, S. 110–115

Longcore, T.; Aldern, H.; Eggers, J.; Flores, S.; Franco, L.; Hirshfield-Yamanishi, E.; Petrinec, L.; Yan, W.; Barroso, M. (2015): Tuning the white light spectrum of light emitting diode lamps to reduce attraction of nocturnal arthropods. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences 370(1667), doi: 10.1098/rstb.2014.0125

Lorenc, T.; Petticrew, M.; Whitehead, M.; Neary, D.; Clayton, S.; Wright, K.; Thomson, H.; Cummins, S.; Sowden, A.; Renton, A. (2013): Environmental interventions to reduce fear of crime: systematic review of effectiveness. In: Systematic Reviews 2, doi: 10.1186/2046-4053-2-30

Lorenzen, D. (2017): Tschechiens Lichtverschmutzungsgesetz – Dunkle Nächte per Gesetz. Deutschlandfunk, 1.6.2017, https://www.deutschlandfunk.de/tschechiens-lichtverschmutzungsgesetz-dunkle-naechte-per.732.de.html?dram:article_id=387593 (6.3.2020)

Lowe, R. (1952): The Influence of Light and Other Factors on the Seaward Migration of the Silver Eel (Anguilla anguilla L.). In: Journal of Animal Ecology 21, S. 275–309

Luginbuhl, C. (2008): Coda: What the Solution Would Look Like. In: Bogard, P. (Hg.): Let There Be Night: Testimony on Behalf of the Dark. Reno, S. 199–207

Luginbuhl, C.; Moore, C.; Richman, A.; Lockwood, G..; Davis, D. (2009): From the Ground Up II: Sky Glow and Near-Ground Artificial Light Propagation in Flagstaff, Arizona. In: Publ. astron. Soc. Pac. 121, S. 204–212

Lux Review (2016): Berlin unveils »on demand« street lighting. http://luxreview.com/article/2016/10/berlin-unveils-on-demand-street-lighting- (19.2.2020)

Maaß, C. (2003): Die rechtliche Regulierung von Lichtimmissionen in Natur und Landschaft. In: BUND Berlin e. V. (Hg): Lichtökologie – Insektenfreundliche und Energie sparende Außenbeleuchtung. Berlin, S. 14–31

Macgregor, C.; Evans, D.; Fox, R.; Pocock, M. (2017): The dark side of street lighting: Impacts on moths and evidence for the disruption of nocturnal pollen transport. In: Global Change Biology 23, S. 697–707

Macgregor, C.; Pocock, M.; Fox, R.; Evans, D. (2015): Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: a review. In: Ecological Entomology 40, S. 187–198

Macgregor, C.; Pocock, M.; Fox, R.; Evans, D. (2019): Effects of street lighting technologies on the success and quality of pollination in a nocturnally pollinated plant. In: Ecosphere 10, doi: 10.1002/ecs2.2550

Manfrin, A. (2017): Effects of artificial light at night (ALAN) on interactions between aquaticand terrestrial ecosystems. Dissertation, Freie Universität Berlin, Berlin

Manfrin, A.; Singer, G.; Larsen, S.; Weiß, N.; Grunsven van, R.; Weiß, N.-S.; Wohlfahrt, S.; Monaghan, M.; Hölker, F. (2017): Artificial light at night affects organism flux across ecosystem boundaries and drives community structure in the recipient ecosystem. In: Frontiers in Environmental Science 5, doi: 10.3389/fenvs.2017.00061

Mangold, R. (2015): Informationspsychologie: Wahrnehmen und Gestalten in der Medienwelt. Berlin/Heidelberg

Marchand, T. (2011): Europe's unique light pollution law: dark skies over Slovenia, Cafebabel. www.cafebabel.co.uk/politics/article/europes-unique-light-pollution-law-dark-skies-over-slovenia.html (19.2.2020)

Marchant, P. (2010): What is the contribution of street lighting to keeping us safe? An investigation into a policy. In: Radical Statistics, S. 32–42

Marchant, P. (2017): Why Lighting Claims Might Well Be Wrong. In: International Journal of Sustainable Lighting 19, S. 69–74

Marczak, L.; Richardson, J. (2008): Growth and development rates in a riparian spider are altered by asynchrony between the timing and amount of a resource subsidy. In: Oecologia 156, S. 249–258

Marín, C.; Wainscoat, R.; Fayos-Solá, E. (2010): »Windows to the universe« — starlight, dark-sky areas and observatory sites. In: Ruggles, C.; Cotte, M. (Hg.): Heritage Sites of Astronomy and Archaeoastronomy in the context of the UNESCO World Heritage Convention. International Secretariat of ICOMOS, International Astronomical Union. Paris, S. 238–245

Marques, A.; Batalha, H.; Rodrigues, S.; Costa, H.; Pereira, M.; Fonseca, C.; Mascarenhas, M.; Bernardino, J. (2014): Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. In: Biological Conservation 179, S. 40–52

Marx, H. (1972): 50 Jahre Volkssternwarte Stuttgart. Verein Schwäbische Sternwarte e. V., Stuttgart

Mathews, F.; Roche, N.; Aughney, T.; Jones, N.; Day, J.; Baker, J.; Langton, S. (2015): Barriers and benefits: implications of artificial night-lighting for the distribution

of common bats in Britain and Ireland. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences 370(1667), doi: 10.1098/rstb.2014.0124
Matt, A. (2015): Nachtabschaltung: Energiesparen auf Kosten der Sicherheit? Vortragsfolien zur OKI-Fachtagung Licht und Lichtverschmutzung, 24.11.2015, Zürich, https://docplayer.org/38173163-Nachtabschaltung-energiesparen-auf-kosten-der-sicherheit.html (2.3.2020)
Mattoni, B.; Burattini, C.; Bisegna, F.; Fotios, S. (2017): The pedestrian's perspective: how do illuminance variations affect reassurance? IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7977648 (19.2.2020)
Matzke, E. (1936): The Effect of Street Lights in Delaying Leaf-Fall in Certain Trees. In: American Journal of Botany 23, S. 446–452
Mazenauer, C. (2015): Nächtliche Dunkelheit im Val Müstair: eine Untersuchung über die Wahrnehmung und das touristische Potenzial der nächtlichen Dunkelheit. Masterarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich, Zürich
McHill, A.; Phillips, A.; Czeisler, C.; Keating, L.; Yee, K.; Barger, L.; Garaulet, M.; Scheer, F.; Klerman, E. (2017): Later circadian timing of food intake is associated with increased body fat. In: The American Journal of Clinical Nutrition 106(5), S. 1213–1219
McQuire, S. (2008): The Media City: Media, Architecture and Urban Space. London
McQuire, S.; Martin, M.; Niederer, S. (2009): Urban screen reader. Institute of Network Cultures, Amsterdam
Meier, J. (2015): Designating Dark Sky Areas: Actors and Interests. In: Meier et al. (2015), S. 177–196
Meier, J. (2018): Temporal Profiles of Urban Lighting: Proposal for a research design and first insights from three Berlin case studies. In: International Journal of Sustainable Lighting 20, S. 11–28
Meier, J. (2019): By Night. An investigation into practices, policies and perspectives on artificial outdoor lighting. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin
Meier, J.; Hasenöhrl, U.; Krause, K.; Pottharst, M. (2014): Urban Lighting, Light Pollution and Society. New York
Meier, J.; Pottharst, M. (2013): Gesellschaftliche Akteure der künstlichen Beleuchtung Berlin
Metcalf, J. (2012): Detecting and characterizing nighttime lighting using multispectral and hyperspectral imaging. Dissertation, Naval Postgraduate School, Monterey
Michaud, D.; Feder, K.; Keith, S.; Voicescu, S.; Marro, L.; Than, J.; Villeneuve, P. (2016): Effects of wind turbine noise on self-reported and objective measures of sleep. In: Sleep 39(1), S. 97–109
Migaud, H.; Cowan, M.; Taylor, J.; Ferguson, H. (2007): The effect of spectral composition and light intensity on melatonin, stress and retinal damage in post-smolt Atlantic salmon, Salmo salar. In: Aquaculture 270, S. 390–404
Migaud, H.; Wang, N.; Gardeur, J.; Fontaine, P. (2006): Influence of photoperiod on reproductive performances in Eurasian perch Perca fluviatilis. In: Aquaculture 252, S. 385–393
Miles, W.; Money, S.; Luxmoore, R.; Furness, R. (2010): Effects of artificial lights and moonlight on petrels at St Kilda. In: Bird Study 57, S. 244–251
Miller, S.; Straka, W.; Mills, S.; Elvidge, C.; Lee, T.; Walther, A.; Heidinger, A.; Weiss, S. (2013): Illuminating the Capabilities of the Suomi National Polar-Orbiting

Partnership (NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band. In: Remote Sensing of Environment 5, S. 6717–6766
Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie (2013): Eclairer pour rien la nuit. À partir du 1er juillet 2013, les bureaux, façades et bâtiments économisent leur électricité. https://www.anpcen.fr/docs/20130629131914_35e0st_doc69.pdf (20.2.2020)
Minnaar, C.; Boyles, J.; Minnaar, I.; Sole, C.; Mckechnie, A. (2015): Stacking the odds: Light pollution may shift the balance in an ancient predator-prey arms race. In: Journal of Applied Ecology 52, S. 522–531
Mitler, M.; Carskadon, M.; Czeisler, C.; Dement, W.; Dinges, D.; Graeber, R. (1988): Catastrophes, sleep, and public policy: consensus report. In: Sleep 11, S. 100–109
Mohar, A. (2013): Aktiver Nachtschutz in Slowenien-Verordnung zur Vermeidung von Lichtverschmutzung. In: Held et al. (2013), S. 125–128
Mohar, A. (2015): Achievements and Consequences of Light pollution Legislation in Slovenia. Vortragsfolien zur ALAN 2015, Sherbrooke
Mohar, A.; Zagmajster, M.; Verovnik, R.; Skaberne, B. (2014): Nature-friendlier lighting of objects of cultural heritage (churches). Recommendations. Dark-Sky Slowenien (Hg.), Ljubljana
Molcan, L.; Vesela, A.; Zeman, M. (2014): Repeated Phase Shifts in the Lighting Regimen Change the Blood Pressure Response to Norepinephrine Stimulation in Rats. In: Physiological Research 63, S. 567–575
Moore, M.; Pierce, S.; Walsh, H.; Kvalvik, S.; Lim, J. (2000): Urban light pollution alters the diel vertical migration of Daphnia. In: SIL Proceedings, 1922-2010, Verhandlungen 27(2), S. 779–782
Morgan-Taylor, M. (2015): Regulating Light Pollution in Europe: Legal Challenges and Ways Forward. In: Meier et al. (2015), S. 159–176
Mosser, S. (2007): Eclairage et sécurité en ville: l'état des savoirs (=Urban Lighting and Security). In: Déviance et Société 31, S. 77–100
NABU (Naturschutzbund Deutschland) (2011): Kommunale Lichtplanung für eine energieeffiziente und ökologisch verträgliche Stadtbeleuchtung. Einführung und Überblick zu den NABU-Arbeitshilfen für Kommunen, Energiedienstleister sowie Planungs- und Ingenieurbüros, Berlin
Narboni, R. (2006): Strategien zur Gestaltung mit Licht. In: Schmidt, J.; Töllner, M. (Hg.): StadtLicht – Lichtkonzepte für die Stadtgestaltung: Grundlagen, Methoden, Instrumente, Beispiele. Stuttgart, S. 55–57
Narendran, N.; Zhu, Y. (2015): Energy and user acceptability benefits of improved illuminance uniformity in parking lot illumination. In: Lighting Res. Technol. 48, S. 1–21
NB (2017): Fulda auf dem Weg zur Sternenstadt: »Akzentbeleuchtung« in der Friedrich- und Marktstraße – Zwischenbilanz. Osthessen News, 4.7.2017, https://osthessen-news.de/n11563706/akzentbeleuchtung-in-der-friedrich-und-marktstrasse-zwischenbilanz.html (19.2.2020)
Neil-Sztramko, S.; Pahwa, M.; Demers, P.; Gotay, C. (2014): Health-related interventions among night shift workers: a critical review of the literature. In: Scandinavian journal of work, environment & health 40, S. 543–556
Neumann, D. (2007): Architekturen des Augenblicks. In: Die alte Stadt 34, S. 32–44
Newbery, B.; Jones, D. (2007): Presence of Asian House Gecko Hemidactylus frenatus across an urban gradient in Brisbane: influence of habitat and potential for impact on native gecko species. In: Lunney, D.; Eby, P.; Hutchings, P.; Burgin, S. (Hg.):

Pest or Guest: The Zoology of overabundance. Royal Zoological Society of New South Wales, Mosman, S. 59–65

Newman, R.; Ellis, T.; Davison, P.; Ives, M.; Thomas, R.; Griffiths, S.; Riley, W. (2015): Using novel methodologies to examine the impact of artificial light at night on the cortisol stress response in dispersing Atlantic salmon (Salmo salar L.) fry. In: Conservation Physiology 3(1), doi: 10.1093/conphys/cov051

Nievas Rosillo, M. (2013): Absolute photometry and night sky brightness with all-sky cameras. Master's thesis, Universidad Complutense de Madrid, Madrid. https://eprints.ucm.es/24626/ (19.2.2020)

NLPIP (National Lighting Product Information Program) (2007): What are the IESNA cutoff classifications? Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, https://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/lightpollution/cutoffClassifications.asp (19.2.2020)

Nordt, A.; Klenke, R. (2013): Sleepless in Town – Drivers of the Temporal Shift in Dawn Song in Urban European Blackbirds. In: PLoS One 8(8), doi: 10.1371/journal.pone.0071476

Northwest Energy Efficiency Alliance (2014): Seattle LED Adaptive Lighting Study, Boulder, USA. https://neea.org/img/uploads/seattle-led-adaptive-lighting-study.pdf (19.2.2020)

Nowozin, C.; Wahnschaffe, A.; Rodenbeck, A.; de Zeeuw, J.; Hädel, S.; Kozakov, R.; Schöpp, H.; Münch, M.; Kunz, D. (2017): Applying Melanopic Lux to Measure Biological Light Effects on Melatonin Suppression and Subjective Sleepiness. In: Curr. Alzheimer Res. 14, S. 1042–1052

Offenberger, M. (2015): Geschickte Beleuchtung setzt Kulturdenkmäler ins rechte Licht ohne Tieren zu schaden. AnLiegen Natur 37/2, www.anl.bayern.de/publikationen/anliegen/meldungen/wordpress/kulturdenkmaeler/ (19.2.2020)

Ohayon, M.; Milesi, C. (2016): Artificial Outdoor Nighttime Lights Associate with Altered Sleep Behavior in the American General Population. In: Sleep 39, S. 1311–1320

Okuliarova, M.; Molcan, L.; Zeman, M. (2016): Decreased emotional reactivity of rats exposed to repeated phase shifts of light–dark cycle. In: Physiology & Behavior 156, S. 16–23

Oliveira, C.; Aparício, R.; Blanco-Vives, B.; Chereguini, O.; Martín, I.; Javier Sánchez-Vazquez, F. (2013): Endocrine (plasma cortisol and glucose) and behavioral (locomotor and self-feeding activity) circadian rhythms in Senegalese sole (Solea senegalensis Kaup 1858) exposed to light/dark cycles or constant light. In: Fish Physiology and Biochemistry 39, S. 479–487

Oliveira, C.; Ortega, A.; López-Olmeda, J.; Vera, L.; Sánchez-Vázquez, F. (2007): Influence of Constant Light and Darkness, Light Intensity, and Light Spectrum on Plasma Melatonin Rhythms in Senegal Sole. In: Cronobiology International 24, S. 645–627

OÖ Energiesparverband (Energiesparverband Oberösterreich) (2015): Straßenbeleuchtung mit LED. Linz

Oppedal, F.; Juell, J.; Taranger, G.; Hansen, T. (2001): Artificial light and season affects vertical distribution and swimming behaviour of post-smolt Atlantic salmon in sea cages. In: Journal of Fish Biology 58(6), S. 1570–1584

Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (2003): Visuelle Informationsträger für verkehrsfremde Zwecke. www.fsv.at/shop/produktdetail.aspx?IDProdukt=e5dab6e2-846a-40d9-9463-156a466c11a7 (19.2.2020)

den Outer, P.; Lolkema, D.; Haaima, M.; van der Hoff, R.; Spoelstra, H.; Schmidt, W. (2011): Intercomparisons of nine sky brightness detectors. In: Sensors 11(10), S. 9603–9612

Ouyang, J.; de Jong, M.; Hau, M.; Visser, M.; Grunsven van, R.; Spoelstra, K. (2015): Stressful colours: corticosterone concentrations in a free-living songbird vary with the spectral composition of experimental illumination. In: Biology Letters 11(8), doi: 10.1098/rsbl.2015.0517

Ouyang, J.; de Jong, M.; van Grunsven, R.; Matson, K.; Haussmann, M.; Meerlo, P.; Visser, M.; Spoelstra, K. (2017): Restless roosts: Light pollution affects behavior, sleep, and physiology in a free-living songbird. In: Global Change Biology 23, S. 4987–4994

Pack, D.; Hardy, B.; Longcore, T. (2017): Studying the Earth at night from CubeSats, Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites, Session 10: Leo Missons, Logan, http://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2017/all2017/41/ (19.2.2020)

Parliamentary Assembly (2010): Noise and light pollution. Resolution 1776 (2010), www.assembly.coe.int/nw/xml/XRef/Xref-XML2HTML-en.asp?fileid=17923&lang=en (19.2.2020)

Pauen-Höppner, U.; Höppner, M. (2013): Öffentliche Beleuchtung – mehr Licht heißt nicht mehr Sicherheit. In: Held et al. (2013), S. 105–108

Pawson, S.; Bader, M. (2014): LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. In: Ecological Applications 24, S. 1561–1568

Pedani, M. (2004): Light Pollution at the Roque de los Muchachos Observatory. In: New Astronomy 9, S. 641–650

Pohl, J.; Hübner, G.; Mohs, A. (2012): Acceptance and stress effects of aircraft obstruction markings of wind turbines. In: Energy Policy 50, S. 592–600

Polak, T.; Korine, C.; Yair, S.; Holderied, M. (2011): Differential effects of artificial lighting on flight and foraging behaviour of two sympatric bat species in a desert. In: Journal of Zoology 285, S. 21–27

Poot, H.; Ens, B.; Vries, H.; Donners, M.; Wernand, M.; Marquenie, J. (2008): Green Light for Nocturnally Migrating Birds. In: Ecology and Society 13, doi: 10.5751/ES-02720-130247

Porter, M.; Duncan, N.; Handeland, S. (2001): Temperature, light intensity and plasma melatonin levels in juvenile Atlantic salmon. In: Journal of Fish Biology 58, S. 431–438

Porter, M.; Duncan, N.; Mitchell, D.; Bromagea, N. (1999): The use of cage lighting to reduce plasma melatonin in Atlantic salmon (Salmo salar) and its effects on the inhibition of grilsing. In: Aquaculture 176, S. 237–244

Portnov, B.; Stevens, R.; Samociuk, H.; Wakefield, D.; Gregorio, D. (2016): Light at night and breast cancer incidence in Connecticut: An ecological study of age group effects. In: The Science of the total environment 572, S. 1020–1024

Posch, T. (2013): Besser beleuchten – Intensität, spektrale Zusammensetzung und Timing der Beleuchtung. In: Held et al. (2013), S. 43–46

Pretzsch, H.; Biber, P.; Uhl, E.; Dahlhausen, J.; Schütze, G.; Perkins, D.; Rötzer, T.; Caldentey, J.; Koike, T.; Con, T. v.; Chavanne, A.; Toit, B.; Foster, K.; Lefer, B. (2017): Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. In: Scientific Reports 7(1), doi: 10.1038/s41598-017-14831-w

Projektgruppe Dunkelheit als Chance (2014): Dunkelheit als Chance: Nachhaltiger Tourismus im Naturpark Westhavelland. Berlin

PwC (PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft Wirtschaftsprüfergesellschaft) (2015): Straßenbeleuchtung im Energiesparmodus? https://www.pwc.de/de/offentliche-unternehmen/assets/pwc_studie_strassenbeleuchtung-im-energiesparmodus_2015.pdf (18.2.2020)

Quester, W. (2015): Nachthimmelshelligkeit in Esslingen 2008-2014. In: VdS-Journal 54, S. 38

Raap, T.; Casasole, G.; Pinxten, R.; Eens, M. (2016a): Early life exposure to artificial light at night affects the physiological condition: An experimental study on the ecophysiology of free-living nestling songbirds. In: Environmental Pollution 218, S. 909–914

Raap, T.; Pinxten, R.; Eens, M. (2016b): Artificial light at night disrupts sleep in female great tits (Parus major) during the nestling period, and is followed by a sleep rebound. In: Environmental Pollution 215, S. 125–134

Raap, T.; Sun, J.; Pinxten, R.; Eens, M. (2017): Disruptive effects of light pollution on sleep in free-living birds: Season and/or light intensity-dependent? In: Behavioural Processes 144, S. 13–19

Rad, F.; Bozaoğlu, S.; Ergene Gözükara, S.; Karahan, A.; Kurt, G. (2006): Effects of different long-day photoperiods on somatic growth and gonadal development in Nile tilapia (Oreochromis niloticus L.). In: Aquaculture 255, S. 292–300

Radicchi, A.; Meier, J.; Henckel, D. (2016): Urban planning challenges: toward integrated approaches to sustainable lightscape and soundscape planning. Vortragsfolien zur ALAN 2016 – 4th International Conference on Artificial Light at Night, Cluj-Napoca, Rumänien, http://artificiallightatnight.weebly.com/uploads/3/7/0/5/37053463/radicchi-meier-henckel.pdf (18.2.2020)

Rea, M.; Brons, J.; Figueiro, M. (2011): Measurements of light at night (LAN) for a sample of female school teachers. In: Chronobiology International 28, S. 673–680

Rea, M.; Figueiro, M.; Bullough, J.; Bierman, A. (2005): A model of phototransduction by the human circadian system. In: Brain Research Reviews 50, S. 213–228

Rehmann, M. (2013): Gewerbliche Beleuchtung im Wohnquartier – eine unterschätzte nächtliche Belastung? Schriftenreihe Verlust der Nacht Band 5. Berlin, www.verlustdernacht.de/tl_files/VDN/Literature/VdN-Band5_final_web.pdf (18.2.2020)

Rehsöft, N.; Schneider, F. (1998): Luzifers Erben. Lesebuch zu den Hintergründen der Beleuchtung. Diplomarbeit, Technischen Universität Hamburg-Harburg, Hamburg

Ribas, S.; Torra, J.; Figueras, F.; Paricio, S.; Canal-Domingo (2016): How clouds are amplifying (or not) the effects of ALAN. In: International Journal of Sustainable Lighting 35, S. 32–39

Rich, C.; Longcore, T. (2006): Ecological Consequences of Artificial Night Lighting. Washington D.C.

Richter, H.-J. (2005): Planungshilfe Licht für Europas Straßen – Beleuchtung von Straßen, Wegen und Plätze nach DIN EN 13 201. Arnsberg

Riedel, M.; Ringwald, R.; Rönitzsch, H. (2013): Praxishandbuch Öffentliche Beleuchtung: Wirtschaftlichkeit, Recht, Technik. Berlin

Riley, W.; Davison, P.; Maxwell, D.; Bendall, B. (2013): Street lighting delays and disrupts the dispersal of Atlantic salmon (Salmo salar) fry. In: Biological Conservation 158, S. 140–146

Riley, W.; Davison, P.; Maxwell, D.; Newman, R.; Ives, M. (2015): A laboratory experiment to determine the dispersal response of Atlantic salmon (Salmo salar) fry to street light intensity. In: Freshwater Biology 60, S. 1016–1028

Rimmer, D.; Boivin, D.; Shanahan, T.; Kronauer, R.; Duffy, J.; Czeisler, C. (2000): Dynamic resetting of the human circadian pacemaker by intermittent bright light. In: American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology 279(5), S. R1574–R1579

Ringwald, R.; Engel, C. (2013): Straßenbeleuchtungspflicht. In: Ringwald, R.; Rönitzsch, H.; Riedel, M. (Hg.): Praxishandbuch Öffentliche Beleuchtung – Wirtschaftlichkeit, Recht, Technik. Berlin, S. 77–91

Robert, K.; Lesku, J.; Partecke, J.; Chambers, B. (2015): Artificial light at night desynchronizes strictly seasonal reproduction in a wild mammal. In: Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences 282(1816), doi: 10.1098/rspb.2015.1745

Robertson, B.; Keddy-Hector, I.; Shrestha, S.; Silverberg, L.; Woolner, C.; Hetterich, I.; Horváth, G. (2018): Susceptibility to ecological traps is similar among closely related taxa but sensitive to spatial isolation. In: Animal Behaviour 135, S. 77–84

Rodríguez, A.; Burgan, G.; Dann, P.; Jessop, R.; Negro, J.; Chiaradia, A. (2014): Fatal attraction of short-tailed shearwaters to artificial lights. In: PLoS One 9(10), doi: 10.1371/journal.pone.0110114

Rodríguez, A.; 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, S. 68–72

Rodríguez, A.; García, D.; Rodríguez, B.; Cardona, E.; Parpal, L.; Pons, P. (2015): Artificial lights and seabirds: Is light pollution a threat for the threatened Balearic petrels? In: Journal of Ornithology 156, S. 893–902

Rodríguez, L.; Begtashi, I.; Zanuy, S.; Carrillo, M. (2005): Long-term exposure to continuous light inhibits precocity in European male sea bass (Dicentrarchus labrax, L.): Hormonal aspects. In: General and Comparative Endocrinology 140, S. 116–125

Roenneberg, T.; Kantermann, T.; Juda, M.; Vetter, C.; Allebrandt, K. (2013): Light and the human circadian clock. In: Handbook of Experimental Pharmacology 217, S. 311–331

Rotics, S.; Dayan, T.; Kronfeld-Schor, N. (2011): Effect of artificial night lighting on temporally partitioned spiny mice. In: Journal of Mammalogy 92, S. 159–168

Rowse, E.; Harris, S.; Jones, G. (2016): The Switch from Low-Pressure Sodium to Light Emitting Diodes Does Not Affect Bat Activity at Street Lights. In: PloS One 11(3), doi: 10.1371/journal.pone.0150884

Rudolph, D.; Kirkegaard, J.; Lyhne, I.; Clausen, N.; Kørnøv, L. (2017): Spoiled darkness? Sense of place and annoyance over obstruction lights from the world's largest wind turbine test centre in Denmark. In: Energy research & social science 25, S. 80–90

Ruggles, C.; Cotte, M. (2010): Heritage Sites of Astronomy and Archaeoastronomy in the context of the UNESCO World Heritage Convention. International Secretariat of ICOMOS, International Astronomical Union, Paris

Ruhtz, T.; Kyba, C.; Posch, T.; Puschnig, J.; Kuechly, H. (2015): Lichtmesskampagne Zentralraum Oberösterreich. Land Oberösterreich, Linz, www.land-oberoesterreich.gv.at/159660.htm (18.2.2020)

Russ, A.; Reitemeier, S.; Weissmann, A.; Gottschalk, J.; Einspanier, A.; Klenke, R. (2015): Seasonal and urban effects on the endocrinology of a wild passerine. In: Ecology and Evolution 5, S. 5698–5710

Russo, D.; Cistrone, L.; Libralato, N.; Korine, C.; Jones, G.; Ancillotto, L. (2017): Adverse effects of artificial illumination on bat drinking activity. In: Animal Conservation, S. 1–10

Rybnikova, N.; Haim, A.; Portnov, B. (2015): Artificial Light at Night (ALAN) and breast cancer incidence worldwide: A revisit of earlier findings with analysis of current trends. In: Chronobiology International 32, S. 757–773

Rybnikova, N.; Haim, A.; Portnov, B. (2016): Does artificial light-at-night exposure contribute to the worldwide obesity pandemic? In: International Journal of Obesity 40, S. 815–823

Rydell, J.; Eklöf, J.; Sánchez-Navarro, S. (2017): Age of enlightenment: long-term effects of outdoor aesthetic lights on bats in churches. In: Royal Society Open Science 4(8), doi: 10.1098/rsos.161077

Ryer, C.; Olla, B. (1998): Effect of light on juvenile walleye pollock shoaling and their interaction with predators. In: Marine Ecology Progress Series 167, S. 215–226

Sagerer, K. (2015a): Lichtverschmutzung in der Schweiz. In: Wagner, E.; Kerschner, F.; Donat, M. (Hg.): Lichtverschmutzung: rechtliche Grundlagen und Vorschläge für eine Neuregelung. Linz, S. 251–260

Sagerer, K. (2015b): Lichtverschmutzung in Südtirol. In: Wagner, E.; Donat, M. (Hg.): Lichtverschmutzung: rechtliche Grundlagen und Vorschläge für eine Neuregelung. Linz, S. 237–260

Sánchez de Miguel, A. (2015): Spatial, Temporal and Spectral Variation of Light Pollution and its Sources: Methodology and Results. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, https://www.researchgate.net/profile/Alejandro_Sanchez_de_Miguel/publication/304212932_Spatial_Temporal_and_Spectral_Variation_of_Light_pollution_and_its_sources_Methodology_and_Resources/data/576971ce08ae3bf53d331bb0/tesis-alex-encompressed-1.pdf (18.2.2020)

Sánchez de Miguel, A.; Zamorano, J. (2008): Contaminación lumínica en España. Poster zur Konferenz »VIII Reunión Científica de la Sociedad Española de Astronomía«, www.celfosc.org/biblio/general/sanchez-zamorano2008a.pdf (18.2.2020)

Sánchez de Miguel, A.; Zamorano, J.; Gómez Castaño, J.; Pascual, S. (2014): Evolution of the energy consumed by street lighting in Spain estimated with DMSP-OLS data. In: Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 139, S. 109–117

Santhi, N.; Thorne, H.; van der Veen, D.; Johnsen, S.; Mills, S.; Hommes, V.; Schlangen, L.; Archer, S.; Dijk, D. (2012): The spectral composition of evening light and individual differences in the suppression of melatonin and delay of sleep in humans. In: Journal of pineal research 53, S. 47–59

Santos, C.; Miranda, A.; Granadeiro, J.; Lourenço, P.; Saraiva, S.; Palmeirim, J. (2010): Effects of artificial illumination on the nocturnal foraging of waders. In: Acta Oecologica 36, S. 166–172

Saraiji, R. (2012): Light Pollution Index (LPI): An Integrated Approach to Study Light Pollution with Street Lighting and Façade Lighting. In: Leukos 9, S. 127–146

Schandry, R. (2006): Biologische Psychologie. Weinheim

Schaub, A. (2015): UNIVOX Umwelt 2015. gfs-zurich, Markt- & Sozialforschung, Zürich, http://gfs-zh.ch/wp-content/uploads/2016/04/Univox_Umwelt-2015.pdf (18.2.2020)

SCHEER (Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks) (2018): Opinion on Potential risks to human health of Light Emitting Diodes (LEDs). https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/scientific_committees/scheer/docs/scheer_o_011.pdf (20.2.2020)

Scheer, F.; Hilton, M.; Mantzoros, C.; Shea, S. (2009): Adverse metabolic and cardiovascular consequences of circadian misalignment. In: Proc. Natl. Acad. Sci. USA 106, S. 4453–4458

Scheer, F.; Hu, K.; Evoniuk, H.; Kelly, E.; Malhotra, A.; Hilton, M.; Shea, S. (2010): Impact of the human circadian system, exercise, and their interaction on cardiovascular function. In: Proc. Natl. Acad. Sci. USA 107, S. 20541–20546

Schernhammer, E.; Kroenke, C.; Laden, F.; Hankinson, S. (2006): Night work and risk of breast cancer. In: Epidemiology 17, S. 108–111

Schierz, C. (2009): Auswirkungen von Lichtimmissionen auf die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen. TU Ilmenau/Fachgebiet Lichttechnik, Ilmenau

Schivelbusch, W. (1983): Lichtblicke: zur Geschichte der künstlichen Helligkeit im 19. Jahrhundert. München/Wien

Schivelbusch, W. (1992): Licht, Schein und Wahn: Auftritte der elektrischen Beleuchtung im 20. Jahrhundert. Berlin

Schlager, M. (2015): Lichtverschmutzung in Slowenien. In: Wagner, E.; Kerschner, F.; Donat, M. (Hg.): Lichtverschmutzung: rechtliche Grundlagen und Vorschläge für eine Neuregelung. Band 6, Linz

Schleich, J.; Mills, B.; Dütschke, E. (2014): A brighter future? Quantifying the rebound effect in energy efficient lighting. In: Energy Policy 72, S. 35–42

Schmidt, A. (2007): Licht in der Stadt. Leitbilder und Strategien für innovative Lichtkonzepte. Materialien für die Arbeit vor Ort 36, Konrad-Adenauer-Stiftung, Sankt Augustin/Berlin

Schoech, S.; Bowman, R.; Hahn, T.; Goymann, W.; Schwabl, I.; Bridge, E. (2013): The effects of low levels of light at night upon the endocrine physiology of western scrub-jays (Aphelocoma californica). In: Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology 319, S. 527–538

Schoeman, M. (2016): Light pollution at stadiums favors urban exploiter bats. In: Animal Conservation 19, S. 120–130

Schroer, S.; Hölker, F. (2014): Light Pollution Reduction. In: Karlicek, R.; Sun, C.-C.; Zissis, G.; Ma, R. (Hg.): Handbook of Advanced Lighting Technology. Cham, S. 1–17

Schulte-Römer, N. (2015): Innovating in public – the introduction of LED lighting in Berlin and Lyon. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin

Schulte-Römer, N. (2017): Umrüstung oder LED-Revolution? Eine unvollendete Geschichte der LED-Beleuchtung. In: Dittmann, F.; Luxbacher, G. (Hg.): Geschichte der elektrischen Beleuchtung. Berlin, S. 189–207

Schulte-Römer, N.; Meier, J.; Dannemann, E. (2018): Light pollution – a global discussion. Helmholtz-Centre for Environmental Research GmbH – UFZ, Leipzig

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (2014): Stadtbild Berlin. Werbekonzept. Berlin, https://www.stadtentwicklung.berlin.de/staedtebau/baukultur/werbekonzept/download/werbekonzept_handbuch.pdf (18.2.2020)

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (2016): Abschlussbericht Bürgerbeteiligung LED-Musterstrecke Waldstraße in Berlin-Moabit. Berlin, https://www.berlin.de/senuvk/bauen/beleuchtung/download/abschlussbericht_waldstrasse.pdf (18.2.2020)

Shuboni, D.; Yan, L. (2010): Nighttime dim light exposure alters the responses of the circadian system. In: Neuroscience 170(4), S. 1172–1178

da Silva, A.; Samplonius, J.; Schlicht, E.; Valcu, M.; Kempenaers, B. (2014): Artificial night lighting rather than traffic noise affects the daily timing of dawn and dusk singing in common European songbirds. In: Behavioral Ecology 25, S. 1037–1047

da Silva, A.; de Jong, M.; van Grunsven, R.; Visser, M.; Kempenaers, B.; Spoelstra, K. (2017): Experimental illumination of a forest: no effects of lights of different colours on the onset of the dawn chorus in songbirds. In: Royal Society Open Science 4(1), doi: 10.1098/rsos.160638

da Silva, A.; Kempenaers, B. (2017): Singing from North to South: latitudinal variation in timing of dawn singing under natural and artificial light conditions. In: Journal of Animal Ecology 86, S. 1286–1297

Smith, M. (2008): Time to turn off the lights. In: Nature 457, doi: 10.1038/457027a

Somers-Yeates, R.; Bennie, J.; Economou, T.; Hodgson, D.; Spalding, A.; Mcgregor, P.; Bennie, J.; Economou, T.; Hodgson, D.; Spalding, A. (2016): Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom. In: Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences 283(1833), doi: 10.1098/rspb.2016.0813

Souman, J.; Tinga, A.; Te Pas, S.; van Ee, R.; Vlaskamp, B. (2018): Acute alerting effects of light: A systematic literature review. In: Behavioural brain research 337, S. 228–239

Spoelstra, K.; Grunsven, R.; Donners, M.; Gienapp, P.; Huigens, M.; Slaterus, R.; Berendse, F.; Visser, M.; Veenendaal, E. (2015): Experimental illumination of natural habitat – an experimental set-up to assess the direct and indirect ecological consequences of artificial light of different spectral composition. In: Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 370(1667), doi: 10.1098/rstb.2014.0129

Spoelstra, K.; van Grunsven, R.; Ramakers, J.; Ferguson, K.; Raap, T.; Donners, M.; Veenendaal, E.; Visser, M. (2017): Response of bats to light with different spectra: light-shy and agile bat presence is affected by white and green, but not red light. In: Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences 284(1855), doi: 10.1098/rspb.2017.0075

SSK (Strahlenschutzkommission) (2001): Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern. Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung. Bonn

SSK (2006): Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren. Bonn

Stadt Chemnitz (2016): Abstimmung zur Auswahl der zukünftigen Lichtfarbe bei LED-Straßenbeleuchtung beginnt. Pressemitteilung 731, https://www.chemnitz.de/chemnitz/de/aktuell/presse/pressemitteilungen/2016/731.html (18.2.2020)

Steidle, A.; Hanke, E.-V.; Werth, L. (2013): In The Dark We Cooperate: The Situated Nature of Procedural Embodiment. In: Social Cognition 31, S. 275–300

Steidle, A.; Werth, L. (2013): Freedom from constraints: Darkness and dim illumination promote creativity. In: Journal of Environmental Psychology 35, S. 67–80

Steinbach, R.; Perkins, C.; Tompson, L.; Johnson, S.; Armstrong, B.; Green, J.; Grundy, C.; Wilkinson, P.; Edwards, P. (2015): The effect of reduced street lighting on road casualties and crime in England and Wales: controlled interrupted time series analysis. In: Journal of Epidemiology and Community Health 69, S. 1118–1124

Stevens, R. (2009): Light-at-night, circadian disruption and breast cancer: assessment of existing evidence. In: Int. J. Epidemiol. 38, S. 963–970

Stone, E.; Jones, G.; Harris, S. (2009): Street Lighting Disturbs Commuting Bats. In: Current Biology 19, S. 1123–1127

Stone, E.; Wakefield, A.; Harris, S.; Jones, G. (2015): The impacts of new street light technologies: experimentally testing the effects on bats of changing from low-pressure sodium to white metal halide. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences 370(1667), doi: 10.1098/rstb.2014.0127

Swaczyna, A.; Moeck, M. (2012): Energetische Sanierung der Straßenbeleuchtung in der Altstadt von Regensburg – Abschlussbericht. Regensburg

Tan, D.; Manchester, L.; Terron, M.; Flores, L.; Reiter, R. (2007): One molecule, many derivatives: A never-ending interaction of melatonin with reactive oxygen and nitrogen species? In: Journal of Pineal Research 42, S. 28–42

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

Thüringer Rechnungshof (2015): Kommunale Straßenbeleuchtung. Bericht zur Querschnittsprüfung. Rudolstadt

Titulaer, M.; Spoelstra, K.; Lange, C.; Visser, M. (2012): Activity patterns during food provisioning are affected by artificial light in free living great tits (parus major). In: PLoS One 7(5), doi: 10.1371/journal.pone.0037377

Tomory, L. (2009): Progressive Enlightenment: The Origins of the Gaslight Industry 1780–1820. University of Toronto. Toronto

Tong, K. (2017): On observations of artificial light at night from ground and space. Dissertation, Unversität Bremen, Bremen

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

U.S. Department of Energy (2017): CALiPER Snapshot: Outdoor Area Lighting. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/10/f37/snapshot2017_outdoor-area.pdf (18.2.2020)

Van den Pol, A (1980): The hypothalamic suprachiasmatic nucleus of rat: intrinsic anatomy. In: The Journal of comparative neurology 191, S. 661–702

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

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

Vera, L.; Lopez-Olmeda, J.; Bayarri, M.; Madrid, J.; Sanchez-Vazquez, F. (2005): Influence of light intensity on plasma melatonin and locomotor activity rhythms in tench. In: Chronobiology International 22, S. 67–78

Verovnik, R.; Fišer, Ž.; Zakšek, V. (2015): How to reduce the impact of artificial lighting on moths: A case study on cultural heritage sites in Slovenia. In: Journal for Nature Conservation 28, S. 105–111

Villamizar, N.; García-Alcazar, A.; Sánchez-Vázquez, F. (2009): Effect of light spectrum and photoperiod on the growth, development and survival of European sea bass (Dicentrarchus labrax) larvae. In: Aquaculture 292, S. 80–86

Villamizar, N.; García-Mateos, G.; Sánchez-Vázquez, F. (2011): Behavioral responses of European sea bass (Dicentrarchus labrax) larvae and Artemia sp. exposed to constant light or darkness vs. light/dark cycles of white, red or blue wavelengths. In: Aquaculture 317, S. 197–202

Voigt, C.; Roeleke, M.; Marggraf, L.; Petersons, G.; Voigt-Heucke, S. (2017): Migratory bats respond to artificial green light with positive phototaxis. In: PLoS One 12(5), doi: 10.1371/journal.pone.0177748

Volgger, R. (2015): Lichtverschmutzung und Europarecht. In: Wagner, E.; Kerschner, F.; Donat, M. (Hg.): Lichtverschmutzung: rechtliche Grundlagen und Vorschläge für eine Neuregelung. Linz, S. 185–209

Völker, S.; Krenz, P. (2013): Entwicklung von Maßzahlen für adaptive Beleuchtungssysteme. In: Held et al. (2013), S. 87–90

Wagner, E.; Kerschner, F.; Donat, M. (2015): Lichtverschmutzung: rechtliche Grundlagen und Vorschläge für eine Neuregelung. Linz

Walczak, K.; Gyuk, G.; Kruger, A.; Byers, E.; Huerta, S. (2017): NITESat: A High Resolution, Full-Color, Light Pollution Imaging Satellite Mission. In: International Journal of Sustainable Lighting 19, S. 48–55

Walkling, A.; Stockmar, A. (2013): Normen, Richtlinien und Empfehlungen zur Begrenzung von Lichtimmissionen. In: Held et al. (2013), S. 137–140

Walther, M. (2014): Warum die Dunkelheit gut für uns ist. Aargauer Zeitung, 31.10.2014, https://www.aargauerzeitung.ch/leben/leben/warum-die-dunkelheit-gut-fuer-uns-ist-128510883 (17.2.2020)

Wang, X.; Armstrong, M.; Cairns, B.; Key, T.; Travis, R. (2011): Shift work and chronic disease: the epidemiological evidence. In: Occup. Med. 61, S. 78–89

WD (Wissenschaftliche Dienste) (2019): Lichtverschmutzung. Rechtliche Regelungen zur Beschränkung von Beleuchtung in Deutschland und ausgewählten europäischen Staaten. Sachstand, Deutscher Bundestag, WD 7 – 3000 – 009/19, Berlin

Weaver, D. (2011): Celestial ecotourism: new horizons in nature-based tourism. In: Journal of Ecotourism 10, S. 38–45

Weirauch, T. (2011): Energieeffiziente öffentliche Beleuchtung: Rechtliche, wirtschaftliche und technische Aspekte von bedarfsgerechten, adaptiven Beleuchtungsstrategien. Diplomarbeit, Universität Koblenz-Landau, Koblenz

Welbers, A.; van Dis, N.; Kolvoort, A.; Ouyang, J.; Visser, M.; Spoelstra, K.; Dominoni, D. (2017): Artificial Light at Night Reduces Daily Energy Expenditure in Breeding Great Tits (Parus major). In: Frontiers in Ecology and Evolution 5, S. 1–10

Welsh, B.; Farrington, D. (2008): Effects of improved street lighting on crime. In: Campbell Systematic Reviews 4, S. 313–342

van de Werken, M.; Gimenez, M.; de Vries, B.; Beersma, D.; Gordijn, M. (2013): Short-wavelength attenuated polychromatic white light during work at night: limited melatonin suppression without substantial decline of alertness. In: Chronobiology International 30, S. 843–854

Wiemken, T.; Froessler, D. (2011): Licht im Stadtumbau. Der Einsatz von Licht in Strategien und Projekten des Stadtumbaus – Ziele, Funktionen und Instument. Innovationsagentur Stadtumbau NRW, Düsseldorf

Wiener Umweltanwaltschaft (2014): Österreichische Gesetze und Richtlinien. Wien

Wirz-Justice, A. (2006): Biological rhythm disturbances in mood disorders. In: International clinical psychopharmacology 21 (1), S. 11–15

Wittlich, M. (2010): Blendung – Theoretischer Hintergrund. Informationen des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin

Witzel, M. (2018): Nachhaltige Tourismusentwicklung in Schutzgebieten: Das touristische Potenzial deutscher Sternenparks. Bachelorarbeit, Hochschule Harz, Wernigerode

Wright, K.; McHill, A.; Birks, B.; Griffin, B.; Rusterholz, T.; Chinoy, E. (2013): Entrainment of the human circadian clock to the natural light-dark cycle. In: Current biology 23, S. 1554–1558

Wyse, C.; Biello, S.; Gill, J. (2014): The bright-nights and dim-days of the urban photoperiod: implications for circadian rhythmicity, metabolism and obesity. In: Annals of Medicine 46, S. 253–263

Yasuo, S.; Nakao, N.; Ohkura, S.; Iigo, M.; Hagiwara, S.; Goto, A.; Ando, H.; Yamamura, T.; Watanabe, M.; Watanabe, T. et al. (2006): Long-day suppressed expression of type 2 deiodinase gene in the mediobasal hypothalamus of the Saanen goat, a short-day breeder: implication for seasonal window of thyroid hormone action on reproductive neuroendocrine axis. In: Endocrinology 147, S. 432–440

Youyuenyong, P. (2015): Comparative Environmental and Planning Law Relating to Light Pollution Control in England and Other Jurisdictions. De Montfort University, Leicester

Zeitzer, J.; Dijk, D.; Kronauer, R.; Brown, E.; Czeisler, C. (2000): Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. In: The Journal of physiology 526 (3), S. 695–702

Zhang, S.; Chen, X.; Zhang, J.; Li, H. (2014): Differences in the reproductive hormone rhythm of tree sparrows (Passer montanus) from urban and rural sites in Beijing: The effect of anthropogenic light sources. In: General and Comparative Endocrinology 206, S. 24–29

7 Anhang

7.1 Abbildungen

Abb. 1.1 Intendierte und nichtintendierte Lichtemissionen nächtlicher Beleuchtung 24
Abb. 2.1 Fotometrische Messgrößen 30
Abb. 2.2 Nächtliches Berlin, fotografiert von der Internationalen Raumstation am 31. März 2016 33
Abb. 2.3 Vertikale Fotografien des Nachthimmels in Deutschland und den USA 35
Abb. 2.4 Vertikale Aufnahmen des Nachthimmels vor und nach der Umrüstung von Beleuchtungsanlagen in Szekszárd (Ungarn) 36
Abb. 2.5 Aufnahmen von Himmelsansichten in Deutschland mithilfe einer Fischaugenoptik 38
Abb. 2.6 Analyse von Satellitendaten der Lichtemissionen verschiedener europäischer Hauptstädte 42
Abb. 2.7 Schätzung des Pro-Kopf-Energieverbrauchs pro Jahr für Beleuchtung in der Nacht in verschiedenen europäischen Ländern 43
Abb. 2.8 Himmelshelligkeit in der Nähe von Balaguer (Spanien) in Abhängigkeit von Entfernung und unterschiedlicher Bewölkung 45
Abb. 2.9 Zeitlicher Verlauf der Beleuchtung an drei Berliner Standorten 49
Abb. 2.10 Jährliche prozentuale Veränderung der Beleuchtung auf globaler Ebene von 2012 bis 2016 51
Abb. 2.11 Jährliche prozentuale Veränderung der Beleuchtung in Deutschland von 2012 bis 2016 51
Abb. 2.12 Jährliche prozentuale Veränderung der Beleuchtung in Deutschland von 2012 bis 2016 52
Abb. 2.13 Lichtspektren unterschiedlicher Leuchtmittel 56
Abb. 2.14 Verschiedene Typen von Stadtleuchten 58
Abb. 2.15 Leuchtpylon mit Angaben zur Leuchtdichte in cd/qm 60
Abb. 3.1 Anstrahlung des Brandenburger Tors in Berlin 66
Abb. 3.2 Wirkungen des Lichts auf den menschlichen Organismus 74

Abb. 3.3 Schematische Darstellung des menschlichen Sehapparats 76
Abb. 3.4 Experimentalinfrastruktur zur Erforschung struktureller und funktioneller Auswirkungen von künstlichem Licht auf ein Ökosystem 93
Abb. 3.5 Nachtlichtintensitäten und Wirkungen auf Melatoninspiegel und Geburtenverteilung von Tammar-Wallabies 102
Abb. 3.6 Die Komplexität der Auswirkungen künstlicher Beleuchtung bei Nacht auf Pflanzen und Tiere 107
Abb. 4.1 Städte und Gemeinden in Deutschland mit Lichtkonzepten 122
Abb. 4.2 Straßen mit abgeschirmter Beleuchtung in Santa Cruz de La Palma 141
Abb. 4.3 Montagealternativen von Straßenbeleuchtungsanlagen 148
Abb. 4.4 Gebäudeanstrahler mit Fassadenschablone Musterstraße der 149
Abb. 5.1 RhönEnergie in Fulda 159

7.2 Tabellen

Tab. 2.1 Verschiedene Messmethoden für Lichtemissionen im Vergleich 39
Tab. 2.2 Anteil der von künstlicher Himmelshelligkeit betroffenen Bevölkerung (und terrestrischen Landflächen) 46
Tab. 3.1 Beobachtungsstudien zu den humanmedizinischen Wirkungen von Lichtverschmutzung 82
Tab. 3.2 Insektenattraktion durch unterschiedliche Leuchtmittel bei einer Feldstudie in Tirol (Österreich) 92
Tab. 3.3 Schwellenwerte zum erstmaligen Nachweis einer Wirkung von künstlicher Beleuchtung auf Organismen bei Nacht 112
Tab. 4.1 Betriebszeiten für nicht sicherheitstechnischen Zwecken dienende Beleuchtung aus der ÖNORM O 1052 136
Tab. 4.2 Detektion von Objekten und Reaktionszeiten im Straßenverkehr in Abhängigkeit von der Leuchtdichte 144
Tab. 4.3 Blauanteil verschiedener Leuchtmittel 151

BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG

Karlsruher Institut für Technologie

Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Telefon: +49 30 28491-0
E-Mail: buero@tab-beim-bundestag.de
Web: www.tab-beim-bundestag.de
Twitter: @TABundestag